

文章编号:1004-4213(2011)09-1333-5

Z-扫描参量对薄膜材料三阶非线性光学特性的影响

甘平^{a,b}, 卿胜兰^a, 鲜晓东^c

(重庆大学 a. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室; b. 通信工程学院; c. 自动化学院, 重庆 400044)

摘 要:采用数值计算方法对薄膜材料的 Z-扫描参量进行研究. 对不同激光脉宽下 Z-扫描的三阶非线性折射系数和吸收系数进行分析, 结果显示不同等级的脉宽激光器对计算结果的数量级影响很大. 对不同小孔光阑半径的 Z-扫描闭孔曲线进行仿真, 结果显示光阑小孔越小, 获得特征曲线的峰谷值越明显. 对不同光阑离透镜焦点的距离值进行 Z-扫描闭孔曲线仿真, 结果显示距离为 1/2 透镜焦距值时闭孔 Z-扫描曲线能得到相对较大的峰谷差值. 数值分析结果与相关文献报道的实验结果基本一致.

关键词:Z-扫描; 薄膜材料; 三阶光学非线性; 激光脉宽

中图分类号:O437; TN247

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114009.1333

0 引言

20 世纪 90 年代初, 美国 Sheik-Bahae 等人通过对非线性效应的大量研究, 提出了单光束激光 Z-扫描技术^[1]. 该方法是利用紧聚焦的单高斯光束来研究材料的三阶非线性光学特性, 具有实验装置简单、灵敏度高等优点. 与简并四波混频、非线性干涉法等其他非线性测量方法相比, 不仅可以测得非线性折射率和非线性吸收系数的大小, 而且可直接从特征曲线上确定二者的符号, 通过对 Z-扫描特征曲线计算和分析得到材料的三阶非线性光学极化系数^[2]. 但由于 Z-扫描测量会受到实验环境、实验设备、光路参量等因素的影响, 从而会导致测量数据差异较大, 进而影响三阶非线性光学极化系数的计算. 因此人们一直在研究不同参量条件对测量计算结果的影响, 如陈树琪^[3]等人对大非线性相移下的 Z-扫描特性进行了相关研究, 杜艳秋^[4]等人研究光束调制对 Z-扫描技术灵敏度的影响, 刘辉^[5]等人对高功率激光束在非线形材料焦点位置的变化进行研究, 季小玲^[6]等人研究高功率激光中的热效应对光束的远场特性的影响等. 但是采用数值分析方法从激光脉宽等参量角度对三阶非线性光学特性的测量计算研究关注不多, 本文正是从此出发, 以薄膜材料为对象对入射光束脉宽、小孔光阑半径、光阑离透镜焦点的距离等 Z-扫描参量进行研究, 分析这些参量对三阶非线性光学特性计算的影响因素, 并给出 Z-扫描参量

调整方法.

1 Z-扫描实验

Z-扫描主要是采用将空间相位调制信息反应到振幅上的原理^[7]. 样品通常从 $-z$ 到 $+z$ 方向逐点移动, 材料经过透镜焦点时发生非线性作用, 引起光束的会聚或发散, 进而导致小孔后光强变化. 对光强进行数值处理后得到归一化透过率, 然后将归一化透过率与样品位置 z 一一对应, 把对应关系绘制成曲线即为 Z-扫描特征曲线. 通过 Z-扫描特征曲线可以确定材料是否具有非线性特性, 如非线性折射和非线性吸收, 并经过数值计算确定材料的三阶非线性折射系数和三阶非线性吸收系数, 最后计算出材料的三阶非线性极化系数.

图 1 为顶帽光束 Z-扫描原理图^[8], 顶帽光束 Z-扫描与单高斯光束 Z-扫描实验装置基本相同, 改进处主要在会聚透镜前添加一个光阑, 用来提取扩束后扩展光束的中心部分, 以得到尽可能均匀的照明, 其测量灵敏度是标准 Z-扫描的 2.5 倍. 图 1 中 D_1 和 D_2 为能量探头, BS_1 为分束镜, L 为聚焦镜, A_1 和 A_2 为小孔光阑, S 为被测薄膜样品. 脉冲激光器输出高斯激光光束, 首先经过光阑 A_1 , 用于调节光束光斑大小和扩展光束的中心部分, 然后由分束镜 BS_1 后分成两束光, 一束由 D_1 接收, 用于确定激光功率, 另一束进入聚焦镜 L 会聚后传播至远场光阑 A_2 , 这部分光束被能量探头 D_2 接收. 聚焦镜 L 的焦

基金项目:重庆市科委科技计划项目院士专项(No. 2008BC4003)资助

第一作者:甘平(1974-),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为非线性光学和薄膜材料. Email:gp@cqu.edu.cn

收稿日期:2011-03-30;修回日期:2011-06-03

点为 $z=0$ 处, d 表示透镜焦点 $z=0$ 处到小孔光阑 A_2 的距离. 测量样品的闭孔数据时, 调节光阑 A_2 的小孔直径到设定值, 被测样品 S 置于焦点附近, 定义 D_2/D_1 为归一化透过率, 当样品 S 沿 z 轴相对于焦点移动时, 介质的非线性作用将引起光束的发散或会聚, 从而使透过小孔光阑 A_2 的光能量变化, 通过测量归一化透过率 D_2/D_1 与样品移动位置 z 的变化关系, 就可以得到 Z -扫描闭孔曲线, 并经过数值分析得到薄膜的三阶非线性折射率. 测量样品的开孔数据时, 将光阑 A_2 小孔完全打开或移走, 通过测量归一化透过率 D_2/D_1 与样品移动位置 z 的变化关系, 就可以得到 Z -扫描开孔曲线, 并经过数值计算得到薄膜的三阶非线性吸收系数.

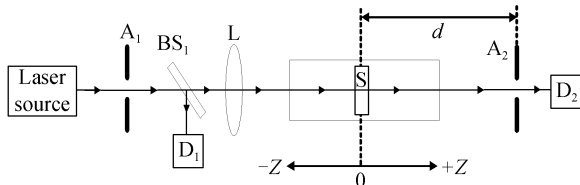


图1 顶帽光束 Z -扫描原理

Fig. 1 Top-hat Z -scan experimental equipment

2 讨论分析

一般来说, 任何阶的非线性光学效应都应考虑在内, 但为了简便, 这里仅考虑三阶非线性光学效应. 入射光为单模 (TEM_{00}) 高斯光束通过介质沿 $-z$ 到 $+z$ 方向传播, 通过小孔 A_2 的透过率经过归一化后表示为^[8]

$$T(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P_i(\Delta\varphi_0(t)) dt}{S \int_{-\infty}^{\infty} P_i(t) dt} \quad (1)$$

式(1)中 $P_i(t)$ 为瞬时输入功率, S 为小孔的线性透射率, $P_i(\Delta\varphi_0(t))$ 是复合光场对小孔半径进行积分得到的透射功率. 下面将基于式(1)对图1中激光器脉宽、光阑 A_2 的小孔半径、透镜焦点处 $z=0$ 到光阑 A_2 距离值 d 分别采用数值计算方法进行研究.

2.1 激光脉宽

Z -扫描测量中脉冲激光器的脉宽大小不仅关系到光致折射率变化的物理机制, 而且直接影响三阶光学非线性极化系数的计算结果. 利用近轴光场近似, 小孔的线性透射率 S 小于1的情况下对式(1)进行积分, 可以得到闭孔归一化透过率峰谷值之差 ΔT_{p-v} 与非线性相移 $\Delta\varphi_0$ 的关系表达式^[8]为

$$\Delta T_{p-v} = T_p - T_v \approx 0.406 \times (1-S)^{0.25} \times |\Delta\varphi_0| \quad (2)$$

式(2)中 T_p 、 T_v 分别表示 Z -扫描特征曲线中归一化透过率的最大值和最小值, $\Delta\varphi_0(t)$ 为波面在轴上焦点处的相位变化, 其表达式^[9]为

$$\Delta\varphi_0(t) = (2\pi/\lambda)\gamma I_0(t)L_{\text{eff}}$$

式中 λ 为激光波长, γ 为三阶非线性折射系数, L_{eff} 为薄膜的有效厚度, I_0 是焦点处光强, 其表达式为

$$I_0 = \frac{E_0}{\pi\omega_0^2\tau} \quad (3)$$

式(3)中 E_0 表示焦点处的脉冲能量, τ 表示激光脉宽, ω_0 表示光束束腰半径. 由式(2)和(3)可以得到三阶非线性折射系数 γ 与脉宽 τ 的直接关系式^[1]为

$$|\gamma| = \frac{\Delta T_{p-v}\lambda\omega_0^2\tau}{0.406(1-S)^{0.25}2L_{\text{eff}}E_0} \quad (4)$$

针对薄膜材料进行 Z -扫描时 S 是小孔的线性透射率, 由 Z -扫描光路决定 S 的数值范围为 $0.05 \sim 1$; L_{eff} 是薄膜的有效厚度, 由被测薄膜材料的物理性质决定, 通常量值范围为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ cm; λ 是入射光波长, 由激光器确定; ΔT_{p-v} 是闭孔归一化透过率峰谷值之差, 通常量值范围为 $0.1 \sim 2$; 作用与薄膜材料的入射光强 E_0 通常为几十 μJ . 由上述可设置分析条件为 $S=0.1$, $\Delta T_{p-v}=1$, $\lambda=1064$ nm, $L_{\text{eff}}=10^{-5}$ cm, $E_0=10$ μJ , $\omega_0=20$ μm . 对式(4)进行数值分析后可得到三阶非线性折射系数 γ 与脉宽 τ 的仿真曲线, 如图2. 图中横坐标表示脉宽 τ 时间点, 坐标间距分布采用10为底的对数间隔, 在 $1 \sim 1000$ fs范围内设仿真步长为1 fs, 在 $1 \sim 1000$ ps范围设仿真步长为1 ps, 在 $1 \sim 100$ ns范围设仿真步长为1 ns. 纵坐标表示三阶非线性折射系数, 坐标间距分布采用10为底的对数间隔, 范围为 10^{-16} 到 10^{-6} cm^2/W .

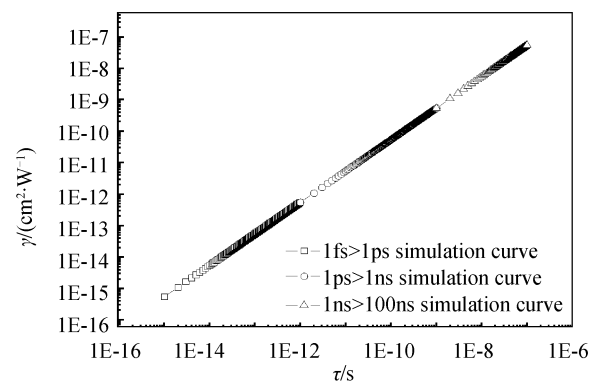


图2 三阶非线性折射系数与脉宽的仿真曲线

Fig. 2 Simulation curve of the third-order nonlinear refractive index and pulse width

许多非线性薄膜材料通常具有非线性吸收特性, 在 Z -扫描实验中移走远场处的小孔光阑, 即开孔 $S=1$, 通过图1中能量探头 D_2 测得薄膜的非线性吸收曲线, 并利用实验曲线和计算公式得到三阶非线性吸收系数 β 的大小^[10]. 对式(1)中取 $S=1$ 可求出开孔情况下的归一化透过率为

$$T(z, S=1) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[-q_0(z, 0)]^m}{(m+1)^{3/2}} \quad (5)$$

式中 $q_0(z, t) = \beta I_0(t) L_{\text{eff}} / (1 + z^2/z_0^2)$, β 为三阶非线性吸收系数, z_0 为瑞利长度. 利用式(5)对开孔 ($S=1$) 时测得的 Z-扫描数据进行数值拟合, 就可得到三阶非线性吸收系数 β 的大小. 取 $m=1$, 可对式(5)和式(3)数学变换后得到 β 与脉宽 τ 直接计算表达式为

$$|\beta| = \frac{(1 - T(z, S=1))^{2^{3/2}} (1 + (z/z_0)^2) \pi \omega_0^2 \tau}{E_0 L_{\text{eff}}} \quad (6)$$

由式(6)进行数值分析后得到三阶非线性吸收系数 β 与脉宽 τ 的仿真曲线, 如图 3. 仿真条件设为 $T(z, S=1) = 0.5$, $z=0$, $z_0=12 \text{ mm}$, $L_{\text{eff}}=10^{-5} \text{ cm}$, $E_0=10 \text{ } \mu\text{J}$, $\omega_0=20 \text{ } \mu\text{m}$. 图中横坐标表示脉宽 τ 时间点, 坐标间距分布采用 10 为底的对数间隔, 在 $1 \sim 1000 \text{ fs}$ 范围设 1 fs 为仿真步长, 在 $1 \sim 1000 \text{ ps}$ 范围设 1 ps 为仿真步长, 在 $1 \sim 100 \text{ ns}$ 范围设 1 ns 为仿真步长, 纵坐标表示三阶非线性吸收系数, 坐标间距分布采用 10 为底的对数间隔, 范围为 10^{-11} 到 10^{-3} cm/W .

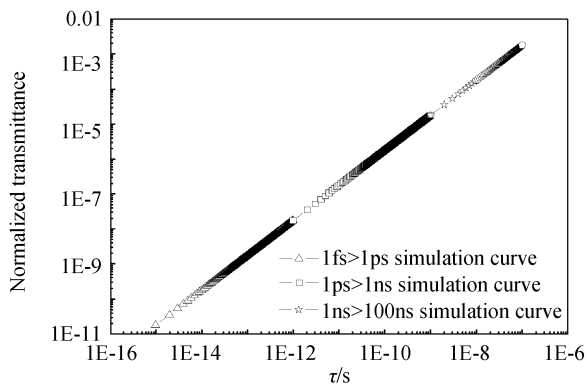


图 3 三阶非线性吸收系数与脉宽的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve of the third-order nonlinear absorption coefficient and pulse width

表 1 是根据图 2 和图 3 的仿真分析得到脉宽 τ 在不同情况下三阶非线性折射系数 γ 和吸收系数 β 的数量级范围. 对同一种被测薄膜材料, 采用不同脉宽的激光器进行 Z-扫描测量薄膜的 γ 和 β , 其计算得到的数值是不一样的, 主要是计算值的数量级不一样, 脉宽为飞秒时所计算得到的 γ 和 β 的数量级比皮秒情况下要小 $10^{-3} - 10^{-2}$, 脉宽为皮秒和纳秒时所计算的 γ 和 β 同样存在 $10^{-3} - 10^{-2}$ 数量级差异, 因此采用不同等级的脉宽激光器对 γ 和 β 的计算数值影响较大.

表 1 不同脉宽下的 γ 和 β 的数量级范围

Table 1 The range of magnitude of γ and β with pulse width

| τ | $1 \sim 1000 \text{ fs}$ | $1 \sim 1000 \text{ ps}$ | $1 \sim 100 \text{ ns}$ |
|--|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| $\gamma / (\text{cm}^2 \cdot \text{W}^{-1})$ | $10^{-14} - 10^{-12}$ | $10^{-12} - 10^{-10}$ | $10^{-10} - 10^{-7}$ |
| $\beta / (\text{cm} \cdot \text{W}^{-1})$ | $10^{10} - 10^{-8}$ | $10^{-8} - 10^{-6}$ | $10^{-6} - 10^{-3}$ |

参考相关文献报道以验证仿真结果, 孙建平^[11]

用纳秒激光器 (10ns) Z-扫描方法测量 PMOCOPV 的三阶非线性折射系数 $\gamma = 9.63 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{W}$, 三阶非线性吸收系数 $\beta = 1.27 \times 10^{-5} \text{ cm/W}$; 吕蓬^[12]等人用皮秒激光器 (25 ps) Z-扫描方法测量纳米硅镶嵌氮化硅薄膜的三阶非线性折射系数 $\gamma = 2.65 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{W}$, 三阶非线性吸收系数 $\beta = 1.65 \times 10^{-6} \text{ cm/W}$; 陈爱平^[13]等人用飞秒激光器 (50fs) Z-扫描方法测量 CuO 薄膜的三阶非线性折射系数 $\gamma = -3.96 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{W}$, 三阶非线性吸收系数 $\beta = -1.69 \times 10^{-8} \text{ cm/W}$, 范鑫焯^[14]等人用飞秒激光器 (250fs) Z-扫描方法对 $\text{GeS}_2\text{-Ga}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3\text{-AgCl}$ 玻璃的三阶非线性光学特性的研究, 可以看出激光器脉宽对薄膜材料三阶非线性折射系数和吸收系数的计算值数量级分析结果与文献报道的实验数据结果基本一致. 由此说明激光脉宽是影响薄膜材料三阶非线性光学特性的重要因素, 直接影响计算结果和测量准确度, 选用不同脉宽等级的激光器进行 Z-扫描, 其薄膜材料的 γ 和 β 计算值数量级可以参考表 1 的分析结果.

2.2 光阑小孔半径

图 1 中光阑 A_2 的小孔半径与薄膜材料的三阶非线性折射系数紧密相关, 小孔的大小直接影响 Z-扫描的灵敏度, 根据 Z-扫描理论公式 (1) 和 Herman、Wilson 等人^[15] 推导的透过率公式得出小孔线性透过率 S 与闭孔归一化透过率 T 的关系式为

$$T(z, S) = 1 + \frac{(1-S)^{\frac{2(x^2+3)}{(x^2+9)}}}{S(x^2+1)} \times \sin\left(\frac{4x \ln(1-S)}{x^2+9}\right) \times \Delta\varphi_0 \quad (7)$$

式(7)仅考虑非线性折射效应而忽略小孔非线性吸收效应, 其中 $x = z/z_0$, $S = 1 - \exp(-2r_a^2/\omega_a^2)$ 是小孔的线性透射率, ω_a 为屏上光斑半径, r_a 为小孔半径, $\Delta\varphi_0$ 为非线性相移. 按照式(7)进行数值分析得到不同小孔半径 r_a 的闭孔归一化透过率 Z-扫描仿真曲线, 如图 4. 设定分析条件为 $\omega_a = 5 \text{ mm}$, $z_0 = 12 \text{ mm}$, 而非线性相移 $\Delta\varphi_0$ 由薄膜的线性吸收系数、薄膜厚度、焦点处光强和三阶非线性折射系数决定, 与薄膜的材料特性和激光强度相关, 因此设定纯非线性折射效应 $\Delta\varphi_0 = 1$. 从图中可以看出当 $r_a = 0.5 \text{ mm}$ 时曲线峰谷值之差 $\Delta T_{p-v} = 0.4$, 当 $r_a = 2.5 \text{ mm}$ 时 $\Delta T_{p-v} = 0.36$, 当 $r_a = 5 \text{ mm}$ 时 $\Delta T_{p-v} = 0.18$, 说明光阑小孔越小, 测得特征曲线的峰谷值越明显, 小孔过大就会影响 Z-扫描测量的灵敏度, 导致峰谷值差异变小, 分析结果与李淳飞^[16]提及的小孔越大越不灵敏结论一致.

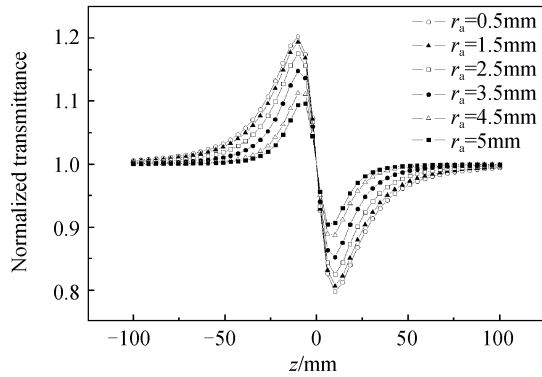


图4 不同小孔半径 r_a 下闭孔归一化透射率 Z-扫描仿真曲线

Fig. 4 Z-scan simulation curve of normalized transmittance under the closed hole

2.3 透镜焦点到光阑的距离

图1中透镜焦点 $z=0$ 到光阑 A_2 的距离 d 对薄膜材料的三阶非线性折射系数有直接影响, 设定适当的光阑到透镜焦点距离, 使得透射率散射光的影响最小, 因此在设置和调整透镜焦点到光阑的距离时应减小薄膜样品散射光对测量的影响, 突出 Z-扫描闭孔曲线的峰谷关系, 提高测量灵敏度. 由光路的几何关系可以得到小孔的线性透射率另一种表达式^[16] $S=1-\exp(-(2r_a^2 f^2)/(\omega_r^2 d^2))$, 其中 f 为透镜的焦距, ω_r 为入射光束半径, r_a 为光阑 A_2 的小孔半径. 将 S 代入式(7)中进行数值模拟得到不同 d 值的闭孔归一化透射率的 Z-扫描仿真曲线, 如图5. 假设分析条件为 $f=200$ mm, $\omega_r=5$ mm, $r_a=1$ mm, $\Delta\varphi_0=1$, $z_0=12$ mm, 仅考虑非线性折射效应而忽略小孔非线性吸收效应情况, 从图5中可以看出, 当 d 为 50 mm 时其曲线峰谷值之差 $\Delta T_{pv}=0.2$, 当 d 为 100 mm 时其 $\Delta T_{pv}=0.5$, 当 d 为 150 mm 时其 $\Delta T_{pv}=0.3$, 当 d 为 200 mm 时其曲线峰谷值之差已小于 0.2, 通过仿真曲线可以看出透镜焦点到光阑的距离在约 1/2 透镜焦距的参量值可

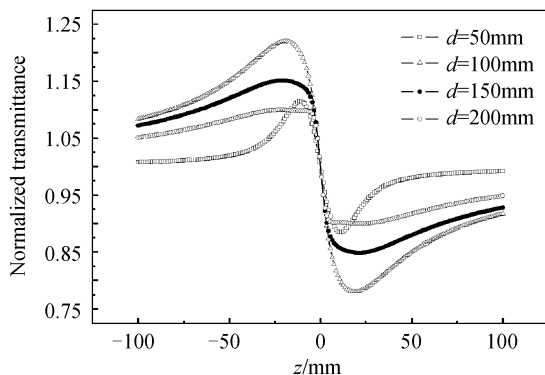


图5 不同透镜焦点到光阑的距离值情况下闭孔归一化透射率 Z-扫描仿真曲线

Fig. 5 Aperture lens to focus different from the value of the case of closed-cell Z scan normalized transmittance simulation curve

以得到较大的峰谷差值, 将 d 值设置更远能够较大地减小散射光的影响, 但是受光路的几何关系限制同样会减小光束的透过率, 导致曲线的峰谷差值会变小. 因此通过仿真分析曲线可以看出 d 值选取约 1/2 透镜焦距, 可以获取相对较大的峰谷差值, 从而提高测量灵敏度.

3 结论

综上所述, 本文用数值分析方法对薄膜材料 Z-扫描参量进行理论研究, 分别讨论 Z-扫描系统中激光器光束脉宽、光阑小孔半径、透镜焦点到光阑的距离三个参量对三阶非线性光学特性的计算和特征曲线的影响. 研究表明光束脉宽不仅关系到光致折射率变化的物理机制, 还对薄膜材料三阶非线性折射系数和吸收系数的计算值数量级影响很大, 采用不同脉宽等级的激光器进行 Z-扫描, 其 γ 和 β 计算值的数量级可以参考表1的分析结果, 光阑小孔半径越小闭孔 Z-扫描曲线的峰谷值越明显, 透镜焦点到光阑的距离设定在约 1/2 透镜焦距可以得到闭孔 Z-扫描曲线相对较大的峰谷差值, 并将数值分析结果与相关文献报道的实验结果作对比, 结果基本一致. 因此选取合适的 Z-扫描参量能有效提高测量灵敏度, 研究结果具有一定的指导意义, 可以作为薄膜材料 Z-扫描的测量参考.

参考文献

- [1] SHEIK-BAHAIE M, SAID A A, WEI T H, *et al.* Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, **26**(4): 760-769.
- [2] ZHAN Yong-jun, WANG Feng, BAI Li, *et al.* Z-scan techniques and its applications in material [J]. *Materials Review*, 2007, **21**(08): 99-102.
詹勇军, 王锋, 白黎, 等. Z-扫描技术及其在材料学中的应用 [J]. *材料导报*, 2007, **21**(08): 99-102.
- [3] CHEN Shu-qi, LIU Zhi-bo, ZANG Wei-ping, *et al.* Study on Z-scan characteristics for large optical nonlinear phase shift [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(03): 1211-1217.
陈树琪, 刘智波, 臧维平, 等. 大非线性相移下光学非线性 Z-扫描特性的研究 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(03): 1211-1217.
- [4] DU Yan-qiu, SHEN Zuo-chun, WANG Xiu-qin. Analysis on sensitivity of Z-scan technique [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(02): 303-306.
杜艳秋, 申作春, 王秀琴. Z-扫描技术的灵敏度分析 [J]. *光学技术*, 2009, **35**(02): 303-306.
- [5] LIU Hui, FU Xi-quan, HOU Yan-chao. Control of high-power laser focal position in nonlinear media [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 267-271.
刘辉, 傅喜泉, 侯彦超. 非线性介质中会聚高功率激光的焦点位置控制 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 267-271.
- [6] JI Xiao-ling, TAO Xiang-yang, LÜ Bai-da. Far-field characteristics of high-power laser beams [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(03): 251-254.
季小玲, 陶向阳, 吕百达. 高功率激光束的远场特性研究 [J]. *激光技术*, 2004, **28**(3): 251-254.

- [7] SHEIK-BAHAË M, SAID A A, HAGAN D J, *et al.* Nonlinear refraction and optical limiting in thick media[J]. *Optical Engineering*, 1991, **30**(08): 1228-1235.
- [8] ZHAO W, PALFFY-MUHORAY P. Z-scan measurements of $\chi^{(3)}$ using top-hat beams[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, **65**(6): 673-675.
- [9] HU Jian-li, DING Ying-chun. Study on closed-aperture Z-scan diffraction theory for large optical nonlinear absorption phase shift[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2163-2166.
胡建莉,丁迎春. 基于衍射理论的大非线性相移 Z-扫描研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11):2163-2166.
- [10] YIN M, LI H P, TANG S H, *et al.* Determination of nonlinear absorption and refraction by single Z-scan method [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2000, **70**(04): 587-591.
- [11] SUN Jian-ping. Study on the nonlinear optical property of PMOCOPV by Z-Scan technique [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(5): 687-691.
孙建平. Z-扫描法研究 PMOCOPV 的非线性光学效应[J]. *半导体光电*, 2008, **29**(5):687-691.
- [12] LÜ Peng, GUO Heng-qun, SHEN Ji-wei, *et al.* The preparation and nonlinear optical properties of nc-Si/SiN_x composite films[J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, **39**(01): 44-47.
吕蓬,郭亨群,申继伟,等. 纳米硅镶嵌氮化硅薄膜的制备及非线性光学性质研究[J]. *功能材料*, 2008, **39**(01):44-47.
- [13] CHEN Ai-ping, LONG Hua, WANG Kai, *et al.* Third-order nonlinear optical properties of CuO film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(01): 607-611.
陈爱平,龙华,王凯,等. CuO 薄膜的三阶非线性光学特性研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(01):607-611.
- [14] FAN Xin-ye, XU Tie-feng, SHEN Xiang, *et al.* Third order nonlinear optical properties of GeS₂-Ga₂S₃-Sb₂S₃-AgCl Glass [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 210-213.
范鑫烨,徐铁峰,沈祥,等. GeS₂-Ga₂S₃-Sb₂S₃-AgCl 玻璃的三阶非线性光学特性[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2):210-213.
- [15] HERMAN A, WILSON P J. Factors affecting optical limiting and scanning with thin nonlinear samples [J]. *International J Nonlinear Opt Phys*, 1993: 613-629.
- [16] 李淳飞著. 非线性光学(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2009:84-88.

Effects of Z-scan Parameters on the Third-order Nonlinear Optical Properties of Films Materials

GAN Ping^{a,b}, QING Sheng-lan^a, XIAN Xiao-dong^c

(a. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering(Ministry of Education); b. College of Communication Engineering; c. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Parameters about Z-scan measurements of thin films were investigated using numerical methods. Differences of the magnitude of Z-scan's third-order nonlinear refractive index and absorption coefficient were observed under different laser pulse duration using numerical simulation. The more obvious peak-valley features of Z-scan's closed-aperture curve were observed with the smaller aperture hole by simulating under aperture radius for different hole. The more obvious peak-valley features of Z-scan's closed-aperture curve were observed by simulating under different distances of aperture lens to focus, when distance is 1/2 lens focal length. The experimental results reported in the literature related agree well with the theoretical analysis. The results have some significance to the measurement of Z-scan with films.

Key words: Z-scan; Film materials; Third-order optical nonlinearities; Laser pulse duration