

双臂相位 Z 扫描测量稀溶液中溶质光学非线性

石圣涛 杨俊义 陆 洵 王 奇 刘城源 罗晓琴 宋瑛林

苏州大学物理与光电·能源学部, 江苏 苏州 215006

摘要 基于相位 Z 扫描技术提出了双臂相位 Z 扫描技术, 在相位 Z 扫描技术的光路中并联一个相同的光路。与传统的 Z 扫描技术相比, 相位 Z 扫描可区分溶液的三阶非线性折射和瞬态热致非线性, 且可实现单脉冲测量, 系统灵敏度也要比 Z 扫描技术高。以往的方法都不能很好地测量稀溶剂中纯溶质的光学非线性, 采用双臂相位 Z 扫描技术可极大提高系统测量信噪比, 从而可准确地测量出稀溶剂中纯溶质的光学非线性。

关键词 非线性光学; 相位 Z 扫描; 溶质; 非线性折射率

中图分类号 O437 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0319006

Measurement of Dilute Solute Nonlinearities from Solution by Using Dual-Arm Phase Object Z-scan Technique

Shi Shengtao Yang Junyi Lu Xun Wang Qi Liu Chengyuan

Luo Xiaoqin Song Yinglin

College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract A dual-arm phase object (PO) Z-scan technique is proposed based on PO Z-scan technique, in which an identical optical path is added into the PO Z-scan setup. Compared with the conventional Z-scan technique, PO Z-scan technique can distinguish the third-order nonlinear refraction from the transient thermally induced nonlinearity and realize the single pulse measurement, and the system sensitivity is greater than Z-scan technique. However, previous methods cannot extract the dilute solute nonlinearities from solution well, the dual-arm PO Z-scan technique can greatly improve the measurement signal-to-noise ratio, and the dilute solute nonlinearities from solution can be measured accurately.

Key words nonlinear optics; phase object Z-scan; solute; nonlinear refractive index

OCIS codes 190.4400; 190.4410; 190.7110

1 引 言

随着激光技术的发展, 研究强光与物质相互作用过程的学科——非线性光学吸引了越来越多的研究者。非线性光学的发展与应用都离不开非线性光学材料的支持。为满足光子器件的要求, 新型非线性光学材料应具备大的光学非线性响应和短的响应时间等特性。其中, 有机材料由于其易于加工, 具有大的非线性系数的优点被认为具有很好的前景^[1]。

对于光学非线性材料, 需要用非常方便、灵敏、可靠的测量方法来进行筛选和研究, 从中找出理想的光学非线性材料或总结出光学非线性与材料组成、结构等方面的规律, 为制备更加理想的非线性材料提供可靠的理论依据^[2-4], 因此光学非线性测量技术的研究是非线性光学领域里一个非常活跃的方向。Z 扫描技术具有装置简单、灵敏度高优点, 并且能分别得到非线性极化率的实部和虚部及其符号, 为现在应用最广泛的材料非线性光学性质的研究方法, 后来在此基础上发展了多种改进的 Z 扫描技术^[5-13]。其中, 本课题组提

收稿日期: 2014-07-11; 收到修改稿日期: 2014-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(11304216)、江苏省自然科学基金(BK2012178)

作者简介: 石圣涛(1992—), 男, 本科, 主要从事光学非线性测量技术方面的研究。E-mail: 576787295@qq.com

导师简介: 杨俊义(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事材料光学非线性及光学非线性测量技术方面的研究。

E-mail: yjy2010@suda.edu.cn(通信联系人)

出的相位物体(PO)Z扫描(简称“相位Z扫描”)技术可区分溶液的三阶非线性折射和瞬态热致非线性,且可实现单脉冲测量,系统灵敏度也要比Z扫描技术高。

但是在测量有机染料稀溶液时,相位Z扫描技术遇到了困难。在测量稀溶液中溶质的非线性性质时,溶质的非线性折射性质无法得到准确的测量。通常,每个溶剂分子的非线性折射远小于每个溶质分子,但是由于溶剂分子的数目远大于溶质分子的数目,可能导致溶剂分子的非线性折射信号主导了整个信号。在溶质的非线性折射很小的情况下,非线性特性的巨大差异就会体现出来,因此相对与溶液的非线性折射,溶剂的非线性折射必须被减去。因此,当溶质的非线性折射与溶剂非线性折射相等或更小时,测量溶质的非线性特性就变得很困难。

本文对相位Z扫描技术进行了改进,在光路中并联一路相同的相位Z扫描光路,该光路保留了相位Z扫描技术的优点,如可区分热致光学非线性,灵敏度比传统Z扫描技术高1.4倍左右,同时该系统可以提高系统的测量信噪比,从而能从稀溶液中获得溶质的光学非线性。

2 实验理论

2.1 相位Z扫描技术

图1为PO Z扫描实验装置原理图。与传统Z扫描相比,PO Z扫描光路在聚焦透镜L的前焦平面上放置一个圆形相位物体。需要指出的是,相位物体可以放置在透镜前的任意位置。从光源发出的高斯激光束经过相位物体PO后被分束镜BS分成两束,一束直接进入探测器D1,用于监测入射激光的能量浮动;另一束被透镜L聚焦,通过样品后的光束传播至远场小孔处,探测器D2置于远场小孔后方,用来探测透过小孔的激光能量。

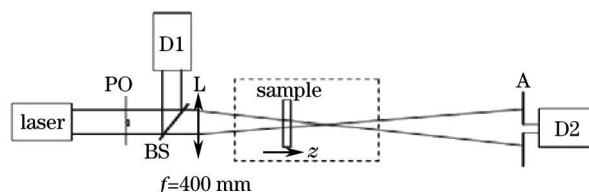


图1 相位Z扫描技术光路图

Fig.1 Experiment principle of PO Z-scan technique

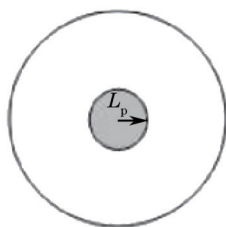


图2 相位物体示意图

Fig.2 Schematic diagram of PO

实验中使用的PO如图2所示,是通过在玻璃板上镀透明介质薄膜而形成的,它只改变透过光束的相位而不改变其振幅。圆形PO处于玻璃板中心处,半径为 L_p ,薄膜的厚度为 d_{po} ,折射率为 n_d ,这样就会对波长为 λ 的光波产生一个相位延迟 $\varphi_L = 2\pi(n_d - 1)d_{po}/\lambda$,其复振幅透射率描述为:当 $r \leq L_p$ 时, $t(r) = \exp(i\varphi_L)$,当 $r > L_p$ 时, $t(r) = 1$ 。

设初始入射激光是一线偏振高斯光束,束腰半径为 ω_e ,其横向光场分布可以写成

$$E(r, t) = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_e^2}\right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right), \quad (1)$$

式中 E_0 为轴上峰值场强, τ 为激光脉冲强度为峰值强度的1/e时的脉冲半宽。通过PO后的光电场为

$$E_{01}(r, t) = E(r, t)t(r). \quad (2)$$

经过相位物体后,光束逐次的衍射传播至远场的小孔处。光束在整个系统中的传播都是圆对称的,可利用菲涅耳-基尔霍夫远场圆孔衍射积分实现光束在各个光学元件之间的自由空间中传播。激光束到达透镜前表面的光电场分布可表示为

$$E_{02}(r_1, t) = \frac{2\pi}{i\lambda d} \exp\left(\frac{i\pi r_1^2}{\lambda d}\right) \int_0^{+\infty} E_{01} \exp\left(\frac{i\pi r^2}{\lambda d}\right) J_0\left(\frac{2\pi r r_1}{\lambda d}\right) r dr, \quad (3)$$

式中 r_1 是透镜前表面横向半径分布,传输距离 $d=f$, J_0 为第一类零阶贝塞尔函数。在傍轴近似下,透镜的透射率可表示为

$$t_1(r_1) = \exp(ikr_1^2/2f). \quad (4)$$

透镜后表面上的光场为

$$E_{03}(r_1, t) = E_{02}(r_1, t)t_1(r_1). \quad (5)$$

设样品到焦点的距离为 z ,则透镜后表面上的光场传播到样品前表面的距离 $d_1=f+z$,对透镜后表面的光场 $E_{03}(r_1, t)$ 进行衍射积分可求得到达样品前表面的光场分布为

$$E_{04}(r_2, z, t) = \frac{2\pi}{i\lambda d_1} \exp\left(\frac{i\pi r_2^2}{\lambda d_1}\right) \int_0^{+\infty} E_{03}(r_1, t) \exp\left(\frac{i\pi r_1^2}{\lambda d_1}\right) J_0\left(\frac{2\pi r_2 r_1}{\lambda d_1}\right) r_1 dr_1. \quad (6)$$

在慢变振幅近似和薄样品近似下,样品中光强 I 和相位的变化 $\Delta\varphi$ 可以用下面的一对耦合方程来描述:

$$\frac{dI}{dz'} = -\alpha(I)I, \quad (7)$$

$$\frac{d\Delta\varphi}{dz'} = \Delta n(I)k, \quad (8)$$

式中 z' 为光束在样品中的传播深度,吸收系数 $\alpha(I) = \alpha_0 + \beta I$ 包含了线性吸收系数 α_0 和非线性的项 βI , β 为非线性吸收系数,非线性折射率变化为 $\Delta n(I) = \gamma I$, γ 为非线性折射系数, I 为样品内的光强,在样品的表面有 $I = |E_{04}(r_2, z, t)|^2$ 。通过对上述方程的求解,可以得到样品后的光场 E_e 。

第3次传播过程是从样品出射面至远场小孔的表面,传播的距离 $d_2 = D - z$,其中 D 为小孔表面到焦点的距离,经过衍射积分变换可得到远场小孔表面处的光电场分布 E_a ,将小孔表面处的光强分布 I_a 对小孔面积和脉冲持续时间积分便可得到透过小孔的光束能量。将透过小孔的非线性能量归一化,得到小孔的透射率为

$$T(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{r_a} 2\pi r_a I_a(r_a, z, t) dr_a dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{r_a} 2\pi r_a I'_a(r_a, z, t) dr_a dt}, \quad (9)$$

式中 r_a 为小孔表面横向半径分布,大小为相位物体在远场衍射光斑的半径, $I'_a(r_a, z, t)$ 为小孔处的线性光强分布。对样品在每一位置 z 处重复上述积分就得到理论上的 PO Z 扫描透射率变化曲线。当 $r_a \rightarrow \infty$ 时,所测的曲线为样品的非线性吸收。

图3为纯三阶非线性折射下的 PO Z 扫描理论曲线。由图3可知 PO Z 扫描曲线明显不同于传统 Z 扫描的归一化透射率曲线,对于正的折射率系数,图形为一个单峰而不是先谷后峰的结构。对于负的非线性折射,图形只有一个单谷,而不是先峰后谷的形状。

2.2 双臂相位 Z 扫描技术

要测量溶液中溶质的非线性折射,可通过两次相位 Z 扫描来完成,一次测量溶液的光学非线性,一个测量溶剂的光学非线性。每个扫描曲线分别确定溶液的非线性折射系数 $n_{2,S}$ 和溶剂的非线性折射系数 $n_{2,V}$ 。然后将溶液的非线性折射减去溶剂的非线性折射得到溶质的非线性折射系数 $n_{2,U}$ 。由于利用不同的测量条件得到的数据有比较大的误差,因此在每次进行非线性的测量时都必须对溶剂进行测量,这样才可以减少

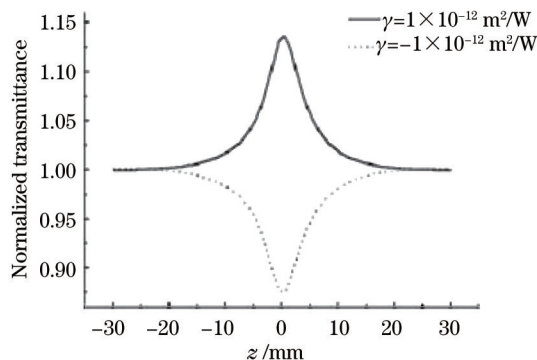


图 3 三阶非线性折射的相位 Z 扫描理论曲线

Fig.3 Theoretical curves of PO Z-scan technique for the third order nonlinear refraction

误差。相位 Z 扫描中一个重要的误差来源就是激光能量及光斑的浮动。在前后两个单独的相位 Z 扫描相减时,这种误差不能消除,因为在两个单独扫描中的误差是不相关的。但是,如果两个相位 Z 扫描(分别为溶剂和溶液)同时使用相同的 Z 扫描臂,大部分的误差(如能量波动、空间不稳定等)相关联,因此这种误差可以消除,只剩下不相关的误差(探测器噪声、气流等)。\$T_s(z)\$ 是溶剂 \$T_v(z)\$ 和溶质 \$T_u(z)\$ 的总和,在做 Z 扫描的同时进行第二臂的溶剂测量参考(即双臂相位 Z 扫描),这样做有助于进一步减少关联误差。双臂 Z 扫描的光路图如图 4 所示。输出光束首先被衰减片衰减(图中没有画出),光束经过第一个分束镜,分离出一部分作为参考光束。再经过第二个分束镜,分离出两束光,分别用来进行两臂的相位 Z 扫描。由于两臂的实验必须保证同时进行,将溶液和溶剂固定在一个平台上同时移动。

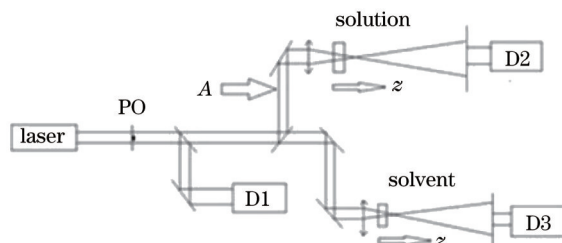


图 4 双臂相位 Z 扫描技术光路图

Fig.4 Schematic of the dual-arm PO Z-scan technique

为了确保溶剂产生的信号可以被消除,保持两个臂的平衡是十分重要的。这就要求两个光路的相位物体/脉冲宽度、光束束腰、脉冲能量、样品的相对位置、小孔孔径的线性透射率以及样品与各自孔径的距离都匹配。除了光强参数的匹配,每个臂的设备,如光电探测器、样品的厚度和相应的光学器件也进行匹配。

在进行测量时,首先获得两个臂的引起线性背景信号。在低能量下获得溶液的闭孔信号 \$T_{sl}(z)\$ 及溶剂的闭孔信号 \$T_{vl}(z)\$,将两个线性背景信号相减就可以获得系统的线性背景信号 \$L_b(z)\$。线性背景信号的产生是由于两臂之间的线性差异造成的,线性差异主要是由线性透射率在两个样品中分布不均匀造成的。线性背景可以通过使用一组高匹配的样品池来减小。

接着利用两臂同时测量溶液和溶剂的光学非线性信号 \$T_s(z)\$ 及 \$T_v(z)\$,将溶液信号减去溶剂信号,就可以获得一个包含溶质光学非线性的信号 \$N_b(z)\$,该信号还包含线性背景信号,将 \$N_b(z)\$ 减去线性背景信号 \$L_b(z)\$,就可以得到纯溶质引起的光学非线性信号。

为了确定双臂相位 Z 扫描更优于单臂相位 Z 扫描,从理论上比较了两者之间的信号误差。通常,所得到的信号中会有一些误差导致归一化透射率 \$\Delta T\$ 的浮动,从而引起非线性折射率 \$n_2\$ 的确定有一定的误差, \$\Delta n_2\$。在小信号中有

$$n_2 \pm \Delta n_2 \propto \Delta T \pm \delta. \tag{10}$$

在单臂相位 Z 扫描中,溶质的非线性折射为

$$n_{2,U} \pm \Delta n_{2,U} \propto (\Delta T_S - \Delta T_V) \pm \sqrt{\delta_S^2 + \delta_V^2}, \quad (11)$$

式中 $\Delta n_{2,U}$ 是测量 $n_{2,U}$ 时的拟合误差, δ_S 和 δ_V 是 ΔT_S 和 ΔT_V 的误差, ΔT_S 和 ΔT_V 分别是溶液和溶剂的透射率的峰谷变化。在双臂 Z 扫描中得到了一个相同的表述,除了一部分误差是相关的 (δ_C),另一部分是不相关的 ($\delta_{U_{nC}}$)。相关的误差被减去,只剩下不相关的误差:

$$n_{2,U} \pm \Delta n_{2,U} \propto (\Delta T_S - \Delta T_V) \pm \sqrt{\delta_{S,U_{nC}}^2 + \delta_{V,U_{nC}}^2}, \quad (12)$$

式中 $\delta_{S,U_{nC}}$ 和 $\delta_{V,U_{nC}}$ 分别是 δ_S 和 δ_V 的不相关误差。由于在单臂情况下所有的误差都是不相关的,在双臂情况下有一大部分误差是相关的,在双臂情况下的 $\Delta n_{2,U}$ 会变小。当 $\Delta T_S - \Delta T_V \leq \sqrt{\delta_S^2 + \delta_V^2}$ 时,双臂 Z 扫描的优点变得特别明显,而此时由于噪声大于信号,单臂相位 Z 扫描技术已不能得到光学非线性信号。

双臂相位 Z 扫描相对与普通的双臂 Z 扫描也具有一定的优越性。理论上讲双臂相位 Z 扫描技术测量数值和双臂 Z 扫描技术测量精度基本一致,然而利用相位 Z 扫描技术可以直接区分溶液的三阶非线性折射和瞬态热致非线性,这是普通双臂 Z 扫描技术不能实现的。另外由于双臂相位 Z 扫描技术的实验结果为单峰或单谷,因此可以在一个位置进行测量和数据处理就可以获得材料的非线性折射系数,要比普通 Z 扫描技术方便。

本实验技术中最重要的部分就是保证两臂的平衡,这样才能准确地消除相关误差,达到最高的灵敏度。两臂的平衡主要包括:1)必须保证两臂所使用的器材在规格上是一致的;2)光程在搭建光路时应注意,两臂的光程必须保证相等;3)光强由于实验中所使用的分束镜分光比为 7:3(R:T),为了使两路光的光强相等,在图 4 中 A 处加入了光强控制器。光强控制器由一块 1/2 波片和一块偏振片组成,1/2 波片处于偏振片之前。通过调节 1/2 波片,可以改变线偏振光的偏振方向,而不改变偏振光能量。偏振片的方向和另一路光路中光束的偏振方向相同,通过调节 1/2 波片的角度,根据马吕斯定律,可起到调节光强的作用。在搭建好光路后,可以先接上探头,将控制器调到最佳位置。在确定两臂已经完全平衡以后,就可以开始进行实验。具体实验步骤与普通相位 Z 扫描类似。

利用本实验装置测量了一种有机稀溶液的光学非线性,以验证本实验技术的有效性,实验中溶剂为 CS₂。实验中的所用光源为美国 Continuum 公司的调 Q 倍频纳秒 Nd:YAG 脉冲激光器,输出波长为 532 nm,脉冲宽度为 4 ns (半峰全宽),重复频率为 10 Hz,输出的激光光束在时间和空间上都近似为高斯分布。两个样品池的厚度都为 2 mm,且所用样品池为同一批次规格相同。透镜的焦距为 425 mm。PO 在 532 nm 的相位延迟为 $\varphi_L = 0.5\pi$,半径为 0.5 mm。小孔和焦平面的距离为 $D=1.7$ m,小孔的半径为 $r_s=2$ mm。在系统入射面的高斯光束的束腰半径为 2.9 mm,透镜聚焦后焦点的光斑束腰 $\omega_0 = 23$ μ m。实验所用的入射能量为 0.6 μ J。溶液的线性透射率为 88%。开孔吸收 PO Z 扫描实验结果发现该有机溶液的非线性吸收非常弱,可忽略不计,因此该有机溶液的光学非线性主要由非线性折射引起的。

首先,利用 1/2 波片和偏振片将光路两个臂的能量调节相等。利用 CS₂ 光学非线性调节远场的两个小孔的大小,使两个光路达到最佳平衡。并利用 CS₂ 的实验曲线,确定光路两臂的焦点位置,使其在同一个 z 位置。接着将溶液和溶剂同时放置在样品架上(两个样品架由同一个移动平台控制),先在低能量下进行实验,并将溶液的信号减去溶剂的信号以获得系统的线性背景信号 $L_b(z)$,然后在高能量下进行实验,在本实验中所用的能量为 0.6 μ J,峰值光强为 0.014 GW/cm²。将归一化后的溶液光学非线性信号 $T_s(z)$ 减去溶剂的光学非线性信号 $T_v(z)$,就可以得到含背景信号的溶质的光学非线性信号 $N_b(z)$ 。将 $N_b(z)$ 减去线性背景信号 $L_b(z)$,就可以得到纯溶质引起的光学非线性信号。具体实验结果如图 5 所示。

图 5(a)为低能量下,溶液以及溶剂的实验曲线图(Δ 为溶剂曲线, \circ 为溶液曲线);图 5(b)为图 5(a)基础上,溶液信号减去溶剂信号得到的曲线。由于在低能量下,物质的非线性效应比较弱,因此得到的只是背景的噪声,即线性系统背景信号 $L_b(z)$ 。

图 5(c)为高能量作用下,溶液以及溶剂的实验曲线图(Δ 为溶剂曲线, \circ 为溶液曲线);图 5(d)为图 5(c)基础上,溶液信号减去溶剂信号后所得的曲线,即溶质和系统背景信号之和 $N_b(z)$ 。从图 5(c)、(d)中可以看出,

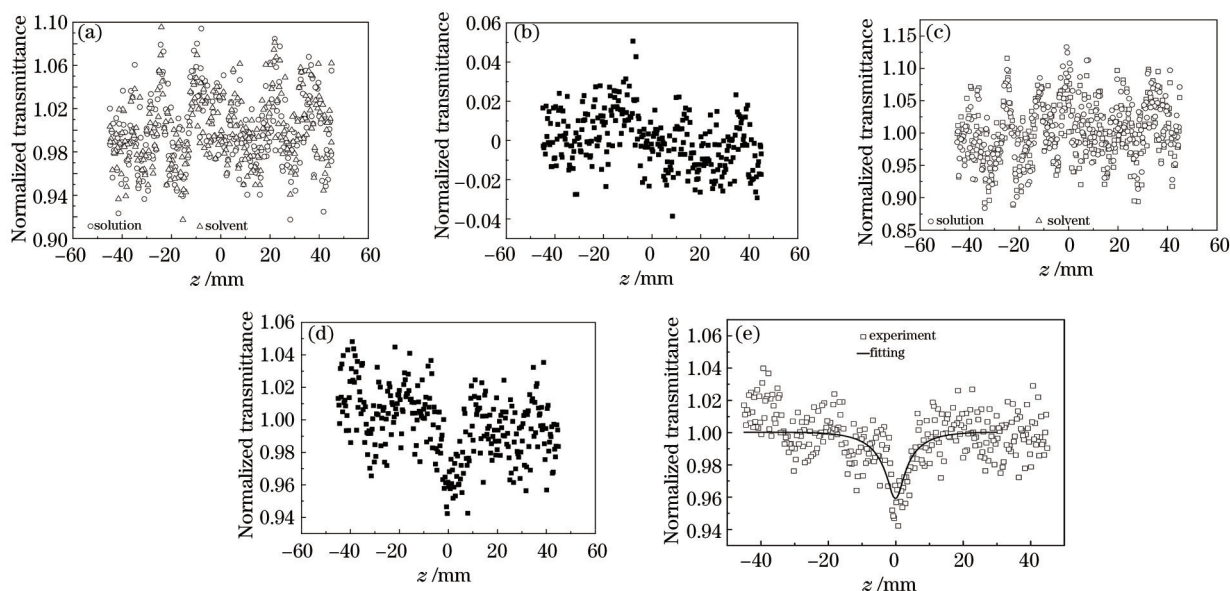


图5 有机稀溶液及CS₂双臂PO Z扫描实验结果及其理论拟合曲线。(a)低能量下溶液及溶剂的实验信号;(b)低能量下溶液与溶剂信号差;(c)高能量下溶液及溶剂的实验信号;(d)高能量下溶液与溶剂信号差;(e)溶质的非线性信号

Fig.5 Experimental and fitting curves of dual-arm PO Z-scan technique of organic dilute solution and CS₂.(a) Experimental signals of solution and solvent with low energy; (b) subtraction of solvent signal from solution signal with low energy; (c) experimental signals of solution and solvent with high energy; (d) subtraction of solvent signal from solution signal with high energy; (e) nonlinear signal of solute

虽然能量达到了测量非线性效应的要求,但是无论是溶剂还是溶液,都由于实验系统的噪声大于非线性信号的影响,观察不到理想的非线性信号。

图5(e)为溶质和系统背景信号之和 $N_b(z)$ 减去系统背景信号 $L_b(z)$ 后,得到的溶质的光学非线性曲线。图5(e)中可以看到清晰的溶质的非线性曲线[图5(e)中实线],这是由于在图5(a)得到图5(b),图5(c)得到图5(d)的曲线相减过程中,测量时的相关误差得到了消除,系统的噪声减小了。这正是双臂系统的最大优点。

图5(e)中实线为理论拟合曲线,利用(1)~(9)式可得到该溶质的非线性折射率为 $2.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ 。

3 结 论

对相位Z扫描技术进行了改进,提出了双臂相位Z扫描技术。与普通单臂Z扫描技术相比,该技术消除了测量所带来能量浮动,空间分布变化等因素所带来的误差,提高了测量系统的信噪比,并利用实验验证了该技术。结果表明该技术可以用来测量稀溶液中溶质的光学非线性。

参 考 文 献

- 1 Sun Yuling, Wang Xin, Liu Jie, *et al.*. Research progress in nonlinear optical material [J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2011, 19(5): 51-54.
孙玉玲,王 新,刘 杰,等. 非线性光学材料研究现状与应用前景 [J]. 化工科技, 2011, 19(5): 51-54.
- 2 Tian Jing, Su Hong, Wang Chundong, *et al.*. Third-order nonlinear optical properties of Zn nanoparticles composites [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s219001.
田 静,苏 红,王纯栋,等. 锌纳米颗粒复合材料的三阶非线性光学特性研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s219001.
- 3 He Zhicong, Li Fang. Optical properties of third-order nonlinearities of CdSeS quantum dots/polystyrene composite film [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1007001.
何志聪,李 芳. CdSeS量子点/聚苯乙烯薄膜的三阶非线性光学特性[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1007001.
- 4 Zhao Xin, Yan Xiaoqing, Ma Qiang, *et al.*. Optical nonlinearities of reduced graphene oxide [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0719001.
赵 欣,鄢小卿,马 强,等. 还原氧化石墨烯光学非线性[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0719001.

- 5 M Sheik-Bahae, A A Said, T H Wei, *et al.*. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam [J]. IEEE J Quantum Electron, 1990, 26(4): 760-769.
- 6 T Xia, D J Hagan, M Sheik-Bahae, *et al.*. Eclipsing Z-scan measurement of $\lambda/10^4$ wave-front distortion [J]. Opt Lett, 1994, 19(5): 317-319.
- 7 W Zhao, P Palffy-Muhoray. Z-scan technique using top-hat beams [J]. Appl Phys Lett, 1993, 63(12): 1613-1615.
- 8 Steve Hughes, Josef M Burzler. Theory of Z-scan measurements using Gaussian-Bessel beams [J]. Phys Rev A, 1997, 56(2): R1103-R1106.
- 9 R L Sutherland. Effects of multiple internal sample reflections on nonlinear refractive Z-scan measurements [J]. Appl Opt, 1994, 33(24): 5567-5584.
- 10 M Sheik-Bahae, J Wang, R DeSalvo, *et al.*. Measurement of nondegenerate nonlinearities using a two-color Z-scan [J]. Opt Lett, 1992, 17(4): 258-260.
- 11 H Ma, Cid B de Araujo. Two-color Z-scan technique with enhanced sensitivity [J]. Appl Phys Lett, 1995, 66(13): 1581-1583.
- 12 Mihaela Balu, Joel Hales, David J Hagan, *et al.*. White-light continuum Z-scan technique for nonlinear materials characterization [J]. Opt Express, 2004, 12(16): 3820-3826.
- 13 Junyi Yang, Yinglin Song. Direct observation of the transient thermal-lensing effect using the phase-object Z-scan technique [J]. Opt Lett, 2009, 34(2): 157-159

栏目编辑: 史 敏