

共振吸收波导阵列的原理、特性、制备与应用

周建英 张木栋 黎永耀 刘忆琨

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要 光子晶体、量子光学、超快光学与微纳光学的发展,使得操控光子的发射与传输特性成为可能。综述了具有复折射率周期性调制的共振吸收光子晶格,并着重介绍了共振吸收波导阵列的原理、光学特性、样品制备与应用。

关键词 光子;光子晶格;共振吸收;波导阵列;全息光刻

中图分类号 O431 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0900132

Theory, Properties, Fabrication and Applications of Resonantly Absorbing Waveguide Array

Zhou Jianying Zhang Mudong Li Yongyao Liu Yikun

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract Significant advancement in photonic crystals, quantum optics, ultrafast optics as well as micro-nano-optics gives rise to new opportunities to manipulate the emission and propagation in optical fields. We review the resonantly absorbing photonic lattice created out of materials with complex dielectric index and mainly introduce the theory, properties, fabrication and applications of resonantly absorbing waveguide array in this article.

Key words photon; photonic lattice; resonantly absorbing; waveguide array; holographic lithography

OCIS codes 270.5530; 190.4400; 160.5298; 220.3740

1 引 言

20 世纪,电子学理论与实验的发展把电子技术和信息技术推进到一个前所未有的高度。随着人们对通信的速度、容量和质量需求的提高,受电子固有特性的限制,电光网络中的光电转换速度慢和处理速度低已经成为制约信息技术发展的瓶颈。因此,信息的传输和交换正向全光网络转换。而实现对光子的操控,在可集成的光子器件中实现光场的开关、减速、静止、缓存、光子能量的高速高效转换与信号处理,将是实现全光网络的关键。光子学的主题之一便是实现光子的有效操控。

光子晶体(PC)是不同折射率的介质周期性排列而成的人工微结构,其通过光子带隙和缺陷模可以实现对光子的操控,为光场的精确控制提供了一

个有效的传播媒介。光子晶体的概念自 1987 年 John^[1]和 Yablonovitch^[2]分别提出以来近 30 年间,微纳光子学与光子晶体的研究取得了一系列重要的研究进展。例如利用光子晶体带隙的边缘存在着强烈的线性色散,通过调节二维光子晶体波导的结构,可得到低色散区域的 10 nm 范围内群速度为 $0.02c$ 的慢光^[3];又例如利用非线性效应引起的光子晶体能带或者缺陷模的移动,或者双稳态、光子态密度变化等效效应可实现全光开关^[4~7];而综合利用光子晶体的各种性能,各种光子晶体器件被制作或提出,如大频率范围的光子晶体偏振器^[8,9]、宽带带阻和极窄带选频滤波器^[10~12]、强分光能力的光子晶体超棱镜^[13~15]、高功率发光二极管^[16,17]、光开关^[18,19]、光波导^[20~25]、光存储器和光子频率变换

收稿日期: 2011-07-07; 收到修改稿日期: 2011-07-28

基金项目: 国家 973 计划(2010CB923204)和国家自然科学基金(10934011)资助课题。

作者简介: 周建英(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事共振吸收晶格阵列、超短激光脉冲与超快过程、光场的操控与应用和立体显示等方面的研究。E-mail: stszjy@mail.sysu.edu.cn

器^[26]等,这些光子晶体器件在尺寸和性能上要优于传统的光电器件^[27,28]。本文综述了具有复折射率周期性调制的共振吸收光子晶格,介绍了共振吸收波导阵列的原理、光学特性、样品制备与应用。

2 共振吸收光子晶体及其发展

根据材料特性,光子晶体可分为被动型和主动型。在被动光子晶体中,入射电磁波不与基质介质发生共振极化、吸收或增益等作用,只是通过介电常数的实部实现周期性调制。与这种传统的被动光子晶体不同,通过在结构中掺杂吸收(增益)性介质,如量子点、金属或者染料,可得到具有复折射率周期性调制的功能性主动光子晶体。这种主动光子晶体是一种共振型的非线性光子晶体。

非线性光子晶体已经被证明是一种控制光传输的有效方法,相关的研究已经取得了很大进展^[29~36]。带隙孤子是由光频位于周期结构光子禁带中的光脉冲穿过周期结构所产生的自局域态。利用光子晶体的非线性效应与带隙强烈的群速度色散关系相互作用形成的带隙孤子,能实现超短激光脉冲的减速乃至静止^[29]。但是非线性光子晶体的研究,主流的研究对象都集中在非共振的非线性光学材料克尔或二阶非线性。对于非共振非线性光学,其非线性光学系数较小,需要很大的激发光强度,如克尔效应,其所需峰值功率密度高达 $10^9 \sim 10^{11}$ W/cm²。实验上利用布拉格光纤光栅中的克尔非线性作用与带隙边缘群速度色散的平衡,产生的布拉格光栅孤子可以将皮秒光脉冲减速 50%^[37]。使用带缺陷的布拉格光纤光栅^[38],利用拉曼孤子^[39]和带隙孤子的碰撞^[40]也从理论上预言了静止的超短光孤子的存在。但是,实验中所需的高光强(大于 10 GW/cm²)抽运光限制了该方法的应用。

然而,如果在线性光子晶体中引入共振原子形成共振的非线性光学材料,共振激发时有更大的非线性系数,导致更有效的非线性光与物质相互作用,入射光场的平均功率可以在微瓦到毫瓦量级。共振吸收光子晶体的这种强的非线性效应、快的响应速度和低的工作阈值等优点,以及共振非线性过程会导致一系列如光场局域化^[1]、光子-原子束缚态^[41]等现象,能够对光场特性提供更加有效的操控,因而具有重要的研究价值。常见的共振吸收光子晶体如共振吸收布拉格反射镜(RABR)结构,就是一种共振型的非线性光子晶体^[42~47]。

早在光子晶体概念提出以前,用于锁模激光器

的共振吸收(增益)周期结构分布反馈(DFB)结构^[48~53]从某种意义上讲就是一种增益型的主动光子晶体。1986年,Mantsyzov等^[54,55]研究了一维离散周期性共振介质中的相干自感应透明现象,该结构即是主动型的共振光子晶体,其通过将无限薄的二能级原子层周期性掺入体材料中而形成^[56~63]。随后,特别是1987年光子晶体概念提出来后,掺杂二能级原子层的非线性光子研究相继开展^[64,65]。在Mantsyzov等的工作基础上,Kozhekin等^[42~47]提出了RABR,该结构是在周期排列非吸收介质中周期性地掺入共振二能级原子薄层而形成,如图1所示。Kozhekin等^[42]求出了RABR中孤子的精确解,并发现光脉冲对于任意布拉格发射,都会产生大量静止和移动的带隙孤子并具有相应的解析解,这意味着可利用这种机制实现光存储。与均匀介质中自感应透明现象不同^[66,67],RABR中产生的孤子具有任意脉冲面积^[42]。与均匀二阶非线性介质中存在稳定亮孤子和不稳定的暗孤子不同^[68],有主动原子层的RABR结构是第一个同时存在稳定亮、暗孤子的模型。这些关于RABR的研究基本上都局限在讨论孤子解的存在性及其性质。



图1 RABR结构示意图(白色为共振吸收原子层,灰色、黑色为周期排列的无吸收被动介质)

Fig. 1 Schematic diagram of RABR, where the white part represents the thin layers of two-level atom, gray and black parts are non-absorbent passive media

而关于超短脉冲在共振周期结构中的演化问题也得到了广泛研究^[69~71],理论上实现了对超短脉冲激光的减速、存储与受控释放^[72]。在RABR结构基础上,共振放大布拉格反射镜(RAmBR)^[73]结构和双共振吸收布拉格反射镜(DRBR)^[74]被提出并得到深入研究。共振吸收光子晶体已经在光器件中得到广泛的应用^[75~77]。但由于RABR结构不但需要共振吸收二能级原子共振中心、结构周期和入射波长三者相匹配,而且样品的制备困难,因而限制了其应用。

共振吸收光子晶体扩展到二、三维共振吸收光子晶体,通过反填充技术,在光子晶体的空隙中填入量子点^[78,79]或者金属^[80]材料制备。与一维的RABR等结构不同,二维的共振光子晶格阵列,如共振吸收波导阵列(RAWA)^[81,82]结构、反相非线性

晶格波导结构^[83]等是一类光传输方向与周期结构排列平行的波导阵列,图2为RAWA结构。

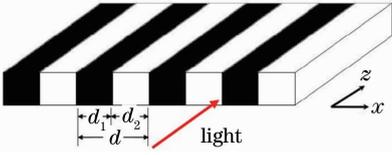


图2 RAWA结构(黑色表示共振吸收的主动层,白色表示无吸收的被动层)

Fig.2 Schematic diagram of RAWA, where the black areas are the active media and the white areas are the background media

3 共振吸收波导阵列

光学晶格波导阵列最初来源于由光纤耦合而成的一维的耦合波导阵列,该模型最早由 Jones 在 1965 年提出^[84]。1988 年,Christodoulides 等^[85,86]通过引入非线性效应,从理论上预言了这种耦合波导阵列中离散孤子的存在,并推导出了著名的离散非线性薛定谔方程(DNLSE)。此后,在非线性和耦合阵列波导中的离散孤子研究得到广泛的开展。在 1998 年,Eisenberg 等^[87]在利用 GaAs 所制成的波导阵列中观测到离散孤子之后,使得非线性耦合阵列波导和离散孤子这一课题受到更多的关注^[88~90]。最近一类光传输方向与周期结构排列平行的共振吸收光子晶格阵列受到关注,如 RAWA^[81]、反相非线性晶格波导结构^[83]等。本课题组在该类共振波导阵列结构研究中取得了一系列重要的理论成果,如 RAWA 结构的线性衍射效应、非线性共振波导阵列在电磁感应透明作用下的准离散孤子^[91]、反相非线性晶格波导中晶格孤子连续的对称性自发破缺等。在实验上,利用全息光刻制备技术和反填充技术,结合衍射光学元件作为分光元件,制备出了高质量的二维 RAWA 结构^[82]。

3.1 共振吸收波导阵列原理与特性

一维 RAWA 结构如图 2 所示,图中黑色部分表示主动介质层,白色部分表示无吸收的背景材料,取波导阵列的周期 $d=2.86 \mu\text{m}$,其主动层厚度 $d_1=0.5d$, x 方向为周期方向, z 方向为光场传播方向。由 Maxwell 方程组可得光在一维 RAWA 中的传播满足

$$i \frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{1}{2k} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \left(k_0 \Delta n + \frac{i\alpha}{2} \right) V(x) E, \quad (1)$$

式中 $k = k_0 n$, n 是背景介质的折射率, k_0 是电磁波在真空中的波数。 α 是主动介质的吸收系数,并假定吸收线型是洛伦兹分布。 Δn 是经 Kramers-Kronig

(K-K)关系计算的相应的折射率实部变化。根据 K-K 关系,主动材料的吸收会引起其实部折射率的变化,因而对于吸收峰两侧附近的入射波长,RAWA 系统会成为一个折射率周期分布的波导系统。 $V(x)$ 是周期调制函数,黑色部分的主动介质代表 $V(x)=1$,白色部分的背景介质代表 $V(x)=0$ 。

假定一维 RAWA 中的主动介质的吸收线型是洛伦兹分布的,并令 λ_0 是吸收中心, A/B^2 是吸收系数的最大值, $2B$ 为线宽,则

$$\alpha = \frac{A}{(\lambda - \lambda_0)^2 + B^2}. \quad (2)$$

在模拟中,取 $\lambda_0 = 564 \text{ nm}$, $A=1.3 \times 10^{-5} \mu\text{m}$, $B=5 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 。 α 与 Δn 的对应关系如图 3 所示,在共振吸收中心附近, Δn 有着剧烈的变化,RAWA 就成为一个折射率依赖的波导系统,对于共振吸收中心两侧的入射光波,系统将会选择相应的高折射率层作为导波层。

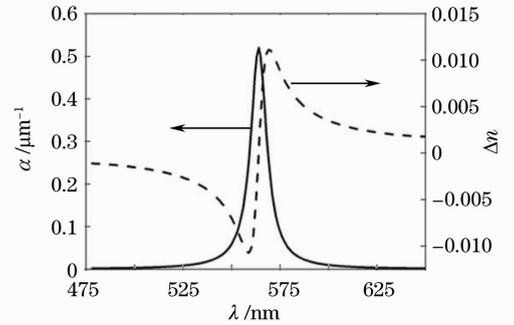


图3 α 与 Δn 的对应关系

Fig.3 α versus Δn

在模拟中,分别入射波长 $\lambda_1 = 554 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 574 \text{ nm}$ 的高斯光束。对于光波 $\lambda_1 = 554 \text{ nm}$,RAWA 的主动层 Δn 为负,折射率减小,系统会选择被动背景层作为导波层,如图 4(a) 所示;而对于光波 $\lambda_2 = 574 \text{ nm}$,由于 Δn 为正,RAWA 的主动层折射率增大,系统会选择主动层作为导波层,如图 4(b) 所示。根据衍射理论,衍射场的分布是光场的傅里叶变换。定义一阶衍射效率 η 为一阶衍射强度与入射光强的比值。则对于 $\lambda_0 = 564 \text{ nm}$,由于其 Δn 为 0, η 由 α 决定;对于 $\lambda_1 = 554 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 574 \text{ nm}$, η 由 α 与 Δn 共同决定。如图 4(c) 所示,随着 RAWA 厚度的增加,在共振吸收中心会形成一个衍射烧孔,并且随着 RAWA 厚度的增大会越来越深。理论模拟结果表明,对于某个固定的入射波长来说,一阶衍射效率 η 随着厚度的增加先增大后减少,如图 4(d) 所示。峰值的大小和位置由 α 与 Δn 决定。

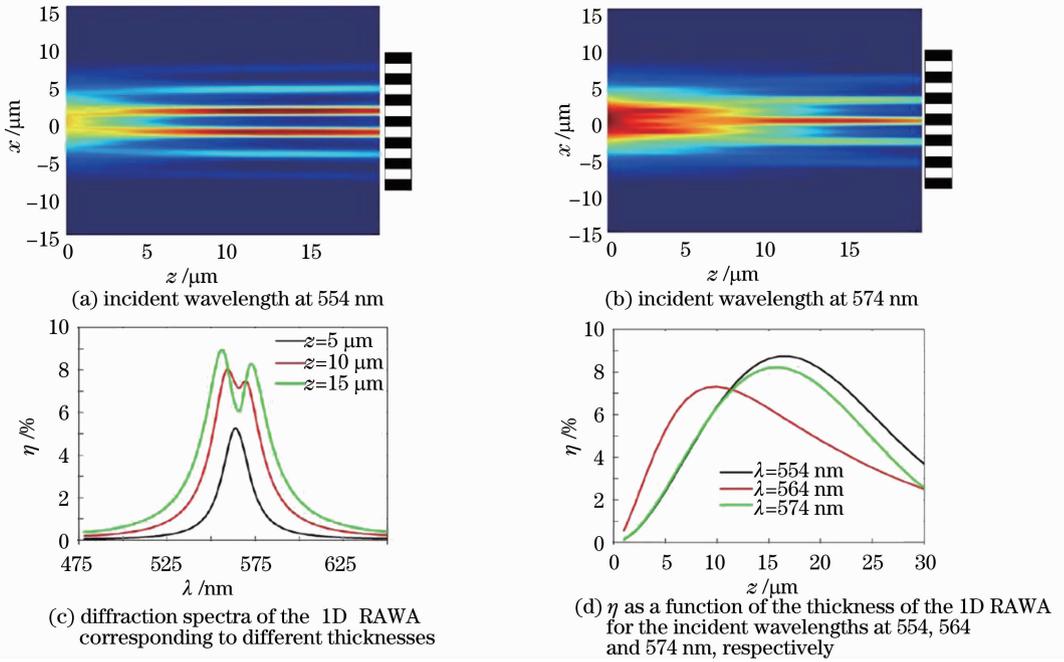


图 4 光波在一维 RAWA 中传播

Fig. 4 Propagation of light in the 1D RAWA

在对 RAWA 结构的线性衍射效应进行研究的基础上,假设在被动介质中掺入主动的共振多能级原子,并利用电磁感应透明技术(EIT)^[92,93]以及该技术中的增强自克尔效应^[94]和巨克尔效应^[95],制作出一种基于共振多能级原子系统的共振波导阵列。研究表明,这种波导阵列可以支持弱光孤子的传输^[91]。此外,通过调节探测光场和能级间的失谐量,可以实现一种由高非线性折射率的光疏媒质与低非线性折射率的光密媒质所组合成的反相非线性晶格阵列波导^[83],其结构如图 5(a)所示。这种晶格结构的特点是晶格的折射率调制和非线性折射率的调制互为反相,其结果导致了晶格的线性和非线性

效应存在竞争关系。研究表明,光场所形成的孤子在反相非线性晶格阵列波导的传输具有敏感的功率依赖关系,线性和非线性的竞争更使得孤子出现多次相变及多次的对称性自发破缺^[96,97]。假设在传输方向上非均匀的掺杂主动原子,进一步提出了一种特殊的波导结构,这种波导的特点就是类似一种棋盘的结构,如图 5(b)所示^[91],研究表明,该结构在一定的阈值时可以支持孤子的传输。特别地,当入射中心偏离系统的对称点时,孤子将呈现折线传输。其机理则是由于对称性自发破缺使得孤子产生一种横向的传输动量,使得孤子呈现折线传输。

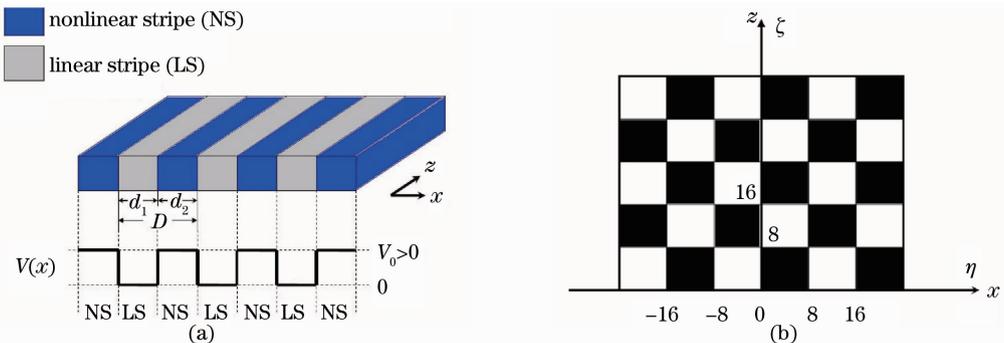


图 5 (a) 反相非线性晶格波导(黑色为非线性所在区域波导,灰色为线性介质区域波导);(b)棋盘波导结构(黑色为主动原子所在区域,白色为被动介质所在区域)

Fig. 5 (a) Inversed nonlinear waveguide, the black and gray slabs represent the nonlinear and linear stripes, respectively; (b) checkerboard system, the black areas are the active media, and the white areas are the background media

3.2 共振吸收波导阵列的制备与表征

2010年,本课题组通过利用高质量的衍射光学元件(DOE)作为分光元件,结合全息光刻和反填充技术,简单快捷地制作了掺杂激光染料若丹明B(RhB)的二维共振吸收光子晶格阵列^[81,82],亦称为虚部折射率光子晶格。在光路中通过利用高质量的DOE作为分光元件,实现多光束相位可控的全息光刻,在SU-8光刻胶上曝光得到RAWA模板,然后在模板中反填充激光染料制得RAWA样品,如图6(a)所示。在染料的共振吸收区,由于K-K关系的影响,掺杂了染料的区域和没掺杂染料的区域将产生一个折射率差,因此波长处于RhB染料的共振吸收区的光波将感受到一个光子晶格的调制,但是对于波长远离共振吸收区的光波来说,此样品相当于一块体材料。

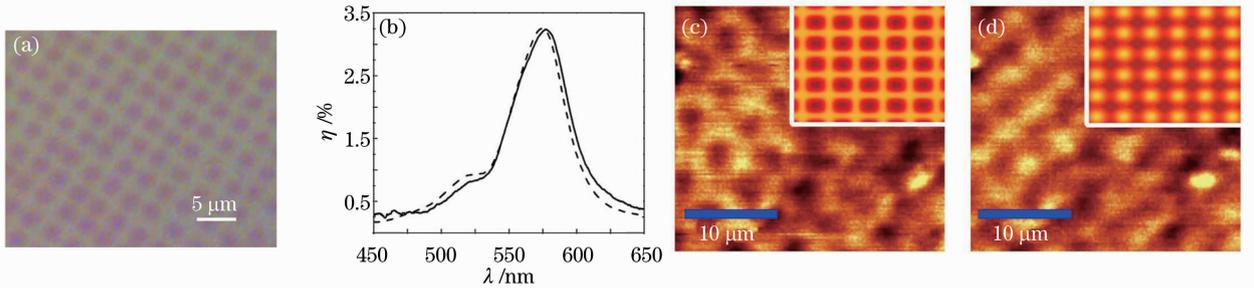


图6 (a)经过反填充后形成的RAWA结构的显微镜图;(b)RAWA结构的衍射谱的理论模拟(虚线)与实验测量(实线)结果;(c)入射波长 $\lambda_1 = 547$ nm和(d) $\lambda_2 = 581$ nm,二维RAWA样品在出射端的光场分布(相应的理论计算结果作为小插图分别附在其中)

Fig.6 (a) Microscopic image of the structure after back-filling to create the resonantly absorbing waveguide array; (b) numerical simulation (dashed line) and experimental result (solid line) of RAWA. Distributions of the light field with the wavelength (c) $\lambda_1 = 547$ nm and (d) $\lambda_2 = 581$ nm in the end-facet for a 2D experimental RAWA. The insets in each figure are numerical results

3.3 共振吸收波导阵列应用

波导阵列是一种具有重要研究价值的周期性结构,具有诸如离散衍射^[98]、异常折射^[99]、光学布洛赫振荡^[100]、齐纳隧穿效应^[101]、离散和晶格孤子^[102]等许多新奇的物理现象。传统的波导阵列,都是由周期性极化铌酸锂(PPLN)、光折变晶体^[103,104]、液晶等^[105~107]被动材料组成的,而主动材料比被动材料有更丰富的色散特性,在光场控制上能够提供更多的自由度,并且具有强的非线性效应、快的响应速度和低的工作阈值等优点。RAWA结构在偏离材料吸收峰时等同于一块结构均匀的体材料,而在特定波段和光强作用下又表现出光子晶格的性质,这种二象性在高速量子信息处理以及光子缓存等领域有广泛应用价值。而光脉冲在RAWA中传播时出现的时空分离特性,在带通滤波、波分复用、全光开关、

利用近场扫描聚焦显微镜结合可调谐激光光源(Opium Auto 100, Radiants Light S. L.),测量了在二维RAWA样品出射端的光场分布。图6(c),(d)是实验所测量的结果,相应的理论计算也附在其中,显示出了很好的相符效果。图6(b)为该样品一阶衍射效率的 η ,理论模拟值和实验测量值分别用虚线和实线表示,曲线表明了二维RAWA样品的折射率对波长的依赖特性。理论曲线与实验所测数据相吻合,验证了本课题组理论模拟的可靠性。由曲线可知,对于RhB吸收材料,K-K关系导致的折射率实部变化的最大值在吸收峰的两边,因此导致衍射谱的峰值偏离染料RhB的吸收峰。当样品长度很小时,由这种折射率实部差所导致的也就不明显,样品的长度越大,其衍射谱相对吸收材料的吸收光谱的偏离越大。

可调光学延迟线等光学器件中将会有潜在的应用价值。此外,利用RAWA结构的时空分离特性,可以设计出一种分光器件,入射的白光可被分成红绿蓝三基色,可望在显示领域得到应用。

4 结 论

概述了各种类型共振波导阵列的光传输特性,对RAWA结构做了较为详细全面的介绍。与RABR结构相比,目前对于RAWA结构研究主要集中在线性领域的衍射效应以及非线性领域孤子,其更多的光学特性如缺陷对孤子的调控等还有待进一步挖掘与探讨。

光子的精密操控需解决的关键问题是设计与制备有效的光子器件。人们在共振吸收光子晶体样品

的制备方面做出了巨大努力,取得了一系列重要研究进展。一维的共振吸收光子晶体较成熟的方法是分子束外延生长法^[108]掺入吸收原子层。结合全息光刻技术和反填充技术,可以简单快捷地制作二维共振吸收波导阵列,但是结构厚度较小。随着制备技术的不断提高,理论研究的不断深入,共振吸收光子晶体以其丰富的光学特性,有望在光子操控领域发挥重要的作用。

致谢 感谢以色列魏兹曼研究所 Gershon Kurizki 教授、以色列特拉维夫大学 Boris A. Malomed 教授、英国 St. Andrews 大学的 Thomas F. Krauss 教授、李俊韬博士、香港科技大学 K. S. Wong 教授,以及冯铭能、肖万能、程静等为该项目做出的贡献。

参 考 文 献

- 1 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattice [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 2 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 3 L. H. Frandsen, A. V. Lavrinenko, J. Fage-Pedersen *et al.*. Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9444~9450
- 4 M. Scalora, J. P. Dowling, C. M. Bowden *et al.*. Optical limiting and switching of ultrashort pulses in nonlinear photonic band gap materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(10): 1368~1371
- 5 P. Tran. Optical limiting and switching of short pulses by use of a nonlinear photonic bandgap structure with a defect [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(10): 2589~2595
- 6 M. Soljacic, M. Ibanescu, S. G. Johnson *et al.*. Optimal bistable switching in nonlinear photonic crystals [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(5): 055601
- 7 P. M. Johnson, A. F. Koenderink, W. L. Vos. Ultrafast switching of photonic density of states in photonic crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **66**(8): 081102
- 8 S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada *et al.*. Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design [J]. *Science*, 2001, **293**(5532): 1123~1125
- 9 D. R. Solli, C. F. McCormick, R. Y. Chiao *et al.*. Photonic crystal polarizers and polarizing beam splitters [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(12): 9429~9431
- 10 S. Gupta, G. Tuttle, M. Sigalas *et al.*. Infrared filters using metallic photonic band gap structures on flexible substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(17): 2412~2414
- 11 W. Suh, S. Fan. Mechanically switchable photonic crystal filter with either all-pass transmission or flat-top reflection characteristics [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1763~1765
- 12 H. Takano, Y. Akahane, T. Asano *et al.*. In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(13): 2226~2228
- 13 H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita *et al.*. Superprism phenomena in photonic crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(16): 10096~10099
- 14 H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita *et al.*. Superprism phenomena in photonic crystals: toward microscale lightwave circuits [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11): 2032~2038
- 15 T. Baba, M. Nakamura. Photonic crystal light deflection devices using the superprism effect [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(7): 909~914
- 16 S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos *et al.*. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(17): 3294~3297
- 17 Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diode with photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 233~236
陈 健, 王庆康, 李海华. 光子晶体结构参数的随机扰动对光子晶体 LED 出光效率的研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 233~236
- 18 P. Tran. Optical switching with a nonlinear photonic crystal: a numerical study [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(15): 1138~1140
- 19 Tan Chunhua, Huang Xuguang. An all-optical switch based on the tunable bandgap of a two-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2714~2718
谭春华, 黄旭光. 基于带隙可调的二维光子晶体全光开关 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2714~2718
- 20 A. Mekis, J. C. Chen, I. Kurland *et al.*. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(18): 3787~3790
- 21 J. D. Joannopoulos, F. Villeneuve Pierre, S. Fan. Photonic crystals: putting a new twist on light [J]. *Nature*, 1997, **386**(6621): 143~149
- 22 S. Y. Lin, E. Chow, V. Hietala *et al.*. Experimental demonstration of guiding and bending of electromagnetic waves in a photonic crystal [J]. *Science*, 1998, **282**(5387): 274~276
- 23 R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.*. Single mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
- 24 A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee *et al.*. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11): 711~713
- 25 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**(7064): 65~69
- 26 T. F. Krauss, R. M. De La Rue. Photonic crystals in the optical regime past, present and future [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 1999, **23**(2): 51~96
- 27 M. Soljačić, J. D. Joannopoulos. Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals [J]. *Nature Materials*, 2004, **3**(4): 211~219
- 28 S. McNab, N. Moll, Y. Vlasov. Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(22): 2927~2939
- 29 R. E. Slusher, B. J. Eggleton. *Nonlinear Photonic Crystals* [M]. Berlin: Springer Press, 2003
- 30 M. Scalora, J. P. Dowling, C. W. Bowden *et al.*. The photonic band edge optical diode [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(4): 2023~2026
- 31 H. G. Winful, J. H. Marburger, E. Garmire *et al.*. Theory of bistability in nonlinear distributed feedback structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**(5): 379~381
- 32 W. Chen, D. L. Mills. Optical response of nonlinear multilayer structures: bilayers and superlattices [J]. *Phys. Rev. B*, 1987, **36**(12): 6269~6278
- 33 Q. Li, C. T. Chan, K. M. Ho *et al.*. Wave propagation in

- nonlinear photonic bandgap materials [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **53**(23): 15577~15585
- 34 E. Lidorikis, C. M. Soukoulis. Pulse-driven switching in one-dimensional nonlinear photonic band gap materials; a numerical study [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **61**(5): 5825~5829
- 35 A. V. Andreev, A. V. Balakin, I. A. Ozheredov *et al.*. Compression of femtosecond laser pulses in thin one-dimensional photonic crystals [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **63**(1): 016602
- 36 F. Schreier, O. Bryngdahl. Femtosecond pulse shaping with a stratified diffractive structure [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **185**(4-6): 227~231
- 37 B. J. Eggleton, R. E. Slusher, C. M. Sterke *et al.*. Bragg grating solitons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(10): 1627~1630
- 38 R. H. Goodman, R. E. Slusher, M. I. Weinstein. Stopping light on a defect [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(7): 1635~1652
- 39 H. G. Winful, V. Perlin. Raman gap solitons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(16): 3586~3589
- 40 W. C. K. Mak, B. A. Malomed, P. L. Chu. Formation of a standing-light pulse through collision of gap solitons [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **68**(2): 026609
- 41 A. G. Kofman, G. Kurizki, B. Sherman. Spontaneous and induced atomic decay in photonic band structures [J]. *J. Mod. Opt.*, 1994, **41**(2): 353~384
- 42 A. E. Kozhokin, G. Kurizki, B. Malomed. Standing and moving gap solitons in resonantly absorbing gratings [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(17): 3647~3650
- 43 T. Opatrny, B. A. Malomed, G. Kurizki. Dark and bright solitons in resonantly absorbing gratings [J]. *Phys. Rev. E*, 1999, **60**(5): 6137~6149
- 44 G. Kurizki, D. Petrosyan, T. Opatrny *et al.*. Self-induced transparency and giant nonlinearity in doped photonic crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9): 2066~2074
- 45 A. Kozhokin, G. Kurizki. Self-induced transparency in Bragg reflectors: gap solitons near absorption resonances [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(25): 5020~5023
- 46 M. Blaauboer, G. Kurizki, B. A. Malomed. Spatiotemporally localized solitons in resonantly absorbing Bragg reflectors [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(1): 57~59
- 47 J. Zhu, J. Y. Zhou, J. Cheng. Moving and stationary spatial-temporal solitons in a resonantly absorbing Bragg reflector [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 7133~7138
- 48 H. Kogelnik, C. V. Shank. Stimulated emission in a periodic structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(4): 152~154
- 49 C. V. Shank, J. E. Bjorkholm, H. Kogelnik. Tunable distributed-feedback dye laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(9): 395~396
- 50 H. Kogelnik, C. V. Shank. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(5): 2327~2335
- 51 J. E. Ehrlich, G. Assanto, G. I. Stegeman. All-optical tuning of waveguide nonlinear distributed feedback gratings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(7): 602~604
- 52 Y. H. Liao, H. G. Winful. Dynamics of distributed-feedback fiber lasers; effect of nonlinear refraction [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(7): 471~473
- 53 H. J. Wunsche, S. Bauer, J. Kreissl *et al.*. Synchronization of delay-coupled oscillators; a study of semiconductor lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(16): 163901
- 54 B. I. Mantsyzov, R. N. Kuzmin. Coherent interaction of light with a discrete periodic resonant medium [J]. *Sov. Phys. JETP*, 1986, **64**(1): 37~44
- 55 B. I. Mantsyzov, I. V. Mel'nikov, J. S. Aitchison. Controlling light by light in a one-dimensional resonant photonic crystal [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(5): 055602
- 56 J. P. Prineas, C. Ell, E. S. Lee *et al.*. Exciton-polariton eigenmodes in light-coupled $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{As}/\text{GaAs}$ semiconductor multiple-quantum-well periodic structures [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(20): 13863~13872
- 57 Xiao Wanneng, Zhao Qi, Wang Weijiang *et al.*. Linear optical absorption properties and internal electromagnetic field distributions of periodic multiple quantum wells [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(9): 2293~2297
肖万能, 赵 霁, 王维江等. 周期多量子阱结构的光吸收特性与电场分布 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(9): 2293~2297
- 58 J. P. Prineas, J. Y. Zhou, J. Kuhl *et al.*. Ultrafast ac Stark effect switching of the active photonic band gap from Bragg-periodic semiconductor quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(23): 4332~4334
- 59 L. I. Deych, A. A. Lisyansky. Polariton dispersion law in periodic-Bragg and near-Bragg multiple quantum well structures [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(7): 4242~4244
- 60 C. Conti, G. Assanto, S. Trillo. Gap solitons and slow light [J]. *J. Nonlinear Opt. Phys. & Mat.*, 2002, **11**(3): 239~259
- 61 A. Andre, M. D. Lukin. Manipulating light pulses via dynamically controlled photonic band gap [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(14): 143602
- 62 B. I. Mantsyzov, R. A. Silnikov. Oscillating gap 2π pulse in resonantly absorbing lattice [J]. *JETP Letters*, 2001, **74**(9): 456~459
- 63 B. I. Mantsyzov, R. A. Silnikov. Unstable excited and stable oscillating gap 2π pulses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9): 2203~2207
- 64 B. Luo, Y. T. Hong, C. Sien. Numerical investigation of a self-induced transparency soliton in a nonlinear photonic bandgap structure doped uniformly with two-level atoms [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 1866~1874
- 65 N. Akozbek, S. John. Self-induced transparency solitary waves in a doped nonlinear photonic band gap material [J]. *Phys. Rev. E*, 1998, **58**(3): 3876~3895
- 66 S. L. McCall, E. L. Hahn. Self-induced transparency [J]. *Phys. Rev.*, 1969, **183**(2): 457~485
- 67 S. L. McCall, E. L. Hahn. Pulse-area-pulse-energy description of a traveling-wave laser amplifier [J]. *Phys. Rev. A*, 1970, **2**(3): 861~870
- 68 Y. S. Kivshar, B. Luther-Davies. Dark optical solitons: physics and applications [J]. *Phys. Rep.*, 1998, **298**(2-3): 81~197
- 69 J. Y. Zhou, J. H. Zeng, J. T. Li. Quantum coherent control of ultrashort laser pulses [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(5): 652~658
- 70 J. Zhao, J. T. Li, H. G. Shao *et al.*. Reshaping ultrashort light pulses in resonant photonic crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(9): 1981~1987
- 71 W. N. Xiao, J. Y. Zhou, J. P. Prineas. Storage of ultrashort optical pulses in a resonantly absorbing Bragg reflector [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24): 3277~3283
- 72 J. Y. Zhou, H. G. Shao, J. Zhao *et al.*. Storage and release of femtosecond laser pulse in a resonant photonic crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(12): 1560~1562
- 73 J. H. Zeng, J. Y. Zhou, G. Kurizki *et al.*. Generation of a self-pulsed picosecond solitary wave train from a periodically amplifying Bragg structure [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(1): 011803
- 74 J. T. Li, J. Y. Zhou. Nonlinear optical frequency conversion with stopped short light pulses [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2811~2816
- 75 Zhou Jianying, Zhu Jian, Li Juntao *et al.*. Deceleration, storage

- and release of ultrashort optical pulses [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(12): 14
- 周建英, 朱 健, 李俊韬等. 超短激光脉冲的减速、存储和受控释放 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(12): 14
- 76 I. V. Melnikov, J. S. Aitchison. Gap soliton memory in a resonant photonic crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(20): 201111
- 77 Li Juntao, Zhou Jianying. Nonlinear frequency conversion of zero-velocity ultrashort pulse [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(2): 8
- 李俊韬, 周建英. 零速超短激光脉冲非线性光学频率转换 [J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(2): 8
- 78 A. Kaso, S. John. Nonlinear Bloch waves in resonantly doped photonic crystals [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **74**(4): 046611
- 79 P. D. Garcia, Á. Blanco, A. Shavel *et al.*. Quantum dot thin layers templated on ZnO inverse opals [J]. *Adv. Mater.*, 2006, **18**(20): 2768~2772
- 80 W. Y. Zhang, X. Y. Lei, Z. L. Wang *et al.*. Robust photonic band gap from tunable scatterers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(13): 2853~2856
- 81 M. N. Feng, Y. K. Liu, Y. Y. Li *et al.*. Light propagation in a resonantly absorbing waveguide array [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(8): 7222~7229
- 82 J. T. Li, B. Liang, Y. K. Liu *et al.*. Photonic crystal formed by the imaginary part of refractive index [J]. *Adv. Mater.*, 2010, **22**(24): 2676~2679
- 83 Y. Y. Li, B. A. Malomed, M. N. Feng *et al.*. Double symmetry breaking of solitons in one-dimensional virtual photonic crystals [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(5): 053832
- 84 A. L. Jones. Coupling of optical fibers and scattering in fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(3): 261~269
- 85 D. N. Christodoulides, R. I. Joseph. Discrete self-focusing in nonlinear arrays of coupled waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(9): 794~796
- 86 Y. S. Kivshar, M. Peyrard. Modulational instabilities in discrete lattices [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, **46**(6): 3198~3205
- 87 H. S. Eisenberg, Y. Silberberg, R. Morandotti *et al.*. Discrete spatial optical solitons in waveguide arrays [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(16): 3383~3386
- 88 R. Morandotti, U. Peschel, J. S. Aitchison *et al.*. Dynamics of discrete solitons in optical waveguide arrays [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(14): 2726~2729
- 89 H. S. Eisenberg, Y. Silberberg, R. Morandotti *et al.*. Diffraction management [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(9): 1863~1866
- 90 A. A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar. Slow-light optical bullets in arrays of nonlinear Bragg-grating waveguides [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(23): 233901
- 91 Y. Y. Li, B. A. Malomed, M. N. Feng *et al.*. Arrayed and checkerboard optical waveguides controlled by the electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **82**(6): 063823
- 92 K. J. Boller, A. Imamoglu, S. E. Harris. Observation of electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(20): 2593~2596
- 93 M. Fleischhauer, A. Imamoglu, J. P. Marangos. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2005, **77**(2): 633~673
- 94 W. Hai, D. Goorskey, X. Min. Enhanced Kerr nonlinearity via atomic coherence in a three-level atomic system [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(7): 073601
- 95 H. Schmidt, A. Imamoglu. Giant Kerr nonlinearities obtained by electromagnetically induced transparency [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(23): 1936~1938
- 96 J. E. Lye, L. Fallani, M. Modugno *et al.*. Bose-Einstein condensate in a random potential [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(7): 070401
- 97 M. Matuszewski, B. A. Malomed, M. Trippenbach. Spontaneous symmetry breaking of solitons trapped in a double-channel potential [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(6): 063621
- 98 T. Pertsch, T. Zentgraf, V. Peschel *et al.*. Anomalous refraction and diffraction in discrete optical systems [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(9): 093901
- 99 T. Pertsch, U. Peschel, F. Lederer *et al.*. Discrete solitons in quadratic nonlinear waveguide arrays [C]. OSA Trends in Optics and Photonics, 2002, **80**: NLTuA1
- 100 U. Peschel, T. Pertsch, F. Lederer. Optical Bloch oscillations in waveguide arrays [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 1701~1703
- 101 H. Trompeter, T. Pertsch, F. Lederer *et al.*. Visual observation of Zener tunneling [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(2): 023901
- 102 F. Lederer, G. I. Stegeman, D. N. Christodoulides *et al.*. Discrete solitons in optics [J]. *Phys. Rep.*, 2008, **463**(1-3): 1~126
- 103 N. K. Efremidis, S. Sears, D. N. Christodoulides *et al.*. Discrete solitons in photorefractive optically induced photonic lattices [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(4): 046602
- 104 J. D. Liou, C. K. Lee, K. C. Wu. Photorefractive crystal-based holographic interferometry system for full-field wave propagation metrology [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(9): 5460~5472
- 105 A. Fratallocchi, G. Assanto, K. A. Brzdkiewicz *et al.*. Discrete propagation and spatial solitons in nematic liquid crystals [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(13): 1530~1532
- 106 A. Fratallocchi, G. Assanto, K. A. Brzdkiewicz *et al.*. Discrete light propagation and self-trapping in liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6): 1808~1815
- 107 G. Assanto, A. Fratallocchi, M. Peccianti. Spatial solitons in nematic liquid crystals: from bulk to discrete [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 5248~5259
- 108 J. P. Prineas, C. Cao, W. Yildirim *et al.*. Resonant photonic band gap structures realized from molecular-beam-epitaxially grown InGaAs/GaAs Bragg-spaced quantum wells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(6): 063101