

厚光学非线性介质非线性吸收的理论分析

臧维平, 刘智波, 周文远, 田建国, 张春平, 张光寅
(南开大学 物理科学学院光子学中心, 天津 300071)

摘要:通过将非线性光学厚介质进行切片,对厚介质的非线性吸收进行了理论分析,所得解析结果同样适用于强的非线性区域.对近场情况进行了系统和全面的分析,获得了对于光限制器设计以及 Z-Scan 理论分析和实验有价值的结果.

关键词:非线性吸收;Z-Scan;厚非线性介质;光限制
中图分类号:04 **文献标识码:**A

ANALYSIS OF NONLINEAR OPTICAL ABSORPTION IN THICK OPTICALLY NONLINEAR MEDIA

ZANG Wei-Ping, LIU Zhi-Bo, ZHOU Wen-Yuan, TIAN Jian-Guo,
ZHANG Chun-Ping, ZHANG Guang-Yin
(Photonics Center, College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: A theoretical analysis of nonlinear optical absorption in thick nonlinear media was given by slicing a thick media into a stack of thin media. And the result is also suitable for the strongly nonlinear regime. The comprehensive analysis for near field case was given. It is very valuable for the design of optical limiters and analysis of Z-scan experiments.

Key words: nonlinear absorption; Z-Scan; thick nonlinear media; optical limiting

引言

由 Sheik-Bahae 等人提出的 Z-Scan 方法^[1],被广泛的用来测量材料的非线性 Kerr 系数 n_2 和双光子吸收系数 β . 大量的实验和理论分析主要集中在薄样品情况^[1,2]. 对于厚样品的非线性折射,一些作者进行了理论分析和实验研究^[3-5]. 对于厚介质非线性吸收也有作者进行理论和数值分析^[6,7].

本文所给出的理论分析具有图像清晰,数据准确的特点.分析的出发点是以薄样品的理论分析为基础.

1 Z 扫描技术

图 1 为紧聚焦配置下的 Z 扫描示意图,由于本文主要研究非线性吸收情况,因此我们选择近场对透射率进行测量.

当非线性介质从较大的负 z 处向原点 O 移动时,开始时光强较低,非线性所引起的光吸收可忽略,因此透射率($D1/D2$)保持相对不变,为线性透射率.随着介质向焦点移动,光强逐渐变强,非线性吸收也随之变大,测量到的透射率减小;当非线性介质移过原点 O 后,光强逐渐变弱,非线性吸收随之变小.通过上述分析,我们可定性地得到透射率与介质位置的关系曲线,它具有单一吸收谷形状.

2 理论分析

对于薄样品情形,当考虑双光子吸收时,相位变化 $\Delta\varphi$ 和光强 I 的变化由以下方程所决定:

$$\frac{d\Delta\varphi}{dz'} = k\gamma I - \gamma_1 N. \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dz'} = \alpha I - \beta I^2 - \sigma_{ex} NI. \quad (2)$$

其中的 α 为线性吸收系数(如带尾吸收、掺杂吸收

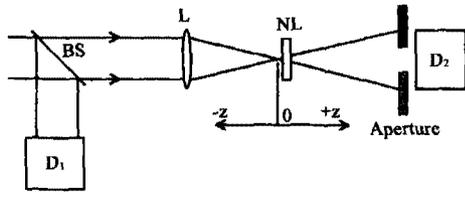


图1 Z扫描试验装置,BS为分光器,D1、D2为光探测器
Fig.1 Z-scan experiment arrangement; BS is beam splitter; D1 D2 is detector

等), γ 为三阶非线性折射系数,它正比于 $\chi^{(3)}$ 的实部, β 为双光子吸收系数,它正比于 $\chi^{(3)}$ 的虚部, $\sigma_{ex}N$ 是自由载流子吸收系数, γ_i 是自由载流子吸收截面, z' 为光在样品中传播方向的坐标.对于入射光为短脉冲和的情况,式(2)可以化简为:

$$\frac{dI}{dz'} = -\alpha I - \beta I^2. \quad (3)$$

式(3)可以精确求解得到样品出射表面的光强:

$$I_c(z,r,t) = \frac{I(r,z,t)e^{-\alpha l}}{1 + q(z,r,t,\beta)}, \quad (4)$$

这里 $q(z,r,t,\beta) = \beta I(z,r,t)L_{eff}$, $L_{eff} = (1 - e^{-\alpha l})/\alpha$, L 为样品厚度, r 为径向坐标, t 为时间坐标.

本文主要讨论非线性吸收情况.对于厚样品,沿光束传播方向我们将样品分成一组薄样品的紧密叠合,那么当光束依次通过每个薄片到达样品的出表面时,计及每个薄片的影响.在厚样品的出表面的光强应为:

$$I_{out}(z_{out},r,t,\beta) = \frac{I_{out}(z_{out},r,t,\beta=0)e^{-\alpha l}}{\prod_{i=1}^{\infty} (1 + q_i(z_i,r,t,\beta))}. \quad (5)$$

$I_{out}(z_{out},r,t,\beta)$ 表示样品出表面处的光强, $I_{out}(z_{out},r,t,\beta=0)$ 表示没有双光子吸收情况下样品出表面处的光强, $q_i(z_i,r,t,\beta)$ 为第*i*个薄片的吸收参数.我

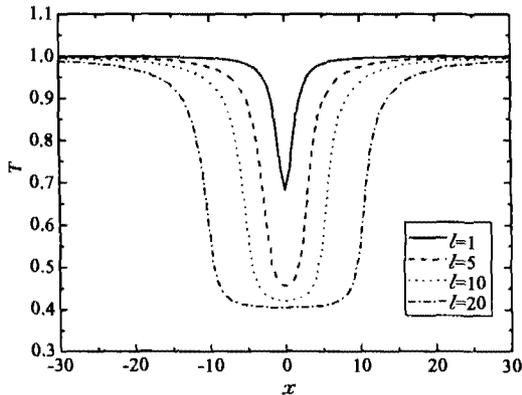


图2 $B=0.5$ 时,不同样品厚度的Z-scan扫描曲线
Fig.2 Z-scan curves for $B=0.5$ with the increasing values of sample thickness

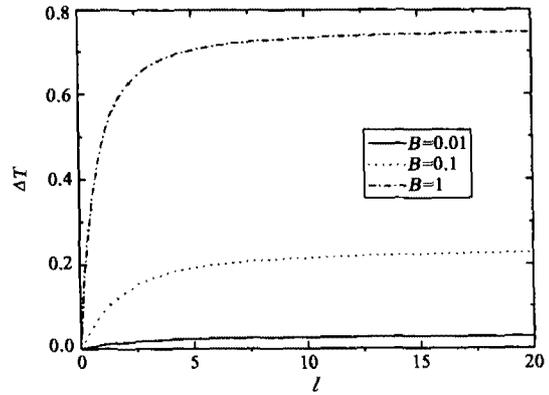


图3 不同B值下 ΔT 随样品厚度*l*的变化曲线
Fig.3 The absorption dip ΔT as a function of the sample thickness with the increasing value of B

们的透射率计算为样品出表面处的透射率,这更能反映非线性吸收情况.

为了理论处理上的简化,本文中的Z-Scan是指探测光阑紧贴样品后表面,即所谓的T-Scan.本文中的透射率的计算都是样品后表面处的透射率.我们将归一化透射率分为3种情况:

(1)轴上小孔的归一化透射率:

$$T(z,0,t) = \frac{e^{-\alpha l}}{\prod_{i=1}^{\infty} (1 + q_i(z_i,0,t,\beta))}. \quad (6a)$$

通常,我们用弱光情况的透射光强来对透射率进行归一化,上式可以化简为

$$T(z,0,t) = \frac{1}{\prod_{i=1}^{\infty} (1 + q_i(z_i,0,t,\beta))}. \quad (6b)$$

(2)轴上半径为 r_a 的小孔的归一化透射率:

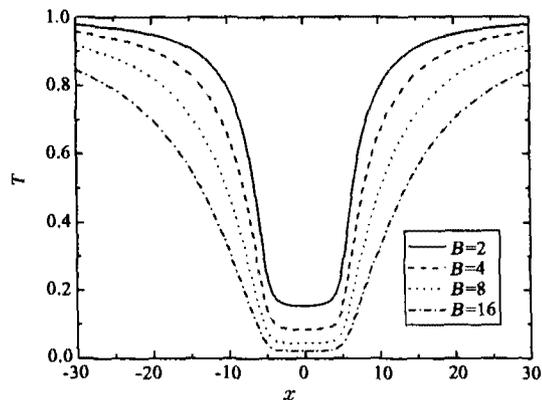


图4 $l=10$ 时,不同的非线性参数B下Z-scan扫描曲线
Fig.4 Z-scan curves for $l=10$ with the increasing values of nonlinear parameter B

$$T(z, t, r_a, \beta) = \frac{\int_0^a I_{out}(z, r, t, \beta) r dr}{\int_0^a I_{out}(z, r, t) r dr} = \frac{\int_0^a \frac{I_{out}(z, r, t, \beta = 0)}{\prod_{i=1}^n (1 + q_i(z, r, t, \beta))} r dr}{\int_0^a I_{out}(z, r, t) r dr} \quad (7)$$

(3)在开光阑情况下,全部透射光强被探测,式(7)中右边的积分上限均由 r_a 取到 ∞ 。

以上,我们给出了3种透射率的一般表达式,但通常精确地求得 $q_i(z, r, t, \beta)$ 是很困难的,精确的解析表达式是不存在的.下面我们在一定近似的情况下对上面的结果进行讨论和分析。

3 结果和讨论

3.1 对于轴上小孔情况,当忽略 q_i 的高次项时,我们可以如下化简:

$$T(z, 0, t) = \frac{1}{1 + B \exp(\alpha_0(x - l/2)) \int_{x-l/2}^{x+l/2} \frac{\exp(-\alpha_0 x')}{1 + x'^2} dx'} \quad (8)$$

其中 $B = \beta I_0 z_0$ 我们称为标准非线性吸收系数, $\alpha_0 = \alpha z_0$ 我们称为标准线性吸收系数, α_0 和 B 都是无量纲量. z_0 为共焦参数, $x = z/z_0$ 为无量纲样品位置, $l = L/z_0$ 为无量纲样品厚度. 标准线性吸收系数 $\alpha_0 = 0$, 归一化透射率为:

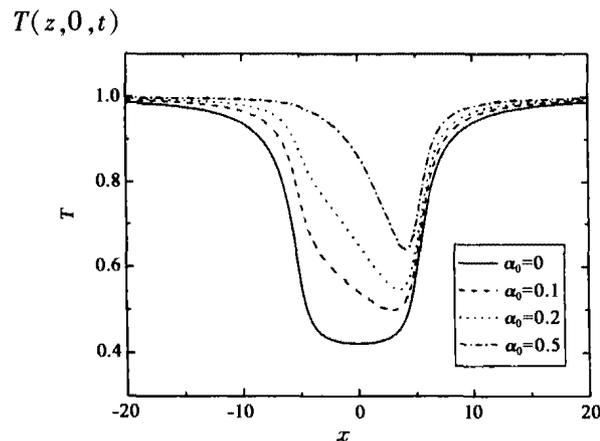


图5 样品厚度为10时,不同线性吸收系数时的 Z-scan 扫描曲线
Fig. 5 Z-scan curves for $l = 10$ with the increasing values of linear absorption parameter α_0

$$= \frac{1}{1 + B[\tan^{-1}(x + l/2) - \tan^{-1}(x - l/2)]} \quad (9)$$

通过和数值解(傍晚轴近似)的比较^[8],我们发现式(9)给出的结果无论对于大 B 值,还是小的 B 都很准确,这是因为当非线性吸收较小时,分母中非线性吸收的高次项贡献很小,略去高次项对结果影响很小;当非线性吸收较强时,光强衰减的很快,故 B^2 及更高项的影响很小.故此事们在以后的分析中将采用分母保留 B 一次项的透射率结果进行讨论。

图2我们给出了当非线性吸收系数 $B = 1/2$ 时,对于不同样品厚度的 Z-Scan 线 ($l = 1, 5, 10, 20$).通过对式(9)的透射率求导数,并令 $dT/dx = 0$,我们可以得到吸收谷的极小值:

$$T_{min} = \frac{1}{1 + 2B \tan^{-1}(l/2)} \quad (10)$$

吸收谷的深度可以求得,结果如下:

$$\Delta T = 1 - T_{min} = \frac{2B \tan^{-1}(l/2)}{1 + 2B \tan^{-1}(l/2)} \quad (11)$$

图3给出了对于不同的 B 值, ΔT 随样品厚度的变化,样品厚度 l 为横坐标,取值为 $0 \sim 20$.从图3中,我们可以看出,对于不同的 B 值,随样品的厚度,总会会出现吸收饱和的情况.当样品的无量纲厚度为5时,再增加样品的厚度,对吸收的贡献是很小的,所以在现实中利用非线性吸收的光限制器的设计中,将样品的无量纲的长度取5是一个比较好的选择.在理论上,当 $l \rightarrow \infty$ 时,吸收谷的最大深度为:

$$\Delta T_{max} = \frac{\pi B}{1 + \pi B} \quad (12)$$

当吸收非常强时,式(12)的极限为1.

图4给出了, $l = 10$, 对于 $B = 2, 4, 8, 16$ 时的透射率 Z-Scan 曲线.我们通过和数值解比较^[8],发现

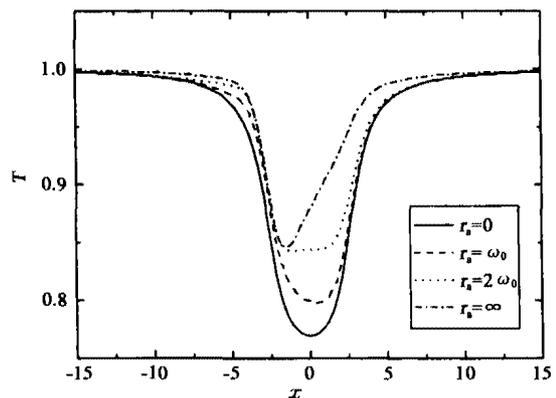


图6 线性吸收为0, $B = 0.126, l = 5$ 时,不同光阑半径时的 Z-scan 扫描曲线
Fig. 6 Z-scan curves for $\alpha_0 = 0, B = 0.126,$ and $l = 5$ with the increasing values of aperture radius

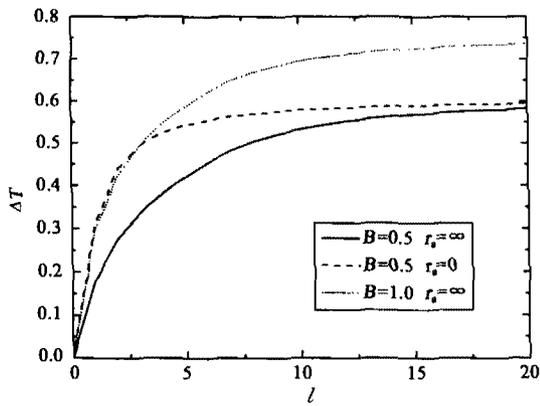


图7 不同非线性吸收 B 和不同光阑半径 r_a 情况下, ΔT 和 l 的关系曲线

Fig. 7 The absorption dip ΔT as a function of the sample thickness with different values of B and r_a .

当非线性吸收系数 $B \leq 5$ 时相当吻合. 图5, 给出了当样品厚度为10时, $B = 0.5$ 时, 针对几个不同线性吸收系数时的归一化透射率曲线. $\alpha_0 = 0, 0.1, 0.2, 0.5$. 从图中可以看出以下特点: (a) 随着 α_0 的增加, 吸收峰向样品的入射表面移动; (b) 随着 α_0 的增加, 吸收峰峰值减小. (这主要是因为我们在归一化透率时, 采用了具有线性吸收的透射来进行归一化造成的, 当 α_0 增加时绝对透射本身减少).

3.2 对于轴上半径为 r_a 的小孔的归一化透射率, 我们采用分母中保留 B 的一次项近似, 可得:

$$T(z, t, r_a, \beta) = \frac{\int_0^a \frac{\exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2(1+(x+L/2)^2)}\right)}{1 + B \exp(\alpha(x-L/2)) \int_{x-L/2}^{x+L/2} \frac{\exp(-\alpha x')}{1+x'^2} \exp\left(-\frac{2r'^2}{\omega_0^2(1+x'^2)}\right) dx'}{\int_0^a \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2(1+(x+L/2)^2)}\right) r dr} \quad (13)$$

式(13)中 ω_0 为光束束腰半径. 当 $r_0 = 0$ 时, 对应轴上小孔情形, 式(13)可以化简成式(8).

图6给出了, 当线性吸收为0, $B = 0.126$, $l = 5$ 时, 不同 r_a 时的归一化透射率. 主要有以下特点: (a) 当 $r_a = 2\omega_0$ 时, 吸收峰的位置已经接近开光阑的吸收峰; (b) 随着 r_a 的增加, 吸收峰向样品的出射表面移动; (c) 随着 r_a 的增加, 吸收峰峰值减小, 当开光阑时达到最小值. 这主要是因为对于类高斯光束

轮廓的边沿, 光强较小, 因此这时的吸收也较小, 在对整个光束平均时, 引起平均透射率的减小.

3.3 开光阑情况

图7给出了, ΔT 和 l 的关系曲线. 由图可以看出, 对于 $r_a = \infty$, 当 $l > 5$ 时, $B = 0.5$ 和 $B = 1$ 的两条 ΔT 曲线随 l 的变化很缓慢; 对于 $B = 0.5$, 当 $l < 3$ 时, $r_a = 0$ 和 $r_a = \infty$ 的两条 ΔT 曲线的差别随 l 的增加而增大, 当 $l > 3$ 后, $r_a = 0$ 和 $r_a = \infty$ 的两条 ΔT 曲线的差别随 l 的增加而减少, 当 $l = 15$ 时, 两者接近相等. 这主要是因为, 开始时随 l 的增加, 非线性吸收增加; 当 l 增大到一定程度时, 吸收饱和开始起作用, 同时衍射的作用也越来越明显, 最终造成样品出射表面的光强沿径向分布趋于均匀, 从而使得 ΔT 的差异消失.

4 结论

本文对厚非线性介质的吸收进行了详尽的讨论, 尤其是对近场小孔情况、不同光阑孔径的情况和开光阑的情况进行了分析和讨论, 其中的很多结论对于人们进行光限制器的设计和 Z-Scan 的实验分析也具有很好的指导意义.

REFERENCES

- [1] Sheik-Bahae M, Said A A, Wei T H, et al. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam [J]. *IEEE. J. Quantum Electron*, 1990, 26: 760—769.
- [2] Hermann J A, McKay T, McDuff R G. Z-scan with arbitrary aperture transmittance: the strongly nonlinear regime [J]. *Optics Communications*, 1998, 154: 225—233.
- [3] Hermann J A, McDuff R G. Analysis of spatial scanning with thick optical nonlinear media [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, 10(11): 2056—2064.
- [4] TIAN Jian-Guo, ZANG Wei-Ping, ZHANG Cun-Zhou, et al. Analysis of beam propagation in thick nonlinear media [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4331—4336.
- [5] Chapple P B, Staromlynska J, McDuff R G. Z-scan studies in the thin-and the thick-sample limits [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, 11(6): 975—982.
- [6] Hermann J A. Nonlinear optical absorption in thick media [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, 14(4): 814—823.
- [7] Anders Eriksson, Mirael Lindgren, Soren Svensson. Numerical analysis of Z-scan experiments by use of a mode expansion [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, 15(2): 810—816.
- [8] McDuff R G. Nonlinear self-focusing and beam propagation using Gaussian Laguerre modal decomposition [D]. Queensland, Australia. University of Queensland, 1994.