

固体介质中光速减慢研究的若干进展*

范保华 掌蕴东[†] 袁萍

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

摘要 首先介绍了光速减慢的物理理论基础与实现方法以及国内外光速减慢研究的进展概况. 主要阐述了均匀加宽介质中的光谱烧孔理论以及借助光谱烧孔技术在红宝石晶体中实现光速减慢的实验. 最后, 就极慢光速研究的前景及研究意义进行了讨论.

关键词 光谱烧孔, 光速减慢, 红宝石晶体

Ultraslow light propagation in solid media

FAN Bao-Hua ZHANG Yun-Dong[†] YUAN Ping

(Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract The basic theories underlying the reduction of the group velocity of light are introduced and methods for achieving ultraslow light propagation are discussed. The phenomenon of spectral hole-burning in homogeneously broadened media and the experimental slowing of light in ruby are described. We discuss the significance of such research for science and applications.

Keywords spectral hole-burning, ultraslow light, ruby crystal

1 引言

光是人类赖以生存的必要条件之一, 从人类进入文明时代以来就开始了光的研究. 由于光运动得非常的快, 以致于在人类历史的大多数时间里, 它被认为是瞬时传播的. 直到 17 世纪后期才由丹麦天文学家 Olaus Roemer 通过天文学方法首次计算出光的传播速度, 虽然他的计算值比实际值相差了近 30%, 但从此揭开了人类对光速研究的序幕. 随着科学技术的不断发展, 人们对光速的认识也日益加深, 到了 20 世纪初期, 爱因斯坦相对论的出现使我们对时间和空间的观念发生了革命性的变化, 进一步确立了光速在物理学中的根本地位. 1975 年国际计量大会认可了真空中的光速 $c = 299792458\text{m/s}$, 这大大促进了基础科学的发展. 1983 年真空中的光速被用作长度单位米的定义标准, 规定 1m 的长度是光在 $1/c$ 秒内走过的距离.

人们在测量真空中的光速及认识光的本质的同

时, 也在研究光在介质中的传播特性以及光与物质相互作用的本质. 光在介质中的传输速度与介质的色散(折射率)有关, 而色散又与光波的频率有关. 对于单色波来讲, 整个光波以同样的速度 $v = c/n = \omega/k$ 传播. 这也是光波等相面的传播速度, 称为相速度. 而对于非单色光, 由傅里叶分析可知, 非单色光可以看成是诸多不同频率的单色光的叠加. 由于介质的色散效应, 每个频率成分的单色光的传输速度都不相同, 整个光波的速度(也等同于光波能量的传播速度)用群速度来表示, 群速度定义为 $v_g = d\omega/dk$. 由于实际上严格的单色波是不存在的, 所以我们一般情况下所说的光速都是指光波的群速度.

随着激光的出现以及激光技术的发展, 人们对光以及光与物质相互作用的本质有了更多更深的理解, 光学也拓展到非线性领域. 这就使得向传统意义上的光速发起挑战成为可能. 近年来, 控制光波在介

* 国家自然科学基金(批准号 60478014)资助项目

2004-12-08 收到初稿 2005-03-02 修回

[†] 通讯联系人. Email: ydzhang@hit.edu.cn

质中传输的速度已经成为光学领域的一个研究热点,而且已取得了不少的突破:分别实现了光速的各种变化^[1-14],甚至使光速为零^[15,16]。特别是在光速减慢方面,从1999年Hau等人^[5]利用电磁感应透明(EIT)技术^[18]在玻色-爱因斯坦凝聚状态下实现光速减小到17m/s,到2001年《物理评论快报》(Phys. Rev. Lett.)连续两篇光速减为零的报道,再到2003年Robert W. Boyd小组在室温条件下的固体介质中实现极慢光速^[10,11],光速减慢研究已经成为光学领域的一个研究热点。

本文主要阐述光速减慢的物理基础及光速减慢的方法,介绍光学领域的这一热点课题及其研究意义。

2 光速减慢的物理基础及实现方法

从群速度定义公式: $v_g = d\omega/dk = c/n_g$, 可以证明光波的群速度与折射率的关系为

$$v_g = c / \left(n(\omega) + \omega \left[\frac{dn}{d\omega} \right] \right), \quad (1)$$

上式分母中第一项 $n(\omega)$ 为介质的折射率,是光频率的函数,其值接近1。第二项与介质的色散度有关,若色散度很大,则介质的折射率随光波频率变化很大 ($dn/d\omega \gg 1$), 群速度就会变得很小。所以在小频率范围内,介质的折射率发生急剧变化是实现光速减慢的关键。

最早人们想到的是光频率在介质的共振频率附近时,介质的折射率变化很大,可以实现 $dn/d\omega \gg 1$ 这个条件。但是,此时介质极化率的虚部,即介质的吸收也最强,使光波很难透过介质。因此利用这种方法实现光速减慢还必须用到一项关键技术:电磁感应透明技术^[17,18]。利用该技术可以克服介质的共振吸收,在实现强色散的同时得到高透射,从而实现介质中极慢光传输现象。但是电磁感应透明技术对实验条件要求很高,装置比较复杂,难以进行实际应用。除了上述方法外,还有一种技术可以同时得到强色散和高透射从而实现光速减慢,这就是所谓的均匀加宽介质中的光谱烧孔技术。

3 均匀加宽介质中的光谱烧孔

均匀加宽介质中的光谱烧孔效应是相对于普通的烧孔效应而提出来的,它是由两束光同时作用于介质而产生的,即:在用强光抽运介质使其产生均匀

加宽的条件下,用另外一束与抽运光频率相近的光作为探测光同时作用于介质。由于抽运光的存在,使介质的基态粒子受到周期性的调制,进而削弱对探测光的吸收,出现烧孔,孔的中心是抽运光的中心频率,孔宽正比于抽运光和探测光的拍频。这种理论最早由Schwartz和Tan提出^[19]。1967年,他们通过求解密度矩阵的运动方程预言:在用强光抽运饱和吸收介质的同时用第二束光探测,在一定条件下会发生光谱烧孔现象,即使此时介质的加宽机制是常规的均匀加宽。这种效应既可以发生在二能级系统中,也可以在适当的条件下在更复杂的多能级系统中出现。后续的研究^[20-22]表明,这种烧孔的产生是由于基态粒子被抽运场周期性调制,调制频率为抽运光和探测光的拍频。当拍频频率小于或近似等于粒子弛豫时间的倒数时,基态粒子数将随着光强的振荡而振荡,并与探测光形成相干叠加,从而导致介质对探测光吸收的降低,进而在介质的吸收曲线上出现烧孔。

1983年,Hillman等人^[22]在红宝石晶体中观测到这样的光谱烧孔,证实了光谱烧孔理论。图1为该实验所用红宝石晶体的晶格结构和吸收带能级示意图。红宝石晶体有两个宽度大约为100nm的吸收带 4F_1 带和 4F_2 带,中心分别位于410nm和550nm。氩离子激光器输出的514.5nm的激光与红宝石基态到 4F_2 之间的吸收带共振,在该抽运场的作用下基态粒子被抽运到 4F_2 带,处于这个带上的粒子很快的就衰减到 $2\bar{A}$ 和 \bar{E} 能级,粒子在这个能级上的寿命比较长因而被俘获,然后再通过 R_1 线或 R_2 线或电子振动转移弛豫到基态^[9]。均匀加宽吸收带的宽度大致为100nm,相应的相移时间 T_2 为几个飞秒,但是粒子弛豫到基态的时间 T_1 为几个毫秒,远大于相移时间 T_2 。由于抽运场被周期性地调制,基态粒子数也就周期性的变化,这时作为抽运场的中心频带就会和作为探测场的边频带产生相干叠加,使部分抽运能量转移到探测场,从而削弱介质对探测光的吸收,在介质的吸收曲线上出现烧孔,孔宽大约为 $(T_1)^{-1}$,中心为抽运激光频率。对于红宝石晶体他们得到的烧孔宽度为37Hz(HWHM)。由色散关系可知,在如此窄的频谱范围内,介质的吸收系数急剧变化必然伴随着介质折射率的急剧变化,从而实现光速减慢的关键条件。

4 利用烧孔技术的光速减慢实验

2003年,Boyd小组^[10]利用光谱烧孔技术在室

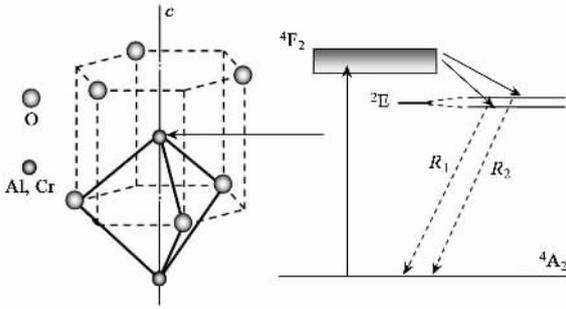


图1 红宝石($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$)晶体的晶格结构以及能级结构模型

温条件下的红宝石晶体中实现了 57m/s 的极慢光速. 实验装置如图 2 所示. 氙离子激光器输出 514.5nm 的激光, 激光束首先经过一个可变的衰减器, 然后送入光电调制器. 调制器由一个函数发生器驱动, 用它可以得到按正弦曲线波动的幅度调制光束. 从调制器出来的光束分出 5% 作为参考光送入一个探测器. 主光束被一个 40cm 焦距的透镜聚焦后注入一个 7.25cm 长的红宝石棒中. 光束从晶体出来以后被送入探测器, 探测器的信号连同输入光束的探测信号被存储到数字示波器中. 最终结果被送入计算机比较并计算出相对延迟和两个信号的振幅.

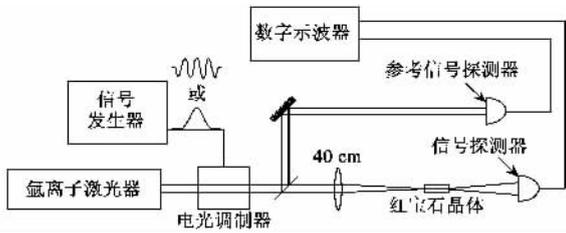


图2 红宝石晶体中光速减慢实验装置示意图^[10]

该实验不需要用分离的抽运光和探测光来观察光速减慢效应. 单束强光脉冲即可以产生吸收饱和, 以改变群速折射率, 获得慢光. 这种相对强的脉冲可以认为产生了自己的抽运场, 使得在红宝石晶体中产生光谱烧孔效应. 这种光谱烧孔导致幅度调制的光束产生很大的群速折射率, 从而极大地限制了光脉冲在晶体内的传输速度. 图 3 是该实验的部分结果. 图 3(a) 显示的是在输入抽运功率为 0.1W 和 0.25W 时相对调制衰减与调制频率的关系; 图 3(b) 为同样条件下延迟时间与调制频率的关系. 在输入抽运功率为 0.25W 时, 最大延迟为 $1.26 \pm 0.01\text{ms}$, 对应于图 3(a) 中光谱烧孔很深但仍然很窄的地方. 可以算出在这种条件下的群速度 $57.5 \pm 0.5\text{m/s}$.

此外, 在同样条件下, 长的脉冲或者低的调制频

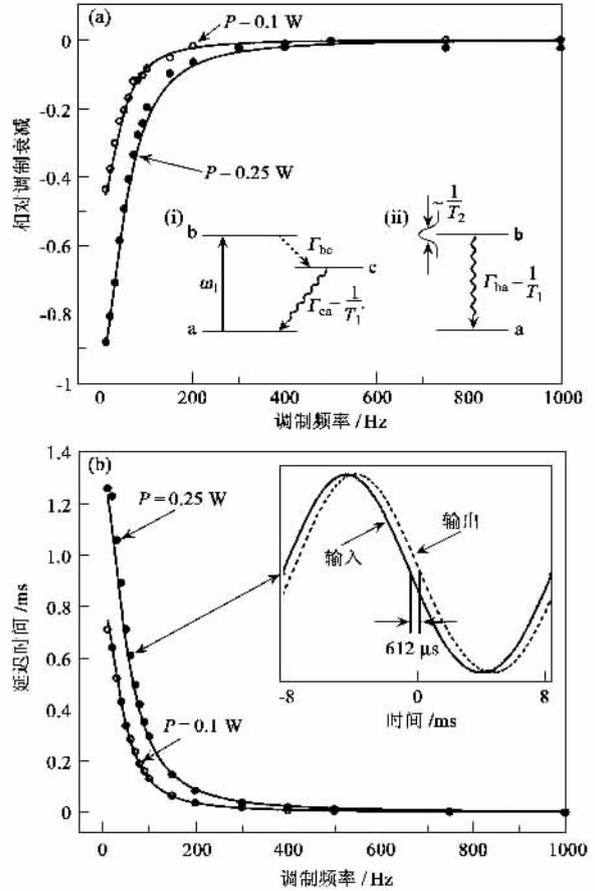


图3 实验结果(图中实线代表的是理论曲线, 离散点代表实验测量值)^[10]

率可以产生大的时间延迟, 而且波形畸变较小. 对于 30ms 的脉冲, 延迟为 0.71ms . 这个结果和其他脉冲长度的这种效应反映在图 4 中.

5 其他固体介质中的光速减慢实验

在 Boyd 小组之前也有人在固体介质中实现了光速减慢. 2000 年, Lin 等人^[8]在有一维体相位光栅的铌酸锂(LiNbO_3)晶体中实现了光群速度减慢, 测得光群速度为 $v_g = c/7.5$, 虽然群速度减少得不多, 但是他首次在室温条件下的固体介质中实现了光速减慢. 到了 2002 年, Musser 等人^[9]利用电磁感应透明技术在掺镨(Pr)的 Y_2SiO_5 中得到群速度为 45m/s 的慢光, 实验中他们保持温度为 5K 的低温. 2003 年 7 月, Boyd 小组^[11]又利用光谱烧孔技术在紫翠宝石晶体中实现了光速的变化, 把固体介质中光速减慢的研究推向了一个新的高度. 最近, 南开大学的张国权教授在室温条件下的 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO)晶体中实现了光速减慢^[14]. 在该实验中, 他们利用 532nm

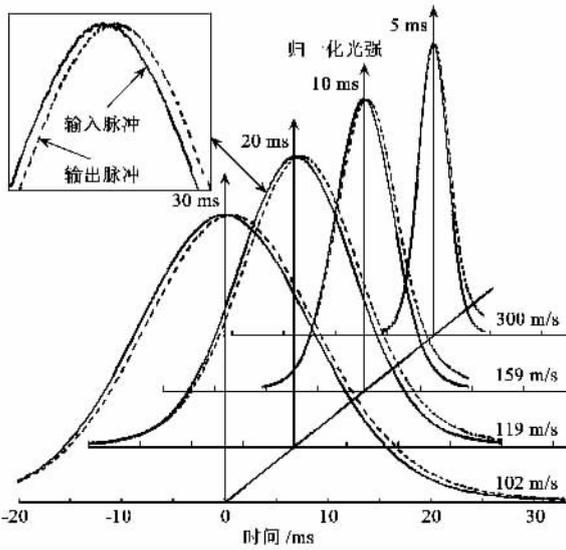


图4 延迟时间、波形畸变与脉冲长度的关系^[10]

的激光作为光源,激光经分束片分束后形成简并的两波混频,然后耦合至BSO晶体内,利用相位耦合感生色散效应使光的群速度减慢.最终他们得到了0.05m/s的极慢光速,为固体介质中的光速减慢研究再添一个新的亮点.

另外,我们课题组从2002年12月起也开始了固体介质中的光速减慢的研究,先后在红宝石和紫翠宝石晶体中实现了极慢光速^[12,13].尤其在红宝石晶体中的慢光实验中做了大量的工作,分别研究了光速减慢与介质吸收、晶体位置(方向)、调制频率之间的关系.并且取得了一定的成果,在红宝石晶体的慢光实验中实现了 27.55 ± 0.05 m/s的极慢光速.

6 光速减慢研究的意义与前景

光速减慢研究的意义可以从科学研究和实际应用两个方面来讨论:在科研方面,通过光速减慢研究可以加深人们对光与物质相互作用本质的理解,更进一步发现其中的物理规律,光速减慢过程中介质所呈现出来的强非线性效应也为非线性光学开辟了

新的研究领域;在实际应用方面,极慢光速可以用于光开关、光存储、光延迟,这在光通信以及激光雷达等方面有着巨大的应用前景.

随着光速减慢研究的不断深入和发展,光速减慢的技术会越来越成熟,更贴近于实际应用,这必然会导致光学领域的一场新的革命.

参考文献

[1] Enders A , Nimitz G , France J. *Phys. I* , 1992 , 2 : 1089
 [2] Steinberg A M , Kwiat P G *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1993 , 71 : 708
 [3] Wang L J , Kuzmich A *et al.* *Nature* , 2000 , 406 : 277
 [4] Kasapi A , Jain M *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1995 , 74 : 2447
 [5] Hau L V , Harris S E *et al.* *Nature* , 1999 , 397 : 594
 [6] Kash M M *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1999 , 82 : 5229
 [7] Budker D , Kimball D F *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1999 , 83 : 1767
 [8] Lin S H , Hsu K Y *et al.* *Opt. Lett.* , 2000 , 25 : 1582
 [9] Turukhin A V , Sudarshanam V S *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2002 , 88 : 023602
 [10] Bigelow M S , Lepeshkin N N *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2003 , 90 : 113903
 [11] Bigelow M S , Lepeshkin N N *et al.* *Science* , 2003 , 301 , 200
 [12] Zhang Y D , Fan B H *et al.* *Chin. Phys. Lett.* , 2004 , 21 : 87
 [13] 范保华, 掌蕴东, 袁萍. *物理学报* 2005 , 54(已接收) [Fan B H , Zhang Y D , Yuan P. *Acta Phys. Sin.* , 2005 , 54 (in press) (in Chinese)]
 [14] Zhang G Q , Bo F *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2004 , 93 : 113903
 [15] Phillips D F , Fleischhauer A *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2001 , 86 : 783
 [16] Kuzmich A , Dogariu A *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2001 , 86 : 3925
 [17] Harris S E , Field J E *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1990 , 64 : 1107
 [18] Harris S E. *Phys. Today* , 1997 , 50(7) : 36
 [19] Schwartz S E , Tan T Y. *Appl. Phys. Lett.* , 1967 , 10 : 4
 [20] Boyd R W , Raymer M G *et al.* *Phys. Rev. A* , 1981 , 24 : 411
 [21] Hillman L W , Boyd R W *et al.* *Jr. Opt. Lett.* , 1982 , 7 : 426
 [22] Hillman L W , Boyd R W *et al.* *Opt. Comm.* , 1983 , 45 : 416
 [23] 沈京玲, 孙立立, 戴建华. *物理* , 2002 , 31(2) 88 [Shen J L , Sun L L , Dai J H. *Wulixue (Physics)* 2002 , 31(2) 88]

(上接第 700 页)

有些年轻人静静地坐在多媒体演示屏幕前很久,像听一堂物理课一样认真.

位于伯尔尼老区的“爱因斯坦小屋”是爱因斯坦1903—1905年租用的故居,今年4月22日重新对公众开放.“小屋”面积不大,身临其境,似能感受到爱因斯坦当初生活的简

朴.“小屋”内展示了爱因斯坦的一些信件、曾经使用过的家具等物品以及15分钟左右以德、英文两种语言讲述爱因斯坦生平的小电影.参观者络绎不绝.

中国物理学会代表团在回国前还顺访了日内瓦,与中国常驻联合国日内瓦办事处吴甘美女士等进行了交流与座谈.

(中国物理学会 谷冬梅 王乃彦)