

光源稳定性对简并四波混频信噪比影响的实验研究

王维波^{1,2}, 陈德应¹, 樊荣伟¹, 夏元钦¹

1. 哈尔滨工业大学光电子所, 黑龙江 哈尔滨 150001

2. 哈尔滨师范大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 在碘蒸气中研究了染料激光稳定性对简并四波混频(DFWM)信噪比的影响。实验中采用多模Nd:YAG激光器倍频的输出泵浦染料激光器(染料PM580溶于酒精)。在具有前向补偿分光系统和图像探测系统的帮助下,在常温常压条件下测得泵浦光在波长为554.013 nm时达到饱和光强为290 μJ。同时发现染料激光器的光稳定性(输出波长范围,光束质量和能量转换效率等)随使用时间,泵浦激光脉冲次数和能量的增加而逐渐减弱。另外通过对比发现在染料激光器输出不稳定时,光源单色性和指向性等指标的变化导致在同一泵浦强度不同时刻获得的DFWM信号强度相差很大,且DFWM信号信噪比低。染料激光器光源稳定性对DFWM信号影响的研究结果对物质的痕迹量探测以及无荧光物质光谱定标等方面的应用具有重要意义。

关键词 非线性光学; 简并四波混频; 光源稳定性; 信噪比; 碘蒸气

中图分类号: O437 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)02-0462-04

引言

简并四波混频(DFWM)光谱技术与其他光谱技术(如LIF、CARS)相比,具有高灵敏度,高分辨率,高信噪比等优点,被广泛用于燃烧火焰中痕量原子、分子以及自由基的测量^[1-3]。然而由于气相介质的DFWM信号比固态介质弱2个数量级,不得不采用高灵敏度的光电倍增管(PMT)来采集信号并放大,然后通过斯坦福的BOXCAR系统处理,这样同时也将背景噪声放大,使信噪比下降。因此DFWM光谱技术要真正走向实用化,必须尽可能降低背景噪声保证DFWM信号的可靠性和有效性。目前可能降低背景噪声,提高信噪比的方法有许多:从理论上讲,4束光等能量时,信噪比高,波形畸变小,可靠性强^[4]。实验中发现^[5-10]:光路设计上,多加一些光阑,增加空间滤波效果;分光系统设计上,自稳分光(4束光的能量均等,可以调节每束光的汇聚方向),提高信噪比;池子的设计和放置的位置:要求窗片面形好、吸收少、反射低;接受端采用高灵敏度的PMT来采集信号并放大,然后通过斯坦福的BOXCAR系统放大处理,其中:PMT灵敏度的高低,直接影响信噪比。激光光源输出的光束的指向稳定性、能量稳定性、激光染料的输出转换效率等均直接影响DFWM实验中的信噪比。例如,激光光源输出的

能量稳定性:激光光源的输出波长尽可能采用待测介质的共振波长,否则会增加背景噪声。然而目前对激光光源输出的光束质量对DFWM实验中的信噪比的影响未见报道。

当前用于DFWM实验研究的光源多数为染料激光器。而研究发现染料分子的稳定性取决于染料分子与其周围分子的相互作用而产生的降解。染料分子的氧化降解,热降解等会引起染料激发态的消激发和荧光量子效率的降低,导致染料激光输出的下降。染料激光光源输出激光功率的稳定性,染料的稳定性与染料分子的运动性具有很大的关系^[11,12]。虽然实验中早已发现染料激光器的光稳定性问题,但是在染料激光器的光稳定性对四波混频信号和背景噪声的问题上,本实验首次在具有补偿前向分光系统和光电探测系统的帮助下探讨染料激光器的光稳定性,光斑形状和光束质量对四波混频信号和背景噪声。

1 实验装置

本实验采用具有自稳分光补偿特性的前向DFWM的实验装置与我们先前的研究中使用的相同^[13]。实验采用Nd:YAG激光器(Continuum, Powerlite™ Precision II 9100)的倍频532 nm的输出泵浦染料激光器(Lambda Physik, Scarmatepro™),实验中所选用的激光染料为转换效率较高的

收稿日期: 2009-03-16, 修订日期: 2009-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60878018, 10674036)资助

作者简介: 王维波, 1964年生, 哈尔滨工业大学物理电子学专业博士研究生 e-mail: hit04b@163.com

PM580, 获得 550~570 nm 连续可调的染料激光, 激光的重复频率为 10 Hz, 染料激光的线宽为 0.012 cm^{-1} , 激光器的脉冲宽度为 7 ns, 输出效率、波长范围及稳定性均较好。染料激光器输出的染料激光经自稳分光系统后形成 4 束在空间上相互平行的激光, 并且 4 束光在与光束垂直方向上形成正方形的 4 个顶点, 4 束光的能量近似相等, 光束直径为 4 mm。将少量的固态碘放入两端封有石英窗片的样品池中, 打开气阀使样品池中的压强为大气压, 然后关闭气阀在常温下使 I_2 达到饱和, 常温下 I_2 的饱和蒸气压约为 40 Pa, 泵浦激光能量为 290 μJ 时, 扫描染料激光器的波长, 步长为 0.002 nm, 一个步长打 50 个点取平均。光电倍增管的信号经 Boxcar 平均后, 由计算机进行处理和保存。使用 Tektronix 示波器 (500 MHz) 监视并记录瞬间的 DFWM 信号波形及相对强度。其次, 为了监测实验中频率失谐的问题, 实验中同时建立了一个由光电探测器和示波器组成的光路来测量碘分子的线性吸收谱, 以便采用已知碘分子的线性吸收谱线来定标单个跃迁频率。

2 实验结果及分析

由于本实验是在具有补偿前向分光系统和光电探测系统的帮助下探讨染料激光器的光稳定性, 光斑形状和光束质量对四波混频信号和背景噪声, 因此光源漂移指向稳定性和波前畸变等干扰引起的光源不稳对四波混频信号已基本消除, 只需考虑染料激光器输出能量和频率稳定性对四波混频信噪比的影响。另外为降低信噪比, 必须选择适当的泵浦光强, 光强太高也会增加背景噪声(由于电致伸缩效应), 光强太低四波混频信号弱, 信噪比也会降低。

2.1 确定饱和光强

为了获得优异信噪比的 DFWM 光谱, 实验中必须使泵浦光和探测光的能量相等或处于同一个数量级, 并且要大约等于饱和光强^[4]。因此我们选择观察碘蒸汽在 554.013 nm 处的共振简并四波混频信号随泵浦光能量增加而出现饱和的现象, 得到该波段 DFWM 光谱随泵浦光波长变化的曲线(图 1), 而且发现在常温常压条件下 DFWM 信号的背景噪声并没有随泵浦能量的增强而增大。从图 1 中可以看出在波长为 554.013 nm 处饱和光强为 290 μJ 。

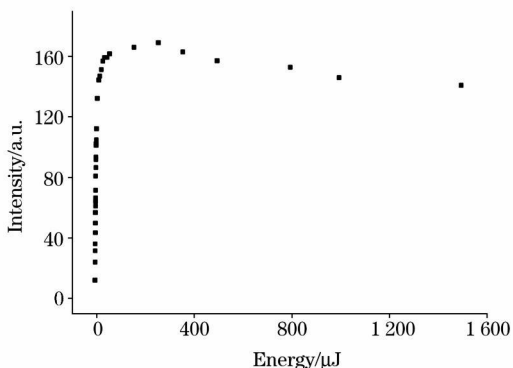


Fig 1 I_2 DFWM signal intensity as a function of laser energy ($\lambda = 554.013 \text{ nm}$)

2.2 染料激光器输出相对稳定时, 可观察到信噪比较高的 DFWM 信号

图 2 显示的是在染料激光器稳定输出并且达到饱和光强的条件下, 染料激光器在 10 μJ 输出情况下 DFWM 信号的波动情况图。从图 2 中可以看出在常温常压下, DFWM 光谱依然有非常好的信噪比。在常温常压条件下由于碰撞淬灭会大大降低激光诱导荧光光谱(LIF)的检测灵敏度, 几乎观察不到碘蒸气荧光光谱, 但却可获得较强的碘蒸气的简并四波混频信号。因此, 为提高简并四波混频信号可靠性和有效性信噪比的实验研究, 必须使用示波器(Tektronix-500 MHz)监视并记录瞬间的 DFWM 信号波形及强度, 以便衡量脉冲染料激光器的稳定性对 DFWM 信噪比的影响。从而为 DFWM 光谱技术在实际测量中得到稳定、有效和可靠的数据提供有力的技术保证。

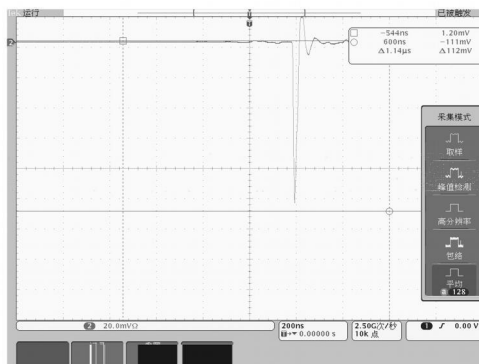


Fig 2 Relation between pump pulse and DFWM signal pulse

2.3 有噪声时的 DFWM 信号

图 3 显示的是在染料激光器输出不稳定并且达到饱和光强的条件下, 染料激光器在 10 μJ 输出情况下 DFWM 信号的波动情况图。从图 3(a)~(c)中可以看出, 对于同样的染料激光器输出, 不同时刻 DFWM 信号强度相差很大, 而且 DFWM 信号信噪比低, 背景噪声大。

这里可能有以下几个原因: 一是染料激光器输出不稳定。染料激光的泵浦光源主要为紫外光可见光区域激光, 在受到泵浦光长时间照射后, 介质中的有机激光染料的发光强度或激光输出能量以及光束质量都会随着辐照时间或泵浦脉冲次数的增加而下降, 虽然输出能量在短时间内可以保持不变, 但是随着辐照时间或泵浦脉冲次数的增加, ASE 逐渐增加, 光束质量下降^[14], 因此对于染料激光器来讲, 由于光降解造成激光输出稳定性降低, 不但影响输出的转化效率, 造成输出能量降低。即使在短时间内输出能量稳定, 而其中的 ASE 所占的比例也会随着光降解程度的增加而增加, 从而使染料激光器输出的激光光斑质量降低, 也可能使产生的 DFWM 信号不稳。

另外由于激光光源的非单色性, DFWM 光谱的线宽等于或超过探测光跃迁产生的多普勒展宽。一般来讲, 激光光场是由大量的单色光场组成的等量的激光光谱外形, 并且它的光斑形状随着激光光谱功率密度而改变^[15]。每个单色光

场对应于一个 DFWM 信号, 如果共振失谐, 则相关的相干相位差可能会有干涉光强增加或减少两种可能。若考虑到多个单色光场作用的共同效果, 则共振失谐 DFWM 信号不但相位匹配失谐, 而且 DFWM 光谱线形改变, 背景噪声增加, 从而使信噪比降低。从而使产生的 DFWM 信号不稳。此结论与 Ewart 等得到的相同^[16]。

最后是杂散光影响。这里所谓的杂散光是指通过反射镜片等反射或者是样品池窗片二次反射而造成部分泵浦光直接

被光电倍增管接受, 产生的背景噪声。所谓的杂散光是指空气扰动, 是指实验装备周围有其他能引起振动和巨大噪声的设备, 造成气流扰动和引起灰尘等颗粒对传输中的泵浦光的散射, 波前畸变, 从而影响光束质量, 产生噪声。由于本实验中由于采用新的补偿分光技术, 已经极大地避免了上述噪声产生的条件。事实上实验过程在调整好光路的情况下, 可以打开普通照明光源和有机机械泵和分子泵工作的环境中, 仍然进行简并四波混频的实验工作。

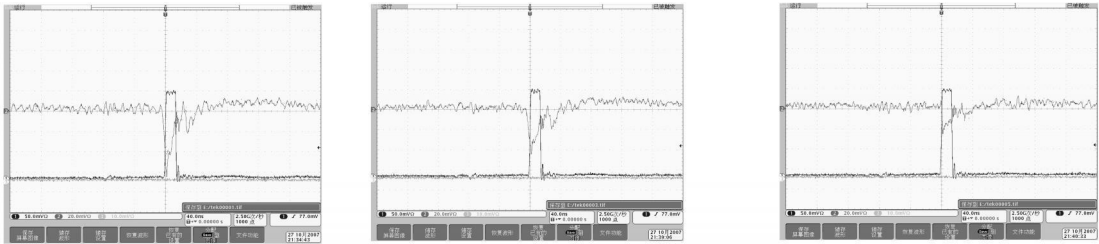


Fig 3 Relation between pump pulse and DFWM signal pulse

3 结 论

实验首次研究了光源稳定性对简并四波混频(DFWM)信噪比的影响。实验采用多模 Nd: YAG 激光器倍频 532 nm 的输出泵浦染料激光器, 实验中所使用激光染料为 PM580。

实验发现在具有前向补偿分光系统和光电探测系统的帮助下, 染料激光器的光稳定性和光束质量对四波混频信号和背景噪声影响比较大, 即输出波长范围和能量转换效率均随使用时间和泵浦激光脉冲次数和能量的增加而逐渐减弱, 实验结果对染料激光器的光稳定性对 DFWM 信号和背景噪声的影响上具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Farrow R L, Rakestraw D J. Science, 1992, 257: 1894.
- [2] SUN Jiang, SU Hong xin, WANG Yan-bang, et al (孙江, 苏红新, 王延帮, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2008, 28(6): 1213.
- [3] Stavros V G, Harel E, Leone S R. J. Chem. Phys., 2005, 122(6): 64301.
- [4] Farrow R L, Rakestraw D J. Appl. Phys. B, 1999, 68(4): 741.
- [5] Bultitude K, Stevens R, Ewart P. Appl. Phys. B, 2004, 79(6): 767.
- [6] Bultitude K, Brattfalean R, Ewart P, J. Raman Spectrosc., 2003, 34(12): 1030.
- [7] Hornung T, Skenderovic H, Motzkus M. Chem. Phys. Lett., 2005, 402(4-6): 283.
- [8] Meijer G, Chandler D W. Chem. Phys. Lett., 1992, 192: 1.
- [9] Nyholm K. Appl. Phys. B, 1997, 64: 707.
- [10] Grant A J, Ewart P, Stone C R. Appl. Phys. B, 2002, 74(1): 105.
- [11] Ghazya R, Zimb S A, Shaheena M, et al. Optics & Laser Techn., 2002, 34: 99.
- [12] Partridge William P. Jr., Laurendeau Normand M. Opt. Lett., 1994, 19(20): 1630.
- [13] WANG Wei-bo, CHEN De-ying, XIA Yuan-qin, et al (王维波, 陈德应, 夏元钦, 等). J. Harbin Institute of Technology(哈尔滨工业大学学报), 2007, 39(9): 1459.
- [14] Kahn M D, King T A. Applied Optics, 1995, 34: 8260.
- [15] Gaidarenko D V, Leonoy A G, Panteleey A A. JETT Lett., 1992, 55(4): 223.
- [16] Stevens R, Ewart P, Ma H, et al. Comb. Flam., 2007, 148(4): 223.

Study of the Effect of Light Source Stability on the Signal to Noise Ratio in Degenerate Four Wave Mixing Experiment

WANG Wei bo^{1, 2}, CHEN De ying¹, FAN Rong wei¹, XIA Yuan qin¹

1. Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. Department of Physics, Harbin Normal University, Harbin 150080, China

Abstract The effects of the stability of dye laser on the signal to noise ratio in degenerate four wave mixing (DFWM) were first investigated in iodine vapor using forward geometries. Frequency doubled outputs from a multi mode Nd: YAG laser pumped dye laser with laser dye PM580 dissolved in ethanol was used. With the help of forward compensated beam split technique and imaging detecting system, the saturation intensity of DFWM spectrum in the iodine vapor at 554.013 nm was first measured to be 290 μJ under the condition of atmospheric pressure and room temperature. The features of the dye laser such as wavelength ranges, beam quality and energy conversion efficiency decreased gradually with increasing pumping service use, pulse number and intensity. Additionally, with the comparison of the stable and unstable dye laser output, it was found that the instability of dye laser output had greatly influenced the DFWM signal and decreased the signal to background noise ratio. Shot to shot jitter and the broadening in the output frequency leads to an effective broadening of the recorded spectrum and loss of the DFWM signal to noise ratio under the same pumping intensity at different time. The study is of importance to the detection of trace atom, molecule and radical in combustion diagnosis.

Keywords Nonlinear optics; DFWM; Light source stability; Signal to noise ratio; Iodine vapor

(Received Mar. 16, 2009; accepted Jun. 20, 2009)