

光子晶体内的慢光及其应用

李正华^{1,2}, 薛燕陵¹, 沈廷根³

(1. 华东师范大学电子工程系, 上海 200062; 2. 镇江船艇学院通信教研室, 江苏 镇江 212003;
3. 江苏大学应用物理研究所, 江苏 镇江 212013)

摘要:光子晶体是一种具有周期性介电结构的人造材料, 具有独特光子带隙特性, 能控制光子的运动状态, 是慢光实现的最佳材料系统之一。从多角度描述了光子晶体内产生慢光效应的物理机理, 并给出了光子晶体内慢光效应的研究进展状况和主要研究方向, 最后讨论了其潜在应用。

关键词:慢光; 群速度; 光子晶体; 缺陷; 光子带隙

中图分类号:TN25

文献标识码:A

Slow Light in Photonic Crystals and Its Applications

LI Zheng-hua^{1,2}, XUE Yan-ling¹, SHEN Ting-gen³

(1. Department of Electronic Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062; 2. Communication T&R Section, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003; 3. Institute of Applied Physics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The physical mechanism of slow light in photonic crystals, a novel and artificial material with periodic dielectric structures, is described with a few different approaches. The state-of-the-art progress and the future research directions including the potential applications are discussed.

Key words: slow light; group velocity; photonic crystals; defects; photonic bandgap

1 引言

光子晶体的概念是在1987年提出的^[1-2], 所谓的光子晶体是指由两种或者多种具有不同介电常数的材料在空间周期性排列而形成的一种新型人造材料, 利用其独特光子带隙特性可控制光子的运动状态。而近年来, 如何降低光脉冲传输速度(所谓的慢光)激起了科研工作者巨大的兴趣。一方面, 降低光速为控制光和物质相互作用的研究提供了一个崭新的平台; 另一方面, 慢光有很多潜在的应用, 包括光缓存、数据同步、光储存和信号处理等^[3-4]。经过理论研究和实验观察^[5-10]可知, 光子晶体结构与其他慢光介质系统相比而言, 其主要优势在于潜在的带宽大; 另外, 光子晶体的增益或吸收与慢光产生处的频率是相对独立的, 而且光子晶体结构设计灵活, 通过改变结构参数, 可以在任意波长上实

现慢光; 而且光子晶体结构材料器件体积小, 便于与现有的光通信器件集成, 因此倍受关注。

虽然三维光子晶体有多种制备方法^[11-12], 且控制光波具有较大的灵活性, 但是目前制作光波长级高精度的三维周期性结构材料还是特别困难的, 即使是极小的制作误差也有可能难以观察到慢光现象^[13]。幸运的是一维光子晶体和二维光子晶体也能呈现出三维光子晶体的某些特性, 并且制作相对简单。所以, 光子晶体内慢光的研究目前主要集中

基金项目: 国家科技部 973 重大项目(2006CB921100); 上海市科委基础重点项目(05JC14069); 江苏省自然科学基金(BK2004059)资助课题。

作者简介: 李正华(1975-), 男, 华东师范大学在读博士研究生, 镇江船艇学院船艇指挥系讲师, 主要研究方向为光子晶体及其在光通信中的应用。E-mail: liharder@vip.163.com

收稿日期: 2007-07-20; **修订日期:** 2007-09-07

在一维光子晶体和二维光子晶体上。本文描述了光子晶体内产生慢光效应的物理机理,并给出了目前研究进展状况,最后讨论了光子晶体内慢光效应的潜在应用。

2 物理机理

对于一个脉冲,其群速度可以描述为:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega}} \bigg|_{\omega=\omega_c} = \frac{c}{n_g}$$

此处, ω_c 是中心频率, n_g 是材料的群折射率。用光子晶体实现慢光是基于强烈的结构色散。电磁波在介电函数周期性变化的材料中传播时,受空间周期性分布的介电函数对电磁波的调制作用,会产生光子带隙 (photonic bandgap, PBG)^[14]。而在光子晶体中引入缺陷,将会在 PBG 中产生相应的缺陷态,如图 1 所示是在一维光子晶体中引入缺陷层前后 PBG 的变化情况^[5]。因此,通过在一维光子晶体中巧妙地引入缺陷层和在二维光子晶体中恰当地引入线缺陷形成的光子晶体波导,能在禁带中产生局部的缺陷模,且在强反射背景下缺陷模频率附近存在很窄的透射峰,类似于电磁诱导透明介质中完全吸收背景下的透射峰。根据吸收损耗与折射率之间的 Kramers-Kronig 关系,因 $dn/d\omega \gg 0$,所以在相应的频率附近光群速度将大幅度降低,从而形成光的慢速传输。

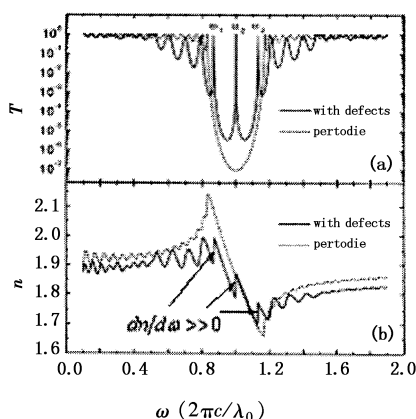


图1 透射谱(a)和等效折射率的实部(b)

事实上,光脉冲在光子晶体中的延迟现象也可借助简单的图示方法给出直观而准确的解释。光在一维光子晶体中的时间延迟,可以从多次散射模型来理解^[5],从图 2(b)可知,利用多次散射模型所得的系统时间延迟与用折射率计算的结果完全相符。而光子晶体波导中形成慢光有两种可能的机理^[10],

即后向散射和全反射。对于后向散射的情况来说,光在每个单晶格处都产生相干的后向散射,在布里渊区边界处,由于前向传输光波和后向散射光波在相位和幅度上是一致的,导致驻波的形成,驻波也理解为是零群速度的慢波;若入射的光波在有限的范围内偏移布里渊区边界,前向和后向行波分量虽然相位不大一致,但它们通过相互作用,导致慢速移动的干涉模式,即慢光模式。由于光子带隙的存在,在光子晶体中任意角度传输的光都被反射,即便靠近法线方向传输的光也能形成导模,如图 3(b)所示,该导模沿陡峭的“之”字形线路传输,这些模式的前向分量很小,以慢速传输模式沿波导传输。

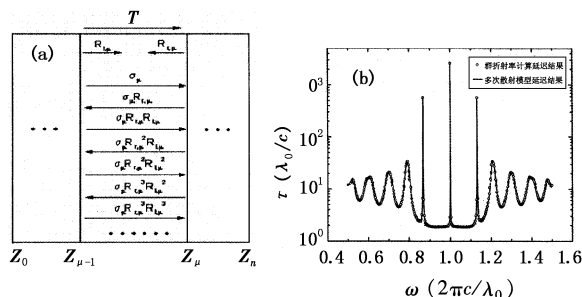


图2 多次散射模型(a)和系统时间延迟比较(b)

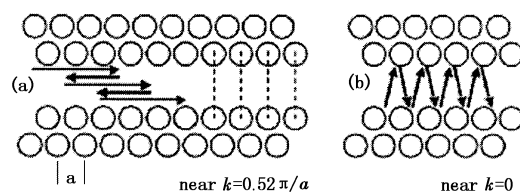


图3 光子晶体波导中形成慢光的两种可能的机理,即后向散射(a)和全反射(b)

总之,光子晶体内的慢光现象是通过导模与周期性晶格之间的共振作用而形成的。在布里渊区附近,经巧妙设计,通过控制对慢光效应起作用的共振态,可望控制减速因子(相速与群速度之比)和带宽。

3 研究现状及主要研究方向

1996 年在一维光子带隙结构中发现光脉冲延迟现象^[15],为基于光子晶体的慢光研究指明了方向。随后,光子晶体慢光技术得到了突飞猛进的发展,主要体现在研究方法和实验上。研究慢光的方法多样化,其中最具有代表性的是等效群折射率推导法^[5]、光子多次反射模型法^[5,10]和数值模拟光脉冲传输法^[13,16-18],这些研究方法对理解慢光的形成及慢光的实际应用都具有重要的指导意义。2005 年,IBM 公司 T. J. Watson 研究中心的 Yuri A. Vla-

sov 和同事们利用集成在硅芯片上的低损耗硅光子晶体波导,将群速度降低为原来的 $1/300$,并能快速而高效地控制群速度^[7],使基于光子晶体的慢光向实际应用迈出了关键性的一步。目前,已报道的最好结果是光子晶体波导静态地实现延迟带宽乘积为 30 ,其带宽可达 2.5THz ^[19]。在实际应用中往往需要光延迟大小可调,材料的热-光效应和电-光效应是较常用的控制光延迟大小的手段。光子晶体在外加电场的作用下将产生 Pockels 效应,引起材料折射率的变化,使光子带隙的位置和宽度可调,如图 4 所示^[13]。

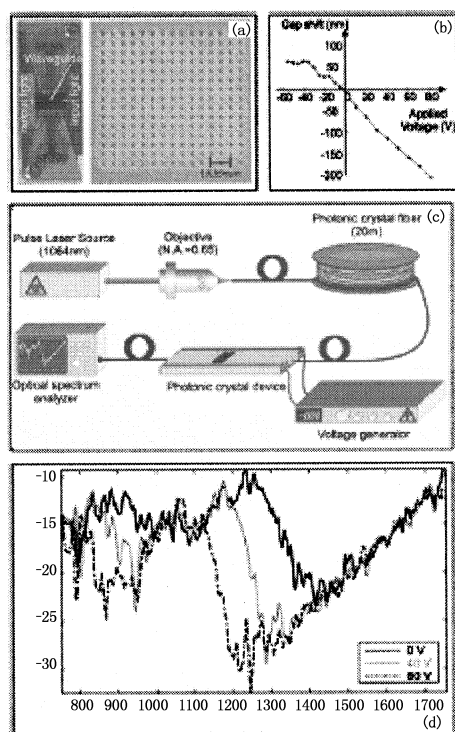


图 4 (a) 光子晶体样品和电极;(b)施加电压与带隙位移关系;
(c)实验装置;(d)施加三个不同电压所得的对应透射谱

虽然用一维、二维和三维光子晶体都可以实现慢光,但是二维光子晶体是目前研究的主要方向。这与一维光子晶体结构相对简单且可控制的结构参数较少,以及高精度的三维光子晶体制作具有较大的挑战性有着直接的关系。而通过在二维光子晶体中引入线缺陷,制作光子晶体波导^[7],人们可通过控制介质周期结构的对称性,介质与空气孔的占空比,材料相对折射率比值以及材料的热-光效应和电-光效应等来控制光子能带结构,从而实现所需要的慢光。由于用静态光子晶体实现慢光具有巨大的局限性,人们开始研究动态光子晶体内的慢光,其

中最具有代表性的是 Stanford 大学的 Shanhui Fan 教授带领的 Fan 研究小组,其研究成果^[20-22]表明,用动态光子晶体可将光脉冲延迟更长,具有更大的应用价值。另外,将受激布里渊散射原理产生慢光的机制^[23]移植到高非线性光子晶体光纤上,也是一个不错的研究方向,旨在增大慢光带宽和提高控制率。

负折射材料中的慢光现象也是一个主要的研究方向。所谓的负折射材料是指介电常数和磁导率同时为负的介质。这个概念最初是由前苏联物理学家 Veselago 提出的^[24],并且他首次注意到因为负折射材料具有强烈的色散,电磁波在负折射材料中传输要经历大的延迟。随着人工光子晶体结构研究的发展,经过特殊设计的光子晶体,在某些波段也具有左手材料的特点^[25]。可以预期,具有负折射率的光子晶体材料中的慢光效应^[26]也将具有广泛的应用。

4 应用前景展望

慢光有很多潜在的应用,其中最引人注目的应用是全光通信中的光信号处理和数据缓存。利用慢光技术实现的光缓存用到全光开关上^[27],可以解决数据包竞争的现象,数值模拟研究表明大通信容量的光分组交换通信网的性能将能得到显著的提高;在数据同步方面,半个到一个脉冲长度延迟足以使脉冲恢复到相应的时隙,从而达到数据再同步。另外,即使是单个脉冲的延迟对于光纤内发生畸变的脉冲串的再生也是非常有益的,数个单脉冲的延迟对量子信息处理可能也是非常有用的。

慢光另一个潜在的应用是光学传感器。用于检测微量物质的光学传感器对于设计安全、工业过程监控和科学研究等领域都是必需的。通过降低光速,能够增强物质结构内电磁场的能量密度,从而光与周围物质的相互作用得到增强,增强的局域场也能够增强化学和生物传感器的整体灵敏度。由于气体或液体被测物能直接流过光子晶体纳米级微孔,使透射谱发生变化,借助光谱分析仪可以分析待测物的成分和含量。

随着新材料研究和现代微加工技术的进展,我们相信通过精心设计光子晶体结构能够动态高效地控制光的传输速度。在不久的将来,慢光技术将用在高速通信网络的中继器和合成孔径雷达的实时延

迟装置中。如果光信号的畸变程度在可接受的范围内,并有足够大的延迟的话,慢光在光缓存器和光存储器中将大有用武之地,性能更优越的全光通信将得以实现。

参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58:20592 – 20562.
- [2] John S. Strong localization of photon in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58: 2486 – 2489.
- [3] D Gauthier. Slow light brings faster communication [J]. Phys. World, 2005, 18(12): 30 – 32.
- [4] D J Gauthier, A L Gaeta, R W Boyd. Slow light: from basics to future prospects [J]. Photonics Spectra, 2006, 44 – 50.
- [5] Zhu Shi-yao, Liu Nian-hua, Zheng Hang, et al. Time delay of light propagation through defect modes of one-dimensional photonic band-gap structures [J]. Opt. Commun., 2000, 174: 139 – 144.
- [6] H Gersen, T J Karle, R J P Engelen et al. Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides [J]. Phys. Rev. Lett., 2005, 94: 073903 – 1 – 4.
- [7] Y A Vlasov, M O'Boyle, H F Hamann, et al. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides [J]. Nature, 2005, 438: 65 – 69.
- [8] Alex Figotin, Ilya Vitebskiy. Slow light in photonic crystals [J]. Waves in Random and Complex Media, 2006, 16(3): 293 – 382.
- [9] Toshihiko Baba, Daisuke Mori. Slow light engineering in photonic crystals [J]. Phys. D: Appl. Phys., 2007, 40: 2659 – 2665.
- [10] T F Krauss. Slow light in photonic crystal waveguides [J]. Phys. D: Appl. Phys., 2007, 40: 2666 – 2670.
- [11] S Y Linn, J G Fleming, D L Hetherington et al. A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths [J]. Nature, 1998, 394: 251 – 253.
- [12] Park S H, Xia Y N. Assembly of mesoscale particles over large areas and its application in fabricating tunable optical filters [J]. Langmuir, 1999, 15(1): 266 – 273.
- [13] Matthieu Roussey, Fadi I Baida, Maria-Pilar Bernal. Experimental and theoretical observations of the slow-light effect on a tunable photonic crystal [J]. Opt. Soc. Am. B, 2007, 24: 1416 – 1422.
- [14] Yablonovitch E. Photonic band-gap structures [J]. Opt. Soc. Am. B., 1993, 10(2): 283 – 295.
- [15] Scalora M, Flyrm R J, Reinhardt S B, et al. Ultrashort pulse propagation at the photonic band edge: large tunable group delay with minimal distortion and loss [J]. Phys. Rev. E, 1996, 54: R1078 – R1081.
- [16] Jian Liu, Bin Shi, Dengtao Zhao, et al. Optical delay in defective photonic bandgap structures [J]. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2002, 4: 636 – 639.
- [17] Tong Yuan-wei, Zhang Ye-wen, He Li, et al. Investigation on abnormal group velocities in 1D coaxial photonic crystals [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(11): 1281 – 1286.
- [18] Daisuke Mori, Toshihiko Baba. Wideband and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide [J]. Opt. Exp., 2005, 13(23): 9398 – 9408.
- [19] M D Settle, R J P Engelen, M Salib, et al. Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and Terahertz bandwidth [J]. Opt. Exp., 2007, 15(1): 219 – 226.
- [20] Mehmet Fatih Yanik, Shanhui Fan. Stopping and storing light coherently [J]. Phys. Rev. A, 2005, 71(1): 013803 – 1 – 10.
- [21] Mehmet F Yanik, Shanhui Fan. Dynamic photonic structures: stopping, storage, and time reversal of light [J]. Studies in Applied Mathematics, 2005, 115: 233 – 253.
- [22] Shanhui Fan. Manipulating light with photonic crystals [J]. Physica B, 2007, 394: 221 – 228.
- [23] Y Okawachi, M S Bigelow, J E Sharping, et al. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber [J]. Phys. Rev. Lett., 2005, 94: 153902.
- [24] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Sov. Phys. Usp., 1968, 10: 509 – 514.
- [25] A Berrier, M Mulot, M Swillo, et al. Negative refraction at infrared wavelengths in a two-dimensional photonic crystal [J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 93(7): 073902.
- [26] E Di Gennaro, P V Pafimi, W T Lu, et al. Slow microwaves in left-handed materials [J]. Phys. Rev. B, 2005, 72: 033110.
- [27] R W Boyd, D J Gauthier, A L Gaeta. Applications of slow light in telecommunications [J]. Optics and Photonics News, 2006, 17: 18 – 23.