

文章编号: 0253-2239(2004)12-1688-3

红宝石晶体中慢光现象的实验观测*

掌蕴东 范保华 袁 萍 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 在室温下观测到了固体材料中的慢光现象。用氩离子激光(514.5 nm)单光束入射到红宝石晶体中,用相干布居数振荡效应产生烧孔。利用光谱烧孔使介质折射率发生急剧变化,导致光的群速变慢。实验上观测到时延为 (2.314 ± 0.005) ms,推断光速值为 (43.215 ± 0.094) m/s,并观测到时延和光的群速随调制频率变化的规律。

关键词: 物理光学; 光速变慢; 相干布居数振荡; 时延

中图分类号: O431 文献标识码: A

Observation of Slow Light Propagation in Solid State Material

Zhang Yundong Fan Baohua Yuan Ping Ma Zuguang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optoelectronics,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 11 December 2003; revised 14 March 2004)

Abstract: Slow light propagation in solid state material is initially observed at room temperature. The slowdown of light resulting from dramatic change of refractive index by spectra hole which is produced by coherent population oscillation is investigated in a ruby crystal at 514.5 nm from Ar⁺ laser. Measured delay is about (2.314 ± 0.005) ms, corresponding to group velocity as low as (43.215 ± 0.094) m/s. The variation of the delay and the group velocity with modulation frequencies is observed in the experiment.

Key words: physical optics; slowdown of light; coherent population oscillation; delay

1 引 言

近年来,使光脉冲穿过某些材料传播的群速变得非常慢的所谓“慢光”现象已经引起极大的影响。1999年美国Harvard大学的Hau等^[1]利用电磁感应透明(EIT^[2])技术在温度为450 nK的超冷钠原子中实现了17 m/s的极慢光速;同年,Kash等^[3]在温度为360 K的铷蒸气中实现了90 m/s的“慢光”,2000年Lin等^[4]观察研究了连续激光通过体相位光栅的铌酸锂(LiNbO₃)光折变晶体后群速减小的实验现象,这是在常温下固体材料中得到的,具有很大的应用意义。2001年Phillips等^[5]报道了如何将光减速到零,并约束在Rb蒸汽中长达0.5 ms,这为光存储提供了技术可能性。

“慢光”的研究在于:1) 科学意义,从认识光与电磁波的联系,测量光的速度,到改变光的速度,控制光的传播行为,是涉及光物理的基础研究,也是人类对光与物质相互作用认识的进一步深化;2) 应用意义,光与物质相互作用的“慢光”研究,是一个理论和应用意义极为深远的研究,至少目前为非线性光学研究提供了新的研究方向,可能用于光延时、光存储、光开关技术,以及量子信息系统远程相干通信^[6~10]等方面,随着研究的不断深入,无疑将带来不可估量的应用前景,无论对我国的国民经济和国防建设都具有重要的意义。

目前这些研究中,大多数实验利用非线性材料的共振响应,而且用电磁感应透明技术来进行的。然而电磁感应透明技术并不是实现“慢光”的必要条件。电磁感应透明过程的主要作用是利用量子相干效应消除光波传播过程中介质的影响,即用外加的“控制或耦合光场”使不透明介质的原子共振线附近

* 国家自然科学基金(60478014)资助课题。

E-mail: ydzhang@hit.edu.cn

收稿日期: 2003-12-11; 收到修改稿日期: 2004-03-14

变成透明,此时,原子处于相干叠加态,以特殊频率和偏振的弱信号光场能够没有损耗地降低了的群速穿过介质,而我们在此用相干布居数振荡效应来产生烧孔,由烧孔效应造成折射率的突变,从而使光速减慢,这两种光速减慢的机制是不同的。电磁感应透明技术不仅可以使光速减慢,而且可以使光脉冲停止在介质中^[5],所需的光功率低,但电磁感应透明技术用于常温下固体材料时有点困难^[7]。

本项研究是用单束不需稳频的激光(自延迟),用光谱烧孔造成折射率的急剧变化,从而实现“慢光”。该方法的优点是用固体材料、常温、单光束(自延时)、激光不需稳频、延时可控、装置简单、可实现高效探测。国外今年已经有了两篇研究报道^[8,9],据我们所知,除了综述性文章^[10,11],国内还没有开展这方面的实验研究报道,尤其是用光谱烧孔产生“慢光”技术进行此项研究。

2 理论基础

用光谱烧孔产生慢光的物理解释如下:一束激光用来抽运基态粒子数到红宝石的宽吸收带 4F_2 上,电子从这个能带在几个皮秒时间内弛豫到亚稳态,最终经过几个微秒的粒子数弛豫时间(T_1)从亚稳态回到基态。第二束探测光,它是抽运光幅度调制的边带,由于弛豫时间长,等效于电子布居数在基态和亚稳态之间以拍频振荡,这些振荡仅当拍频满足 $\delta T_1 \leq 1$ 时才产生, T_1 是布居数弛豫到基态时间, δ 是探测光与抽运光之间的频差,即调制频率;相关能级图如图1所示,当这个条件满足时,粒子数在基态和亚稳态之间振荡,导致探测光吸收的降低。因为探测光束在一个很窄的频率间隔内经受了降低了的吸收,折射率在同样的范围内迅速增加,任何与吸收特性相联系的这个折射率的变化,由Kramers-Kronig关系描述。由于折射率 $n(\delta)$ 的急剧变化,群速度 $n_g = n_0 + \omega dn(\delta)/d\delta$ 也变得非常大,这里 n_0 是探测光在晶体中的折射率, ω 是光频。相应地,群速 $v_g = c/n_g$ 变得非常小,这就是用极窄的光谱烧孔特性产生慢光的物理过程。

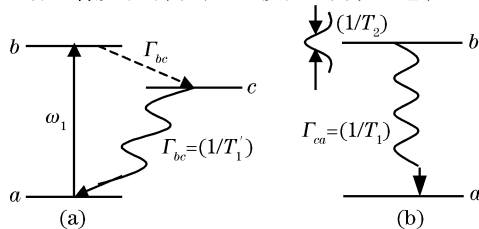


Fig. 1 Related energy levels in ruby crystal (a) original levels, (b) simplified levels

3 实验与测量结果

实验装置如图2,用一个带宽约为10 GHz的多模 Ar^+ 激光器输出514.5 nm的单色光,经过一个 $LiNbO_3$ 晶体的电光调制器,输出非正弦波脉冲,调制频率可调,输出的激光分为两束,一束为主光路,通过一个焦距为40 cm的透镜,然后射入长为10 cm的红宝石晶体,另一束为参考光。透射的信号经光电探测器接收送入示波器,这样将输出端测得的信号与参考信号输入计算机作比较,比较时间上两个信号的延时,就可以计算得出经过介质的群速大小。

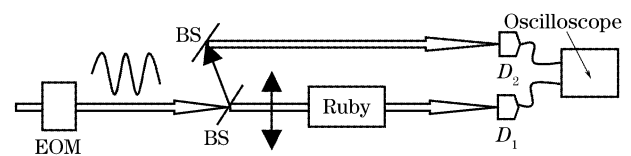


Fig. 2 Experimental configuration of measurement for slow down of light speed

图3是用示波器采集的波形,时间尺度为每格5 ms,图3(a),图3(b)分别是无样品和有样品时从主光路和参考光路测量的光脉冲波形。从图3(b)上可以明显看出时间上的延迟。在图3(a)中主光路信号在参考信号左边,两波形时间相差 $200 \mu s$,在图3(b)中可见,主光路信号在参考信号右边,两者相差 $900 \mu s$,这样总的时间延迟是1.1 ms。为了精确测量时间的延迟,用存储的数字文件画出相应的波形,见图4,计算的延迟为1.252 ms。

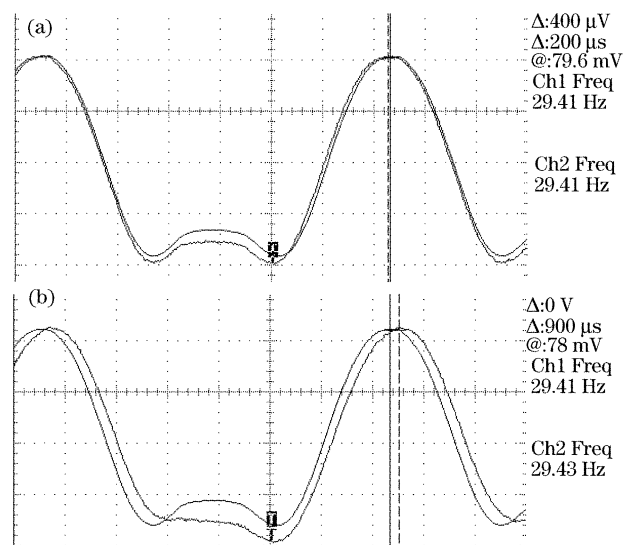


Fig. 3 Measured input and output waveforms in an oscilloscope (a) the waveforms without sample, (b) the waveforms with sample

为了更清楚地看出光脉冲的延迟,这里再给出

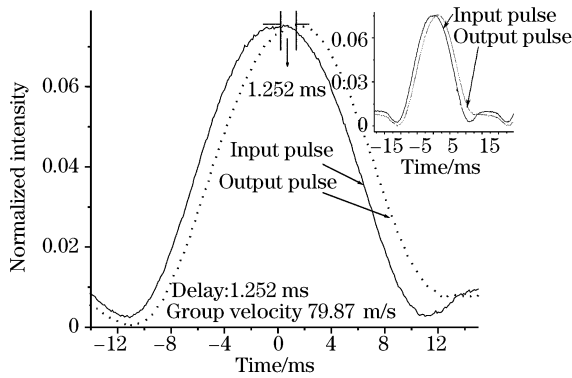


Fig. 4 Measured result of 30 Hz modulation frequency 拍频为 5 Hz 的测量结果,如图 5 所示。为了获得较大的调制度,在调制信号上加了一个直流偏置,得到调制深度小于 1.5,才出现了类高斯调制波形,一个完整的波形如图 4 的插图所示。这种由相干布居数振荡造成的烧孔效应而产生的慢光现象依赖于光的光强。

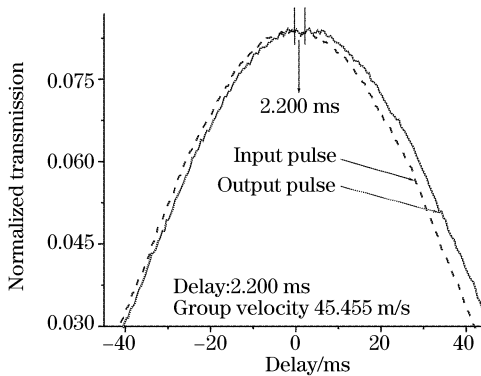


Fig. 5 Measured result of 5 Hz modulation frequency

实验发现输出的慢光信号随入射光功率和拍频有关。在一定功率下,拍频越高,时延越小;拍频越小,时延越大,如图 6 所示。在我们的实验条件下,当输入功率过高时,调制晶体受热影响,输出波形变差,输出降低,而且输出功率不稳定。因此只取

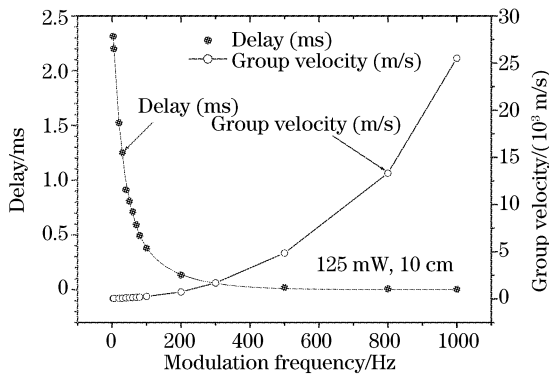


Fig. 6 Observed pulse time delay as a function of the modulation frequency for input pump power of 125 mW

125 mW 输入功率。

实验观测到光的延迟从 127 ns 到 2.314 ms,群速从 25.510 km/s 降到 43.215 m/s。还发现晶体距离焦点的不同位置,时延相差很大;而且光场与晶体相互作用的情况直接影响时延,即光速的变慢;相互作用最大,时延也最大,即光速最慢,但是波形的保真度下降,为了保持较高的波形保真度,采用了中等吸收情况的数值结果,数据如图 5 所示。有关的理论研究和实验研究正在深入进行中。

结论 用相干布居数振荡产生光谱烧孔,造成折射率的急剧变化,在红宝石中观测到光速的减慢,测量的时延为 2.314 ± 0.005 ms,对应群速为 43.215 ± 0.094 m/s,并得到时延随调制频率变化的规律。

参 考 文 献

- Hau L V, Harris S E, Dutton Z *et al.*. Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas. *Nature*, 1999, **397**: 594
- Harris S E. Electromagnetically induced transparency. *Physics Today*, 1997, **50**: 36~42
- Kash M M, Vladimir A S, Alexander S Z *et al.*. Ultraslow group velocity and enhanced nonlinear optical effects in a coherent driven hot atomic gas. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**: 5229~5232
- Lin S H, Hsu K Y, Yeh P. Experimental observation of the slowdown of optical beams by a volume-index grating in a photo-refractive LiNbO₃ crystal. *Opt. Lett.*, 2000, **25**: 1582~1584
- Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A *et al.*. Storage of light in atomic vapor. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **29**: 783~786
- Heener J E, Boyd R W. Slow light, induced dispersion, enhanced nonlinearity, and optical solitons in a resonator-array waveguide. *Phys. Rev. (E)*, 2002, **65**: 036619-1~036619-4
- Kozuma M, Akamatsu D, Deng L *et al.*. Steep optical-wave group reduction and "storage" of light without on-resonance electromagnetically induced transparency. *Phys. Rev. (A)*, 2002, **66**: 031810-1~031810-4
- Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W. Observation of ultraslow light propagation in ruby crystal at room temperature. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(11): 113903-1~113903-4
- Zhang Yundong, Fan Baohua, Yuan Ping *et al.*. Reduction of light velocity by coherent population oscillation in a ruby crystal. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(1): 87~89
- Zhao Lijuan, Tang Liqin, Xu Jingjun *et al.*. Light speed reduction. *Progress in Physics* (物理学进展), 2001, **21**(4): 385~391 (in Chinese)
- Shen Lijuan, Sun Lili, Dai Jianhua. Which is the slowest group velocity of light? — An introduction to developments of research on ultra-slow group velocity. *Physics* (物理), 2002, **31**(2): 88~92