

近 top-hat 光束 Z 扫描理论分析*

杨新江 臧维平 田建国[†] 刘智波 周文远 张春平 张光寅

(南开大学物理科学学院光子学中心, 天津 300071)

(2004 年 3 月 4 日收到)

利用快速 Hankel 变换的方法,对薄介质的 Z 扫描进行了理论分析.讨论了近 top-hat 光束 Z 扫描曲线的特征,分析了闭孔近 top-hat 光束下限制光阑半径与光束扩束半径之比(光阑束腰比)对归一化透射率的影响,通过理论分析,给出了获得最佳测量灵敏度的光阑束腰比值.在最佳灵敏度的实验配置下分析了远场光阑的大小对归一化透射率的影响.

关键词:高精度快速 Hankel 变换,近 top-hat 光束, Gaussian 光束, Z 扫描

PACC: 4265, 4265J, 0260

1. 引言

自从 Sheik-Bahae 等人提出了测量材料非线性的 Z 扫描方法^[1],这种方法就被广泛地应用于材料的非线性系数的测量^[2,3]中.通常实验中,人们采用高斯光束,对于小的非线性相移,可以通过对归一化透射率曲线的分析来得到非线性系数的大小和符号^[1].高斯光束是理想情况下的激光基模输出,在很多情况下,例如,一些染料激光器和半导体激光器输出的激光往往不是高斯光束.为了解决这个问题,Zhao 等人提出了 top-hat 光束下的 Z-scan 方法^[4,5],在理论处理上他们采用了一个理想的 top-hat 光束,即限制光阑前的光束为一平面波,理论和实验结果证明,测量灵敏度提高了 2.5 倍.但是对于实际的光束情况,我们往往只能得到一种近 top-hat 光束,即限制光阑处的电场分布和径向有关,我们详细讨论了近 top-hat 光束下限制光阑、扩束半径、远场探测光阑的大小对归一化透射率的影响.本文对近 top-hat 光束下的 Z 扫描进行了理论分析,在近 top-hat 光束的概念下,Gaussian 光束只是近 top-hat 光束的一种特殊情况,即限制光阑的半径为无限大时的近 top-hat 光束.

在理论分析上,我们采用由文献 6 给出的高精

度快速 Hankel 变换方法(FHATHA)来处理光束的传播,对近 top-hat 光束和 Gaussian 光束下的 Z 扫描进行了理论分析,得到了近 top-hat 光束下不同光阑束腰比时的归一化透射率曲线,从而获得到了最佳灵敏度时的实验配置,并讨论了在最佳配置下远场光阑大小对归一化透射率的影响.

2. Z 扫描理论模型

对于具有三阶光学非线性的介质,折射率 n 由下式给出:

$$n = n_0 + \gamma I, \quad (1)$$

式中 n_0 为线性折射率, γ 为非线性折射系数, I 为介质中的光强.假定一个 TEM₀₀ 高斯光束,束腰半径为 w_0 ,沿 +Z 方向传播,电场 E 由下式给出:

$$E(r, z, t) = E_0(t) \frac{w_0}{u(z)} \times \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)} - \frac{i\pi r^2}{\lambda R(z)}\right) e^{-i\phi(z,t)} \quad (2)$$

式中 $u(z) = w_0(1 + z^2/z_0^2)^{1/2}$, w_0 为光束束腰半径, $z_0 = kw_0^2/2$ 为瑞利长度, $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢, λ 为光波波长, $E_0(t)$ 表示包含时间的脉冲电场包络, r 为径向坐标, $e^{-i\phi(z,t)}$ 包含了径向无关的相位改变.

通常情况下激光器输出的是高斯光束(TEM₀₀),

* 国家自然科学基金(批准号:60025512),教育部科学技术研究重点(重大)项目(批准号:00026),高等学校骨干教师资助计划项目,霍英东教育基金资助的课题(批准号:71008).

[†] 通讯联系人, E-mail: jitian@nankai.edu.cn

由于它具有非常好的空间分布,因此广泛地应用于 Z 扫描的实验和理论分析.近 top-hat 光束是把激光光束经扩束镜扩束后,通过小孔限制光阑,再由透镜聚焦后得到的光束,相对 Gaussian 光束能显著提高测量灵敏度.限制光阑孔径相对于扩束半径很小,小到这部分区域内的电场强度接近均匀分布.实验原理见图 1,图中透镜焦距为 f , a 为限制光阑半径, a_0 为远场探测光阑半径,焦点 o 定义为 Z 轴原点, z 为样品在 Z 轴上的坐标, $w_0 = \lambda f(2a)$ 为聚焦后光束的束腰半径, d 为远场光阑到焦点的距离.

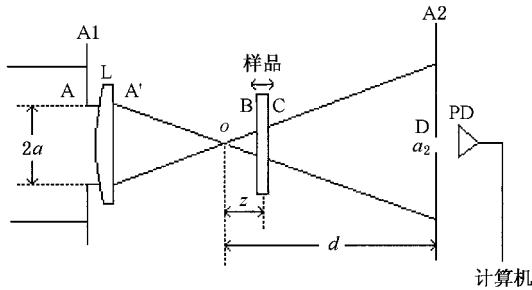


图 1 近 top-hat 光束下的 Z 扫描实验原理图. A1, A2 光阑, L 焦距为 f 的透镜, PD 探测器

我们假设扩束后光束仍为高斯分布,电场强度并非真正地均匀分布.由扩束后的光束束腰半径 w_1 可得到小孔限制光阑处的电场分布 $E_A(r, z, t)$,经过透镜后的电场 $E'_A(r, z, t)$ 为^[7]:

$$E'_A(r, z, t) = E_A(r, z, t) \exp\left(-\frac{i\pi r^2}{\lambda f}\right), \quad (3a)$$

$$E_A(r, z, t) = E(r, z, t)A(r, z),$$

$$A(r, z) = \begin{cases} 1 & r \leq a \\ 0 & r > a \end{cases}, \quad (3b)$$

光束从透镜传播到样品前表面,传播距离为 $(f + z)$, z 为样品在 Z 轴上的坐标,这一传播过程为 Hankel 变换,利用高精度快速 Hankel 变换方法^[6],可得到样品前表面处的电场分布 $E_B(r, z, t)$,光束经过样品,样品出表面的电场分布 $E_C(r, z, t)$ 由下式给出^[1]:

$$E_C(r, z, t) = E_B(r, z, t) e^{-\alpha L/2} e^{-i\Delta\varphi(r, z, t)}, \quad (4)$$

上式中 $\Delta\varphi(r, z, t)$ 为通过非线性介质后的非线性相移,其表达式为

$$\Delta\varphi(r, z, t) = k\gamma |E_B(r, z, t)|^2 L_{\text{eff}}, \quad (5)$$

式中 γ 为非线性折射系数, $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$ 为样品有效厚度.

最后光束从样品出表面传播到远场光阑 D,这

一过程可同样利用高精度快速 Hankel 变换方法得到远场光阑表面的电场分布 $E_D(r, z, t)$,再通过多项式拟合得到光阑中心($r = 0$)处的电场,从而得到远场的归一化透射率.

3. 结果和分析

图 2 给出了近 top-hat 光束下的不同光阑束腰比 a/w_1 的 Z 扫描曲线,并与同相移 Gaussian 光束下的 Z 扫描曲线作比较.我们取焦点处的非线性相移均为 1,透镜焦距为 140 mm.从图中可以看出,当光阑束腰比 $a/w_1 = 0.05$ 时,峰谷差约为高斯光束时的 2.74 倍,随着 a/w_1 的增大峰谷差逐渐减小;当 $a/w_1 = 1.55$ 时,近 top-hat 光束的 Z 扫描结果已经和 Gaussian 光束的结果非常相近了.

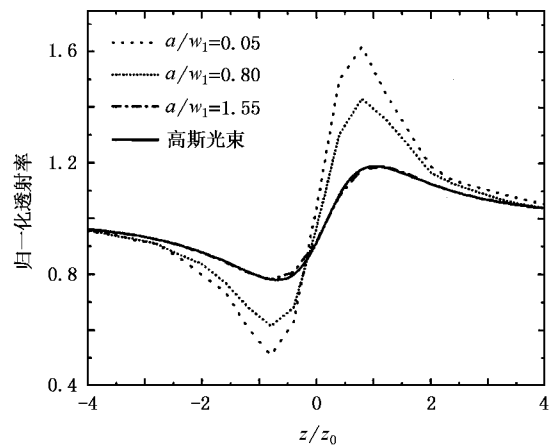


图 2 非线性相移为 1 时,近 top-hat 光束下不同光阑束腰比 (a/w_1) 的归一化透射率与 Gaussian 光束下的透射率的比较

图 3 更直观地给出了不同扩束半径下的近 top-hat 光束到 Gaussian 光束的变化过程.图中横轴为光阑束腰比 a/w_1 ,近 top-hat 光束下的峰谷差与 Gaussian 光束下峰谷差之比作为纵轴.从图中也可以看出,在其他条件不变的情况下,当 $a/w_1 > 0.05$,归一化透射率与限制光阑、扩束半径的大小无关,而与光阑束腰比 a/w_1 有关.另外由于衍射和实验中实际操作的限制, a 的值不能取的太小,因此为保证 a/w_1 的比值,必须把光束扩的足够大.所以合理的选取限制光阑的大小,并且当取 a/w_1 为 0.05 时可取得最佳的灵敏度.

通过以上分析,我们得到了最佳灵敏度时的实验配置,下面我们在最佳配置条件下,分析远场探测

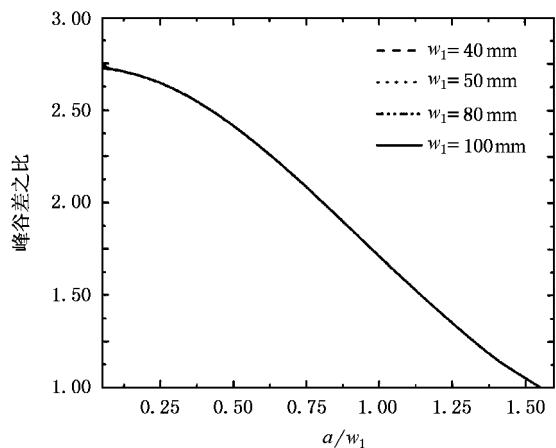


图3 非线性相移为 1 时,近 top-hat 光束下不同光阑束腰比 a/w_1 的峰谷差与 Gaussian 光束下的峰谷差之比

光阑半径 a_2 对归一化透射率的影响. a_2 以 $a_0 = w_0 d/z_0$ 为基本单位,其中 d 为远场光阑到焦点的距离, w_0 为焦点处的束腰半径, z_0 为共焦参数.图 4 给出了不同 a_2/a_0 下的 Z 扫描曲线,并与闭孔时作比较.从图中可看出,当 $a_2/a_0 = 0.1$ 时,曲线近似与闭孔时一致,此时峰谷差最大,随着比值的增大,峰谷

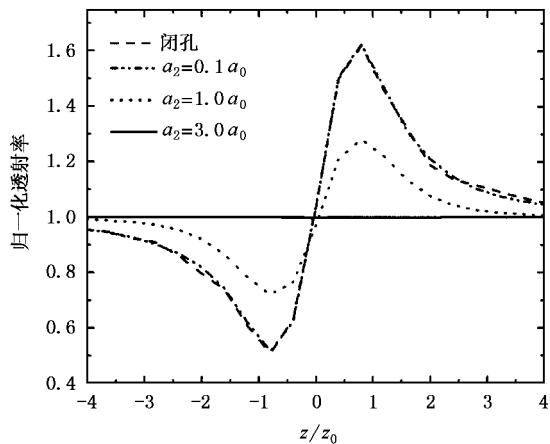


图4 非线性相移为 1 时,近 top-hat 光束下不同远场光阑半径的透射率与闭孔时透射率的比较

差逐渐减小;当 $a_2/a_0 = 3.0$ 时,曲线近似为一条直线,峰谷差为 0,因为此时探测光阑半径较大,光束直接传播与通过样品后传播,探测光阑接收到的光强是一样的.

图 5 更直观地给出了由闭孔到开孔的变化过程,图中横轴为 a_2/a_0 ,纵轴为峰谷差.因此在实验当中,远场探测光阑的半径尽量要小,这样才能获得最高的灵敏度.

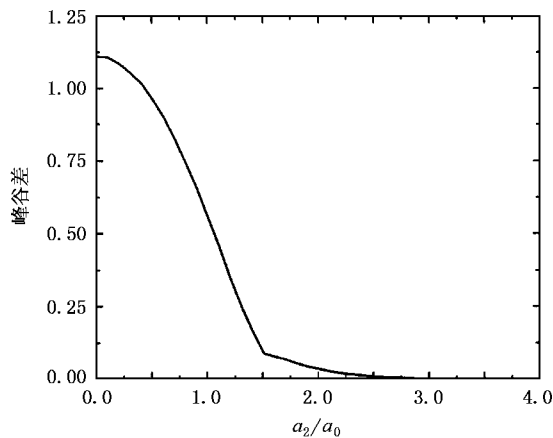


图5 非线性相移为 1 时,近 top-hat 光束下不同远场光阑半径的峰谷差

4. 结 论

高精度快速 Hankel 变换方法^[8]是薄样品 Z 扫描理论分析中一种计算效率很高的分析方法,它解决了对于圆对称情况下,常规 Hankel 变换效率低下的弊端.对于小的和大的非线性相移都适用,而且也适用于轴对称的非 Gaussian 光束.近 top-hat 光束下的 Z 扫描可获得比 Gaussian 光束更高的灵敏度,而且实验当中也容易实现.通过合理地配置限制光阑的大小、光阑束腰比和远场探测光阑的大小,可获得最高的灵敏度.

[1] Sheik-Bahae M et al 1990 *IEEE . J. Quantum Electron.* **26** 760
 [2] Zhou W Y et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 620 (in Chinese) [周文远等 2004 物理学报 **53** 620]
 [3] Chen Y et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **51** 578 (in Chinese) [陈煜等 2002 物理学报 **51** 578]
 [4] Zhao W et al 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 1613

[5] Zhao W et al 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 673
 [6] Vittorio Magni et al 1992 *J. Opt. Soc. Am. A* **9** 2031
 [7] Weaver H J 1983 *Applications of Discrete and Continuous Fourier Analysis* (New York : Wiley) p216
 [8] Zang W P et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1820 (in Chinese) [臧维平等 2004 物理学报 **53** 1820]

Z scan analysis for near top-hat beams^{*}

Yang Xin-Jiang Zang Wei-Ping Tian Jian-Guo[†] Liu Zhi-Bo

Zhou Wen-Yuan Zhang Chun-Ping Zhang Guang-Yin

(*Photonics Center, College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

(Received 4 March 2004)

Abstract

The Z scan theory of thin optically nonlinear medium, by using the fast Hankel transform is analyzed. The characteristics of Z scan curves under near top-hat beams are discussed. Meanwhile, the influence of the ratio (diaphragm-girdling ratio) of the limiting diaphragm radius to the radius of expanded beams on normalized transmittance using near top-hat beams under closed-aperture is analyzed. Through theoretical analysis, the ratio with the best sensitivity is given. Finally, the influence of the size of the far-field diaphragm on normalized transmittance under the experimental configuration with the best sensitivity is analyzed.

Keywords : high-accuracy fast Hankel transform, near top-hat beams, gaussian beams, Z scan

PACC : 4265, 4265J, 0260

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60025512), the Key Program of Chinese Ministry of Education (Grant No. 00026), the Foundation for University Key Teachers by the Ministry of Education, and the Fok Ying-Tong Education Foundation (Grant No. 71008).

[†] Corresponding author. E-mail : jjtian@nankai.edu.cn