文章编号: 0253-2239(2009)06-1542-04

测量三阶非线性折射率的 4f 相位相干成像技术 中正负相位物体的优化

刘小波 吴建峰 杨俊义 宋瑛林

(苏州大学物理科学与技术学院,江苏苏州 215006)

摘要 4f 相位相干成像技术是测量三阶光学非线性的一种新方法。在 4f 相位相干成像系统中的相位光阑一直 都是用具有一致相位延迟的相位物体,这种相位光阑只能产生单一的相衬信号。应用正负相位物体可以提高 4f 相位相干成像系统测量灵敏度。为了使含正负相位物体的 4f 相位相干成像系统的灵敏度进一步得到提高,理论 分析了正负相位物体的半径和相移的大小对 4f 相位相干成像系统灵敏度的影响。结果表明系统的灵敏度随着相 位物体半径与小孔半径的比值的减小而增大。当相位物体的大小一定时,在相移为 0.43π 的地方系统的灵敏度达 到最大值。

关键词 非线性光学;4*f*系统;正负相位物体;非线性折射率 中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**:10.3788/AOS20092906.1542

Optimization of Positive-Negative Phase Objects in 4f Coherent Imaging System for Nonlinear Refraction Index Measurements

Liu Xiaobo Wu Jianfeng Yang Junyi Song Yinglin

(School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract The 4f coherent imaging system with phase object (PO) is a new method to measure the third-order optical nonlinearity. Only the PO with uniform phase retardation is used in nonlinear-imaging technique with a PO (NIT-PO) until now. A uniform PO can only produce a single phase contrast signal. Using positive-negative PO, the sensitivity of NIT-PO can be increased. In order to increase the sensitivity of NIT-PO further with positive-negative PO, theoretical investigation about the effects of radius and phase shift of positive-negative PO on the sensitivity of the 4f coherent imaging system is made. The results show that the sensitivity of the system increases with the ratio of PO radius and the aperture radius decreasing. When the size of the PO radius unchanges, the highest sensitivity for nonlinear refraction measurement can be gotton at the position with the phase change of 0.43π .

Key words nonlinear optics; 4f system; positive-negative phase object; nonlinear refractive index

1 引

言

光学非线性测量是研究非线性光学材料的关键技术之一。材料非线性折射率 n₂ 的测量是研究介质非 线性光学效应的一个重要手段。在以往的非线性折射 率的测量中已采用了多种方法,例如非线性干涉法、简 并四波混频、自衍射、椭圆偏振法、Z 扫描等。Z 扫描方 法光路简单、灵敏度高,是目前最常用的单光束测量材 料光学非线性的方法^[1~9]。但是它需要样品在激光传 播方向的移动,需要激光多次激发,对薄膜和易损伤的 材料不适用。最近 Georges Boudebs 等^[10]提出了一个 基于 4*f* 相干成像系统单脉冲测量材料三阶非线性折

收稿日期: 2008-09-17; 收到修改稿日期: 2008-11-07

基金项目:国家自然科学基金(10104007)资助课题。

作者简介:刘小波(1985-),男,硕士研究生,主要从事材料非线性光学性质的研究。E-mail: liuxiaobo49@sohu.com

导师简介:宋瑛林(1966-),男,教授,博士生导师,主要从事材料非线性光学性质的研究。E-mail: ylsong@hit.edu.cn (通信联系人)

射率的方法。它同 Z 扫描一样,也属于光束畸变测量。 其基本原理是把非线性样品放置在一个 4f 系统的频 谱面上,然后让激光通过这个 4f 系统。这样由于样品 非线性的作用,4f 系统出射面上的光强分布就会发生 变化。用 CCD 将变化了的光场空间分布记录下来,然 后配合数值模拟就可以得到材料的非线性折射率。这 个实验方法具有很多优点:单脉冲测量、光路简单、没 有样品的移动、对激光束的随机波动敏感度低、测量精 确、速度快、理论模型简单等。

相位光阑是 4f 相位相干成像系统中最核心的 一个器件,它的引入使得系统的敏度大大提高,并且 可以分辨非线性折射率的正负号。由于系统的测量 精度主要由相位光阑决定,所以通过对其进行仔细 研究以期使系统达到最高的灵敏度。以前在 4f 相 位相干成象系统中的相位光阑都是用具有一致相位 延迟的相位物体(uniform PO)。当具有一致相位延迟的相位物体的相位延迟为正的情况下,它对正的非 线性相移很灵敏但是对负的非线性相移不太灵敏。 相反,当具有一致相位延迟的相位物体的相位延迟为 负的情况下,它对负的非线性相移灵敏而对正的非线 性相移不太灵敏。最近本研究小组提出了一种同时 具有正相位延迟和负相位延迟的相位物体(正-负相 位物体)^[11]。由于正-负相位物体可以同时产生正的 和负的非线性相移,所以可以增加系统的灵敏度。 本文利用数值模拟的方法对含正负相位物体的 4f相位相干成像系统的参数进行了优化处理,使得 其可以达到最佳灵敏度。

2 理论模型

图 1(a) 是 4f 相干成像系统的原理图其中 Aperture 为相位光阑,NL 为非线性样品,L₁、L₂、L₃ 为聚透镜,BS₁,BS₂ 为分束镜,M₁,M₂ 为反射镜,tf 为中性衰减片。将一个带相位物体的光阑放置在 4f 系统的物平面上,入射的线偏振的单色平面波定 义为 $E = E_0(t) \exp[-j(\omega t - kz)] + c.c.,其中 \omega$ 为角频率,k 为波矢, $E_0(t)$ 为包含时间的电场振幅。 可以利用慢变振幅近似来描述电场在非线性介质中 的传播。因为关心的只是图像的强度分布,所以时 间项可以不考虑。而且,当利用低重复频率的皮秒 激光脉冲时,热效应的影响也可以忽略不计。假如 带相位物体的光阑的透过率为t(x,y),则透镜 L₁ 前焦面上的电场分布为 $O(x,y) = E_t(x,y)$,系统频 谱面上的电场分布为

 $S(u,v) = 1/\lambda f_1 g \mathscr{F} \big[O(x,y) \big] = 1/\lambda f_1 g$

 $\iint O(x,y) \exp[-2\pi j(ux+vy)] dxdy, \quad (1)$

其中 ℱ代表傅里叶变换, *u* 和 *v* 为焦平面上的空间 频率, *f*₁ 为透镜 L₁ 的焦距, λ 为入射激光的波长。





ig. 1 Experiment setup of 4f coherent imaging system (a) and the schematic of the diaphragm with phase object (b)

假设样品的非线性吸收为双光子吸收,吸收系数用β来表示。线性吸收系数和三阶非线性折射率 分别用α和n₂来表示。当非线性样品可以被看作 "薄样品"时,样品出射表面的电场分布为

 $S_{L}(u,v) = S(u,v)e^{-aL/2}[1+q(u,v)]^{(jkn_{2}/\beta-1/2)},(2)$ 在非线性样品是无损的克尔介质(即 α 和 β 都为零)的情况下,(2)式可以简化为

 $S_{L}(u,v) = S(u,v)\exp[j\varphi_{NL}(u,v)], \quad (3)$ 其中 $\varphi_{NL}(u,v) = kn_{2}LI(u,v), n_{2}$ 为三阶非线性折射

率,L为样品厚度,I(u,v)代表样品内的光强(正比 于 $|S(u,v)|^2$)。

在 4 f 系统出射面上由 CCD 探测的光强空间分 布可以写成

$$I_{\rm im}(x,y) = |U(x,y)|^2 = |\lambda f_{\star} \mathscr{F}^{-1} [S_t(y,y) H(y,y)]|^2, \qquad (4)$$

其中 \mathcal{F}^{-1} 代表逆傅里叶变换,H(u,v)为无像差透镜的相干光学传递函数, $H(u,v) = \operatorname{circ}[(u^2 + v^2)^{1/2}]$ $\lambda G/NA]。圆形函数 \operatorname{circ}(\rho) 定义为当 <math>\rho(u,v)$ 小于1 时为1,其它地方为0。NA为透镜L₁的数值孔径, G为光学系统的放大倍率。

4f系统入口处的圆形光阑的透射函数表示为

$$t_a(x,y) = \operatorname{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R_a}\right), \quad (5)$$

其中 R_a 为光阑半径,圆形函数 circ(ρ)的定义同上。 在光阑的中心有一个半径为 L_p 的圆形正负相位物 体,它对入射光产生一个相位变化 φ_L。整个光阑 (带相位物体)的透射函数可以写成

$$t(x,y) = t_a(x,y) \cdot \exp\left\{j \operatorname{sgn}(x)\phi_L \operatorname{circ}\left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{L_a}\right]\right\}, \quad (6)$$

其中 sgn(x) 为阶跃函数,当 x 为负的时候它取一

1, 而当 x 取正的时候取 1, 如图 1(b) 所示。

图 2 是利用正-负相位光阑的数值模拟非线性 图像的光强空间分布图,图 2(b)为其剖面图。模拟 中使用了 $\phi_L = \pi/2$ 以及正的 n_2 。可以看到在正相位 延迟的相位物体部分相衬信号为正,在负相位延迟 的相位物体部分相衬信号为负。相反地,对于一个 负的 n_2 ,在具有正的和负的相位延迟的半圆形相位 物体的相衬信号分别为负的和正的。将正相位延迟 的半圆内与负相位延迟的半圆内的平均能流之差定 义为 $\Delta T'$ 。光路中被分束镜 BS₁ 分出,经透镜 L₃ 汇 聚到 CCD 上的那个支路是用来监视入射脉冲能量 变化的参考光路。



图 2 (a) 4f 系统出射面上的光强空间分布图(n₂ 为正)。(b) 图 2(a)的剖面图

Fig. 2 Spatial distribution of intensity in the output plane of the the 4f system (n_2 is positive), (b) profile of Fig. 2(a)



图 3 (a) 相位物体相移为 $\phi_L = 0.4\pi$ 时, ΔT 随 L_p/R_a (相位物体与光阑的半径比)的变化曲线。 (b) 当 $L_p/R_a = 0.25$ 时, ΔT 随 ϕ_L 的变化曲线

Fig. 3 (a) ΔT as a function of L_p/R_a (the ratio of PO radius and the aperture radius) when $\phi_L = 0.4\pi$.

(b) ΔT as a function of ϕ_L when $L_p/R_a = 0.25$

利用(1)~(6)式,可以进行数值模拟。模拟中所 用的主要参数包括, λ =532 nm, R_a =2 mm, f_1 = f_2 = 40 cm, n_2 =4×10⁻¹⁸ m²/W, NA=0.1 和 G=1。透镜 L₁ 的聚焦平面上的艾里半径为 ω_0 =1.22 $\lambda f_1/(2R_a)$, 衍射长度为 $z_0 = \pi \omega_0^2 / \lambda_0$ 当 $R_a \leq 3$ mm时,可以得到 $z_0 \geq 1.2$ cm,远远大于样品厚度L=2 mm,因此样品 可以被看做"薄样品"。图 3 (a)显示了 $\Delta T'$ 随 L_p/R_a 的变化图。从图 3(a)中可以看到 $\Delta T'$ 随着 L_p/R_a 的 减小而增大。这里 $\phi_L = 0.4\pi$ 。但是这只是在数值模 拟中,实际上 L_p 和 R_a 是不能够任意选取的。有两方 面原因决定 L_p 和 R_a 不能够取得太小:1) 如果 L_p 和 R_a 太小的话,加工工艺方面会非常困难; 2) 如果 R_a 太小的话,想要在傅里叶面上得到足够的光强,需要 的入射能量是巨大的。另外光阑半径过大也不是一 个好的选择。因为当光阑增大的同时,高斯光也必须 相应地增加扩束比,这在光路中也会比较困难。而且 当光阑半径过大的时候还有可能会导致理论分析中 的傍轴近似不再成立。

接下来讨论相位物体相移 ϕ_L 对 $\Delta T'$ 的影响。 图 3(b)显示了 $\Delta T'$ 随 ϕ_L 的变化关系图。在模拟中 $L_p = 0.5$ mm。从图中可以看到 $\Delta T'$ 随 ϕ_L 成周期性 变化,在 $\phi_L = 0.43\pi$ 的地方 $\Delta T'$ 达到了正的最大值, 而在 $\phi_L = 1.57\pi$ 的地方 $\Delta T'$ 达到了负的最大值。在 实际测量时取 $\phi_L < \pi$ 。

图 4 给出了 $\Delta T'$ 随 L_p/R_a 和 ϕ_L 变化的三维图。 从三维图中可以看到当 L_p/R_a 接近零, $\phi_L = 0.43\pi$ 时,系统的灵敏度达到最大值。在实际测量中 L_p/R_a 的值不能取的太小,正常取为 0.1~0.3,这样与系统的灵敏度与其最高灵敏度相差的并不是很大。



图 4 $\Delta T'$ 随 L_p/R_a 和 ϕ_L 的变化图 Fig. 4 $\Delta T'$ as a function of L_p/R_a and the phase change of the phase object ϕ_L

3 结 论

介绍了应用正负相位物体来提高 4*f* 相位相干 成像技术测量三阶非线性折射率灵敏度的新方法。 理论分析了正负相位物体的半径和相移的大小对 4*f* 相位相干成像系统灵敏度的影响。发现系统的 灵敏度随着相位物体半径与光阑半径的比值 L_p/R_a 的减小而增大,当比值 L_p/R_a 一定时,系统的灵敏 度最大值的位置在相移为 0.43 π 的地方。

参考文献

- Mansoor Sheik-Bahre, Ali A. Said, Tai-Huei Wei *et al.*. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(4): 760~769
- 2 Liang Zhijian, Tang Fulong, Gan Fuxi et al.. Investigation on Third-order Optical Nonlinearity of Ni-Azo Metal Complex by the Z-scan Technique[J]. Chinese. J. Laser B, 2000, 9(3): 233~ 237
- 3 Ma Shihong, Lu Xingze, Han Kui et al. Fabrication and Optical Nonlinearities of Langmuir-Blodgett Multilayers of 1-Benzyl-9-Hydrofullerence-60[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(11): 1600 ~1606
- 马世红,陆兴泽,韩 奎等.1-苄基-9-氢富勒烯-60LB多层膜的 制备及其光学非线性性质[J].光学学报,1996,**16**(11):1600~ 1606
- 4 Yang Xihua, Sun Zhenrong, Ding Lianen *et al.*. Nonlinear Optical Properties of 1-(2-Pyridylazo)-2-Naphthol Thin Film[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1415~1419 杨希华,孙真荣,丁良恩等. 1-(2-吡啶偶氮)-2-萘酚薄膜的非线 性光学特性研究[J]. 光学学报, 1999, **19**(10): 1415~1419
- 5 Liyong Ren, Baoli Yao, Xun Hou et al.. Analyses and computations of asymmetric Z-scan for large phase shift from diffraction theory[J]. Chin. Opt. Lett., 2003, 1(2): 111~113
- 6 Jia Zhenghong, Li Qu, Chen Yixin et al.. Linear Absorption Induced Thermal Effect in Z-Scan Measurements[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(5): 635~639
- 贾振红,李 劬,陈益新等. Z 扫描测量中的热致非线性效应 [J]. 光学学报, 1996, **16**(5): 635~639
- 7 Yu Baolong, Zhu Congshan, Gan Fuxi *et al.*. Nonlinear Optical Properties of SnO₂ Nanoparticles Studied by Z-Scan Technique [J]. Acta Optica Sinica, 1997, **17**(4): 423~429 余保龙,朱丛善,干福熹等. 纳米微粒 SnO₂ 非线性光学特性的 Z-扫描技术研究[J]. 光学学报, 1997, **17**(4): 423~429
- 8 Liu Dajun, He Xingquan, Gao Zhengguo *et al.*. Synthesis and Nonlinear Properties of Tetra-Tert-Butylnaphthalocyaninagallium Iodine[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 17~20 刘大军,何兴权,高正国等.四叔丁基碘代萘酞菁镓的合成及非 线性特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 17~20
- 9 Wang Fangfang, Zhang Kun, Zhu Baohua et al.. Substituent Effect on the Third-Order Nonlinear Optical Properties of Porphyrin Compounds[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28 (1): 132~137

王芳芳,张 琨,朱宝华等.取代基对卟啉类化合物三阶非线性 光学特性的影响[J].光学学报,2008,28(1):132~137

- 10 G. Boudebs, S. Cherukulappurath. Nonlinear optical measurements using a 4f coherent imaging system with phase objects[J]. Phys. Rev. A, 2004, 69: 053813-1~053813-6
- 11 Y. Li, Y. Song, J. Yang et al.. Measurement of third-order nonlinear refraction using nonlinear-imaging technique with positive-negative phase object [J]. Appl. Phys. B, 2008, 92: 253~257