

文章编号: 1002-2082(2007)03-0367-04

LN 晶体自散焦到自聚焦转换的耦合理论分析

康轶凡¹, 王超², 忽满利¹, 周景会¹, 高平安¹, 唐天同²

(1. 西北大学 物理系, 西安 710069; 2. 西安交通大学 电子科学与技术系, 西安 710049)

摘要: 对铌酸锂晶体进行了三阶非线性折射系数测量的 Z 扫描实验和光折变非线性系数测量的时间扫描实验。为了分析时间分辨扫描曲线的特点, 基于非线性介质中光折变非线性与三阶非线性光学效应的耦合作用, 引入非线性折射率随时间变化的表达式, 分析了空间亮孤子的形成过程, 进而揭示了其在一定条件下从自散焦到自聚焦转换的动态行为的物理机制, 得到了与实验现象相一致的结论, 并说明了自聚焦光折变晶体中可能存在稳定的暗空间孤子。

关键词: 光折变效应; 三阶非线性; 自散焦; 自聚焦; 孤子

中图分类号: O743

文献标志码: A

Analysis of transform from self-defocusing to self-focusing of LN crystal based on coupling theory

KANG Yi-fan¹, WANG Chao², HU Man-li¹,

ZHOU Jing-hui¹, GAO Ping-an¹, TANG Tian-tong²

(1. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Department of Electronics Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Z-scan experiment for measuring three-order nonlinear refractive coefficient and time-resolved scan experiment for measuring photorefractive nonlinear refractive coefficient were made with lithium niobate crystal doped with Fe and Tb. To explain the characteristics of the time-resolved scan curves, based on the coupling effects of photorefractive and third-order nonlinearity in the nonlinear medium, together with two analogic refractivity-timed expressions, an analysis on the dynamic evolving process of spatial bright soliton is made and eventually the physical mechanism of dynamical evolution from self-defocusing effect to self-focusing one under specific experimental condition is presented, which is completely coincident with the experimental phenomenon. The analysis has also validated the existing possibility of spatial dark soliton in self-focusing photorefractive crystal.

Key words: photorefractive effect; third-order nonlinearity; self-defocusing; self-focusing; soliton

引言

铌酸锂晶体是一种非常重要的具有多种用途的压电、铁电和电光晶体。由于其具有优良的电光特性和大的光学非线性, 所以一直是重要的光折变材料。而对双掺杂的铌酸锂晶体的自散焦到自聚焦

的动态分析, 因其有着可能的广泛应用, 更是成为研究的焦点^[1-6]。而对广泛存在的三阶非线性效应, 主要是克尔效应, 并没有考虑在内。

我们对晶体进行了实验研究, 并以此非线性介质中 2 种主要的非线性光学效应(光折变非线性和

收稿日期: 2006-09-28; 修回日期: 2006-12-25

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划基金资助(04JK338)

作者简介: 康轶凡(1980—), 女, 陕西西安人, 西北大学硕士研究生, 主要从事光折变效应方面的研究工作。E-mail: yifan440@126.com

三阶非线性效应)的耦合作用为基础,以稳定的亮空间孤子的形成过程为依据,分析了其从自散焦现象到自聚焦现象转换的动态行为的物理机制;并指出,光学介质在各种非线性效应的作用下存在着一种光学自陷现象,这实质是非线性介质中光波的自作用效应,也是这种动态行为的物理机制的本质。

1 实验

1.1 三阶非线性克尔效应测量——Z 扫描方法

实验装置如图1所示。样品为LiNbO₃:Fe:Tb(质量分数为0.0003的Fe,0.0002的Tb),厚度为3mm。光源是波长为632nm、功率为(20~200)mW的激光束,在一焦距16cm的会聚透镜的焦点处激光光腰为10μm。D₁和D₂分别用来测量进入晶体前后光束的能量。LN晶体可随精度达0.05mm的步进电机的驱动,沿Z轴移动。在闭孔的情况下,我们进行了如下的晶体三阶非线性的实验表征。

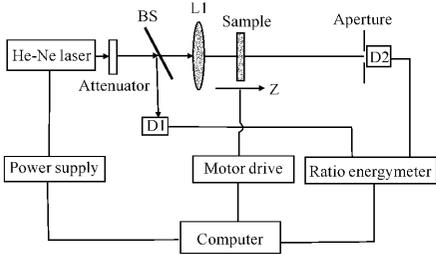


图1 Z扫描实验装置图

Fig. 1 The setup of Z-scan experiment

根据Z-scan方法^[7]的测量原理及上述内容得到标准透过率曲线的特点——先谷后峰,如图2所示。其中,参数 x 为以 Z_0 (光束的瑞利散射长度)为归一化常数的样品位置参数; T 为光束的归一化透过率。我们很容易定性地知道,在较高光强的632nm激光的作用下,其具有明显的三阶非线性自聚焦现象。

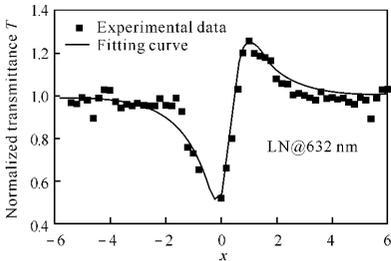


图2 闭孔Z扫描标准透过率曲线图

Fig. 2 The normalized transmittance curve of closed-aperture Z-scan

1.2 时间扫描方法

时间扫描方法是在Z扫描方法的基础上,为了测量光折变非线性参数的动态行为而提出的。其实实验装置如图3所示。

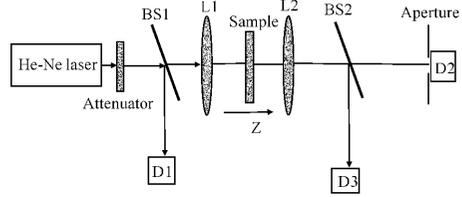


图3 时间扫描装置图

Fig. 3 The experimental setup of time-resolved scan

同样采用以上提及的铌酸锂样品。实验中,功率约40mW的He-Ne激光束(其偏振方向平行于c轴,e光)经过透镜L1聚焦后入射到晶体上,晶体出射面处的出射光斑经透镜L2和分束器BS2分别成像在小孔探测器D2和开孔探测器D3上,探测器D1用来监测入射功率。晶体入射面离透镜L1的焦平面距离为 $z=1$ cm。根据其测量原理^[8]得到晶体的实验曲线,如图4所示。其中,横坐标为时间参数,纵坐标分别为归一化透过率、等效非线性吸收系数和折射率变化。

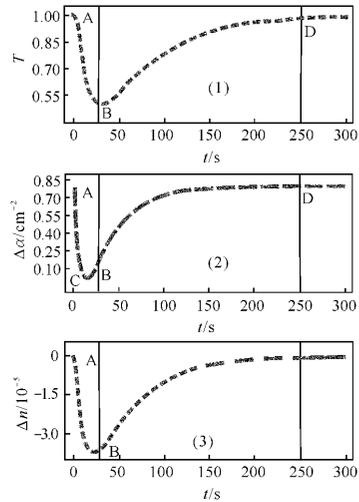


图4 双掺杂LN时间扫描法特征曲线图

Fig. 4 The time-resolved scan characteristic curve of double-doped LN crystal

2 分析讨论

从理论上讲,在强光与物质相互作用的过程中

阶次较高的非线性效应也是可能存在的^[9]。但由于阶次越高其非线性效应越不明显,为简化起见,这里仅考虑介质的二、三阶非线性效应。对以上我们研究的铌酸锂晶体而言,主要是光折变效应与三阶非线性效应。根据光折变效应的物理机制^[8],光辐照形成的空间电荷场通过电光效应在晶体内部形成了与光强的空间分布相对应的折射率变化。如果晶体不存在反演对称中心,则空间电荷场通过线性电光效应(泡克尔斯效应)引起折射率的变化;如果晶体存在对称中心,则空间电荷场会通过平方电光效应(克尔效应)引起折射率的变化。由于铌酸锂晶体不存在对称中心,因而在考虑光束于其中的传播情况时,必须考虑光折变效应和三阶非线性效应的共同作用。

仅考虑光折变效应,由光强的空间调制而引起的折射率分布相当于一维相光栅。对铌酸锂晶体而言,其折射率变化 $\Delta n < 0$, 通过其中的光束因受到衍射作用而有发散的倾向。当仅考虑三阶非线性效应时,由于其三阶非线性折射率变化与光强的大小有关,因而它对通过其中的光束聚焦作用也与光强有关。另外,光束还要经受由自身界面的有限性引起的衍射效应。实质上,以上所及的自聚焦与光折变体相光栅衍射作用都是光束的自作用,非线性介质中的稳态光场分布就是多种作用相互耦合达到自洽的结果。因此,我们有理由认为,在时间扫描法实验中所得的实验数据曲线是晶体中光折变效应与三阶非线性共同作用的结果。相应地,二者作用的相对强弱将直接决定曲线的特征参数。

基于光折变效应的特点——空间电荷的分离和空间电荷场的建立需要一个累积的过程——三阶非线性与光强有关的瞬态响应特性,我们引进 2 个惟像的数学表达式以分别表示光折变折射率变化和三阶非线性折射率变化随时间 t 的变化关系。如(1)式和(2)式所示:

$$\Delta n_2 = \Delta n_{\max 2}(E) e^{1 - (\frac{x_1}{2} + \frac{1}{2x_1})} \quad (1)$$

$$x_1 = \frac{t}{\tau_1}$$

$$\Delta n_3 = \Delta n_{\max 3}(I_0) [1 - e^{1 - (\frac{x_2}{2} + \frac{1}{2x_2})}] \quad (2)$$

$$x_2 = \frac{t}{\tau_2}$$

式中: τ_1 表示光折变效应达到饱和的时间; τ_2 表示吸收系数达到最大值的时间;(2)式中的指数函数部分代表了稳态吸收系数随时间的变化趋势;由于晶体具有较快光致漂白效应,因此 $\tau_2 < \tau_1$; $\Delta n_{\max 2}$ 和 $\Delta n_{\max 3}$ 分别表示二阶和三阶光致折射率变化的峰值,且前者绝对值大于后者。介质中总的

致非线性折射率随时间 t 的变化关系为

$$\Delta n = \Delta n_2 + \Delta n_3 \quad (3)$$

根据

$$\frac{d\Delta n}{dt} = 0 \quad (4)$$

我们取光折变非线性折射率峰值为 -10^{-5} , 三阶非线性折射率峰值为 10^{-7} , $\tau_1 = 30$ s, $\tau_2 = 12$ s。非线性折射率的一、二阶微商如图 5 所示。据图 5 可知,存在某一个满足 $t \approx \tau_1$ 的时刻 t , 使得(3)式有最小值;当 $t \gg \tau_1$ 和 τ_2 时,(3)式近似为 0。也就是说,光折变效应和三阶非线性效应对光束等相位面的作用存在一个平衡点。

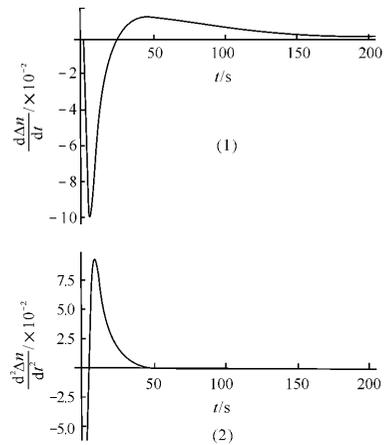


图 5 非线性折射率二阶、三阶导数随时间的变化关系曲线

Fig. 5 The curves of second-order and third-order derivatives of nonlinear refractivity versus time

由图 4 可知,非线性折射率与等效吸收系数随时间的变化具有大致相同的曲线趋势(如图 4(2)和图 4(3)所示),但相对而言,等效吸收系数在开始的下降阶段(AC 段)具有较大的变化率。因此,当一定功率的光辐照晶体时,由于晶体的吸收而使光强很快衰减,这直接导致强光非线性,也即三阶非线性的作用很弱,相对而言光折变效应将影响其中光的等相位面变化而使光束有发散的倾向,使得等效透过率减小(如图 4(1)所示);同时,晶体中存在的光致漂白效应使其稳态吸收系数减小(CB 段,也就是非线性等效吸收系数增加),而使三阶非线性自聚焦效应有所增强。但总的来说,仍是光束的发散占优而使等效透过率进一步衰减。当光束的发散效应与自聚焦效应相差达到最大时,光束的发散畸变达到最大,这就使等效透过率 T 将降至最低点(B 点)。随后,吸收系数的继续减小导致三阶非线性自聚焦效应显著增强,光束因自身有限界面而导致的

衍射效应也有所增加。但由光生伏打效应引起的光折变光栅衍射效应逐渐达到饱和,因而随着辐照时间的推移,光束的聚焦趋势相对于发散趋势在不断增强,这就使光束的发散面积较最大值时开始变小,这时透过率开始从最低点回升;当稳态吸收系数达到稳定时(D点左右),自散焦与自聚焦随之将达到一个平衡,晶体中传播光束的横向尺寸从输入面到输出面始终保持不变而形成一空间亮孤子。此后介质中的光强将不再变化,三阶非线性自聚焦效应也将达到饱和,因而这样的平衡状态得以维持而形成稳定的空间亮孤子。此时,光束因在介质中的无畸变传播而使其等效透过率也基本达到均匀介质时的情形(D点左右)。倘若产生的光折变孤子在晶体中的传播距离足够长,或者晶体的损耗系数足够大时,损耗将导致孤子的塌陷^[10]。我们认为这是引起非线性折射率变化 $\Delta n > 0$ 的原因。因而我们认为,光折变介质中形成稳定的亮空间孤子除了已经达到的条件外,介质自身的厚度也不能太大。

根据以上分析我们可以推测,对于一种自聚焦光折变介质,如果其三阶非线性呈现自散焦效应,那么在适当的实验条件下有可能在介质中形成稳定的暗空间孤子。

3 结论

本文对双掺杂的铌酸锂晶体进行了Z扫描和时间扫描实验研究,得到了其在632 nm光束作用下的三阶非线性自聚焦特性。理论上,以晶体中光折变非线性与三阶非线性自聚焦效应的耦合作用为基础,分析了亮空间孤子的形成过程,揭示了其在一定条件下从自散焦到自聚焦转换的动态行为的物理本质——光学介质在各种非线性效应的作用下存在的一种光学自陷现象,得到了与实验现象相一致的结论。另外,还预测了自聚焦光折变晶体中有可能存在从自聚焦到自散焦转换过程并进而形成稳定的暗空间孤子。我们认为,这样的理论分析对于未知光折变材料的探索是很有帮助的。

参考文献:

- [1] ASHKIN A, BOYD G D, DZIEDZIC J M. Optically-induced refractive index in homogeneities in LiNbO₃ and LiTaO₃[J]. Appl. Phys. Lett., 1966, 40(1): 72-74.
- [2] CHEN F S, LAMACCHIA J T, FRASER D B. Holographic storage in lithium niobate[J]. Appl. Phys. Lett., 1968, 13(30): 223-225.
- [3] 许心光, 杨旭东, 王正平, 等. 双掺杂LiNbO₃ 晶体光谱和

- 光折变特性[J]. 山东大学学报, 2001, 36(4): 400-404.
- XU Xin-guang, YANG Xu-dong, WANG Zheng-ping, et al. Properties of spectrum and photorefractive effect in double doped LiNbO₃ crystal[J]. Journal of Shandong University, 2001, 36(4): 400-404. (in Chinese)
- [4] 江瑛, 刘思敏, 温海东, 等. 光生伏打LiNbO₃: Fe 晶体从自散焦到等效“自聚焦”的动态转换[J]. 物理学报, 2001, 50(3): 483-488.
- JIANG Ying, LIU Si-min, WEN Hai-dong, et al. Dynamic conversion from self-defocusing to equivalent self-focusing in photovoltaic LiNbO₃: Fe crystals[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(3): 483-488. (in Chinese)
- [5] 刘思敏, 汪大云, 赵红娥, 等. 从自散焦到自聚焦的动态转换和相位共轭亮空间孤子[J]. 物理学报, 2002, 51(12): 2761-2766.
- LIU Si-min, WANG Da-yun, ZHAO Hong-e, et al. The dynamic conversion from self-defocusing to self-focusing and the phase conjugate bright spatial soliton[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(12): 2761-2766. (in Chinese)
- [6] 王小怀, 李卓凡, 忽满利. 高密度体全息存储性能与几何组态的关系[J]. 应用光学, 2005, 26(2): 10-14.
- WANG Xiao-huai, LI Zhuo-fan, HU Man-li. The relation between property of high-density volume holographic storage[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(2): 10-14. (in Chinese)
- [7] SHIEK-BAHA E 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(4): 760-769.
- [8] 刘思敏, 郭儒, 凌振芳. 光折变非线性光学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- LIU Si-min, GUO Ru, LING Zhen-fang. Photorefractive nonlinearity and its application[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- SHI Shun-xiang, CHEN Guo-fu, ZHAO Wei, et al. Nonlinear optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 刘劲松, 杜泽明. 基于运动光栅光折变双光束耦合的刚性全息明孤子的动态演化[J]. 物理学报, 2005, 54(6): 2739-2744.
- LIU Jin-song, DU Ze-ming. Dynamical evolution of rigid holographic bright solitons based on photorefractive two-wave mixing with moving grating[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(6): 2739-2744. (in Chinese)