

椭圆柱微腔光子晶体耦合腔波导的慢光特性研究

李长红¹ 万 勇² 毛强明¹

¹青岛大学自动化工程学院, 山东 青岛 266071

²青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071

摘要 采用大介质柱和椭圆介质柱环绕微腔结构构成光子晶体耦合腔光波导(PC-CROW),在获得慢光的同时,其缓存特性也获得了提高。当普通介质柱半径为 $0.25a$ (a 为光子晶体晶格常数),环绕微腔圆形大介质柱半径为 $0.35a$ 时,得到小于 $2.37\times 10^{-4}c$ (c 为真空中的光速)的导模群速度,这比均匀介质柱微腔波导的最大群速度减小了一个数量级,存储容量也有所下降;考虑到缓存性能,为了进一步改善PC-CROW的慢光性能和缓存特性,将环绕微腔大介质柱椭圆化,在椭圆长轴为 $0.42a$,短轴为 $0.20a$ 时,获得导模群速度小于 $2.3053\times 10^{-4}c$,存储容量达到9.8214 bit,品质因子 Q 也达到了最大值3575.1。

关键词 材料;慢光;缓存能力;光子晶体;耦合腔光波导

中图分类号 TN202;TN203

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0416002

Research of Slow Light Performances of Photonic Crystal Coupled Resonator Optical Waveguides Formed by Oval Rods Cavities

Li Changhong¹ Wan Yong² Mao Qiangming¹

¹College of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

²College of Physics, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract Slow light propagation and improved performance buffering properties are obtained from photonic crystal coupled resonator optical waveguides formed by enlarged and oval rods surrounded cavities. As the radius of bulk circular rods is $0.25a$ (a is a lattice constant) and radius of enlarged rods is $0.35a$, the group velocity of guided mode less than $2.37\times 10^{-4}c$ (c is the light speed in the vacuum) is obtained. Compared with that in homogeneous rods cavity waveguide, the maximum group velocity decreases one order magnitude. Simultaneously, buffer capacity decreases as well. Considering the buffer performances, the enlarged rods are developed into ovals to further improve the slow light properties and buffer performances. When the long axis of oval rods is $0.42a$ and short axis is $0.20a$, the group velocity of guided mode less than $2.3053\times 10^{-4}c$ is obtained, and the buffer capacity arrives at 9.8214 bit. Q factor also reaches the maximum value 3575.1.

Key words materials; slow light; buffer capability; photonic crystal; coupled resonator optical waveguide

OCIS codes 160.5298; 130.5296; 210.4680

1 引 言

近年来具有低群速度的慢光传输倍受关注,它在光延迟线^[1]、全光缓存^[2]、光逻辑^[3]和加强光与物质相互作用^[4]等方面具有潜在应用,这些都是在全光通信和全光信息处理方面的关键部件。其中,基于光子晶体的慢光结构具有独特的微纳结构^[5-6],便于实现光集成,在紧凑型光延迟和光缓存器件中有潜在应用;光子晶体慢光来自于光子晶体微结构的多次反射、散射、衍射等,所产生的慢光特性可经结构设计进行灵活的控制和调整,并且,光子晶体慢光可以在室温下运行,这是其他机制的慢光^[7-8]无可比拟的优势。为了获得更高性能

收稿日期: 2014-10-10; 收到修改稿日期: 2014-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61307050, 11144007)、山东省基金项目(BS2012CL012)

作者简介: 李长红(1973—),女,博士,副教授,主要从事宽带通信网、光纤通信与光子晶体及慢光缓存等方面的研究。

E-mail: jiluch@126.com

的慢光传输,在实验和理论上进行了许多成功的光子晶体慢光研究^[9-11]。与光子晶体线缺陷波导(PCW)相比,光子晶体耦合腔波导(PC-CROW)承载的导模色散曲线更加平坦,能支持更慢传输群速度^[12-13],用于光延迟、光缓存和光存储时,可以提高缓存性能。

在实际的慢光应用系统,至少要满足两个基本要求:1)系统带宽足够承载信号脉冲;2)被延迟的信号脉冲畸变小,不影响携带信息的正确传输。这就要求用于缓存或者存储的慢光系统具有一定的慢光带宽并且保持比较小的群速度色散(GVD)。实际上,由于在波导慢光区大的群速度色散和高阶色散,使得带宽和慢光有效群折射率(慢光群速度)之间存在一个折中互换关系^[5-6],这就要求在结构设计中,权衡器件所需的缓存需求和带宽、色散关系,取相对较好的结果。为了获得宽带低色散慢光,一些成功的研究主要集中在对PCW的低色散慢光上,通过改变波导宽度^[14-15],在波导中引入插条^[16-17],调整波导两侧结构形状^[18-22]、液体渗透^[23]等。对PC-CROW的低色散慢光研究相对较少,主要有通过改变微腔缺陷介质柱或空气孔的尺寸以及微腔距离来调整慢光群速度和带宽^[24-26],也有通过PCW侧边耦合点缺陷波导降低群速度并抑制GVD^[27-28]。

本文通过改变PC-CROW环绕微腔介质柱的尺寸和形状,改善波导的慢光传输特性,获得慢光导模的极低群速度和宽带低色散传输。同时,从器件应用出发,更直接地研究微腔结构对存储器件参数如存储容量、归零(RZ)码比特长度、延迟时间^[29]等的影响。其中,存储容量 C 表示存储器存储的最大比特数,存储长度 L_s 是单位比特的数据所需的缓存长度,延迟时间 T_s 是信号通过缓存器件产生的时延。这些都由缓存结构的慢光传输速度、色散和带宽共同决定。因此,通过结构变化对存储器件参数的影响研究,可以更加直接地为器件的设计、制作和应用提供帮助。

2 结构设计及仿真

本文所采用的PC-CROW的光子晶体结构是硅介质柱以三角晶格结构置于有机聚合物聚苯乙烯基底内,介质柱半径 $r_0=0.25a$,其中 a 为晶格常数。波导结构沿着 Y 方向,通过等间距周期性移除单一的硅介质柱形成的一系列的微腔构成。本文研究的波导结构是通过改变微腔周围6个介质柱的尺寸和形状来改善慢光特性和存储能力。图1(a)为大介质柱包围微腔构建的PC-CROW示意图, $r_1=0.32a$ 为微腔周围介质柱半径,形成波导的微腔用超胞 $m \times n$ 表示,如图1(a)的虚线框所示。 m 为波导结构纵向宽度,本结构中取7; n 为相邻微腔之间的晶格数目,微腔之间的距离为 $\Delta=n \cdot a$,即微腔宽度,这里 n 取3;波导长度 $L=N \times \Delta$,其中 N 为构成波导的微腔数目,即超胞结构的数目。采用基于超胞结构的平面波展开法^[30-32]计算该波导结构的横向磁场(TM)偏振模式的色散关系,如图1(b)所示,显然,在光子禁带(PBG)内,存在一个非常平坦的导模色散曲线,与均匀介质柱PC-CROW相比,导模的色散曲线更加平坦;导模的群速度 v_g 可以由色散关系 $\omega(k)$ 的一阶导数来计算:

$$v_g = \frac{1}{\partial k / \partial \omega} = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c}{n + \omega(dn/d\omega)} = \frac{c}{n_g} \quad (1)$$

式中 ω 和 k 是电磁波角频率和波矢, c 为真空中光速, n_g 是群折射率。群速度色散系数 β_2 是色散曲线的二阶导数,如下所示:

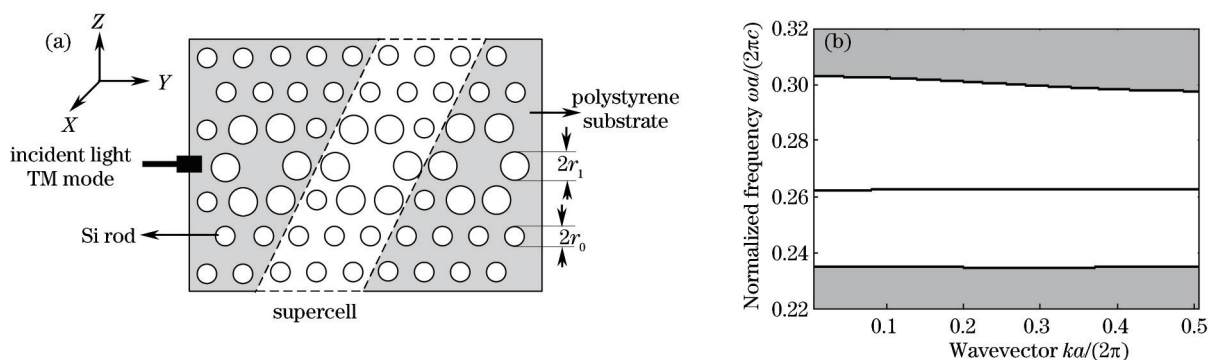


图1 环微腔大介质柱PC-CROW(a)结构示意图和(b)色散带图

Fig.1 (a) Schematic and (b) dispersion band diagram of PC-CROW with enlarged rod circled cavity

$$\beta_2 = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} = -\left(\frac{1}{v_g}\right)^3 \times \frac{d^2 \omega}{dk^2}. \quad (2)$$

此外,基于该慢光结构的缓存特性可以通过紧束缚法^[33]分析获得。设定PC-CROW慢光波导的长度为 L ,则延迟时间为 $T_s=L/v_g$,与群速度成反比;可存储的最大比特数目,即存储容量 C 等于延迟带宽积 $T_s B^{[29]}$,其中 B 是输入数据的基带带宽,约等于PC-CROW导模可用带宽的一半即 $B \approx \Delta\omega'/4\pi$,其中 $\Delta\omega'$ 是以rad/s为单位的导模带宽。存储容量 C 可以表示为

$$C = T_s \cdot B = \frac{L}{v_g} \times \frac{\Delta\omega'}{4\pi} = \frac{Lc}{2a} \times \frac{\Delta\omega}{v_g} = \frac{L}{2a} \times n_g \Delta\omega, \quad (3)$$

式中 $\Delta\omega$ 是归一化的导模带宽, $\Delta\omega = a \times \Delta\omega'/(2\pi c)$ 。则存储1 bit的物理长度,即RZ码比特长度可以写作 $L_{bit} = L/C = 2av_g/(c\Delta\omega)$ 。

3 大介质柱环绕微腔的慢光传输与存储特性

光子晶体微腔周围介质柱会极大地影响微腔的 Q 值^[34],那么也必然影响由此形成耦合光波导的慢光特性和缓存性能。这一部分将增大围绕微腔的介质柱半径 r_1 , r_1 从 $0.25a$ 增大到 $0.37a$ 。图2给出了不同 r_1 的波导导模群速度随着归一化频率变化的规律,当 r_1 增大时,慢光导模向低频方向移动,群速度逐渐减小,当 $r_1=0.35a$ 时,群速度达到最小,导模最大群速度为 $2.37 \times 10^{-4}c$,与均匀介质柱尺寸 $r_0=0.25a$ 时的最大群速度 $v_{gmax}=2.1 \times 10^{-3}c$ 相比,减小了一个数量级。继续增大 r_1 ,群速度反而增大。图3为导模最大群速度 v_{gmax} 和导模中心波长随着 r_1 变化的规律曲线,导模最大群速度随着 r_1 增大而减小的规律在 $r_1=0.35a$ 时出现拐点,描述了图2中慢光导模群速度的变化规律。当 r_1 从 $0.25a$ 增大到 $0.36a$ 时,导模支持的中心波长从 1469.1 nm 移动到 1619.8 nm ,导模波长成一次线性关系随着 r_1 增大向低频长波方向移动。

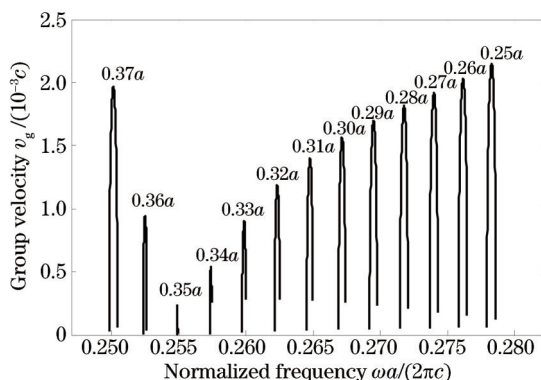


图2 各不同介质柱尺寸的PC-CROW的导模群速度

Fig.2 Group velocities of guided modes for PC-CROW with different sizes of rods around the cavity

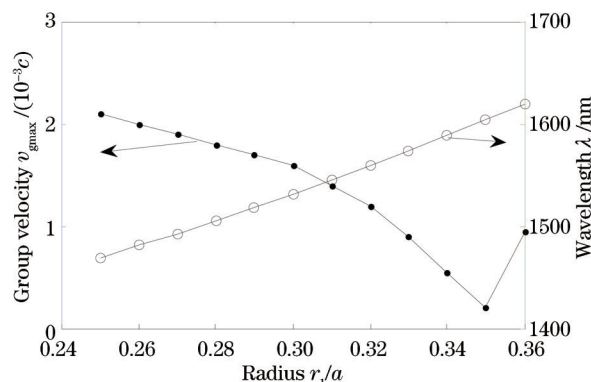


图3 导模中心波长和群速度最大值随着介质柱尺寸的变化曲线

Fig.3 Curves of wavelength and maximum group velocity of guided mode with the size of rods around the cavity

图4给出了 $r_1=0.35a$ 时的PC-CROW色散带图和导模的色散曲线。禁带归一化频率范围在 $0.2345 \sim 0.2841$ 之间,导模在 0.2549 附近,远离禁带边缘,可以很好地限制在波导内传输,导模带宽为 4.8087×10^{-5} ,品质因子 Q 值($\omega_0/\Delta\omega$)可以达到 5300.7 ,导模曲线非常平坦可以支持超慢光。然而,从插图看导模并非一致变化,会有比较大的高阶色散,以致影响其存储特性。

图5描述了基于大介质柱微腔的PC-CROW(晶格常数 $a=409 \text{ nm}$,波导长度取 $L=60\Delta$)的存储容量 C 、RZ码比特长度 L 、延迟时间 T_s 和波导的品质因数 Q 随着 r_1 的变化规律。慢光波导能够存储的比特数,即存储容量 C 随着 r_1 的增大而线性增大,当 $r_1=0.31a$ 时达到最大值 9.8412 bit ;随后 r_1 继续增大时,存储容量 C 急剧减小,当 $r_1=0.35a$ 时, C 达到最小 6.0774 bit ;此后 C 又随 r_1 的增大急剧增大,对应图4,这是由比较大的导模高阶色散所致。比特存储长度变化规律与存储容量 C 相反,这是因为二者相互成反比。延迟时间 T_s 随着 r_1 的增大而减小,当 $r_1=0.35a$ 时,达到最大延迟时间 344.6 ps ;之后 r_1 继续增大时,延迟时间反而减小。延迟时间与群速度 v_g 成反比,因此变化规律与图3中 v_{gmax} 相反。从图5(d)上看品质因子 Q 变化规律与 T_s 相同,因为 Q 值与

导模中心频率成正比,又与导模带宽成反比,根据 Q 值变化规律可见,导模频率随着 r_1 移动的速度小于导模色散曲线平坦化的速度,也就是随着 r_1 增大,更多的能量被限制在微腔内部。

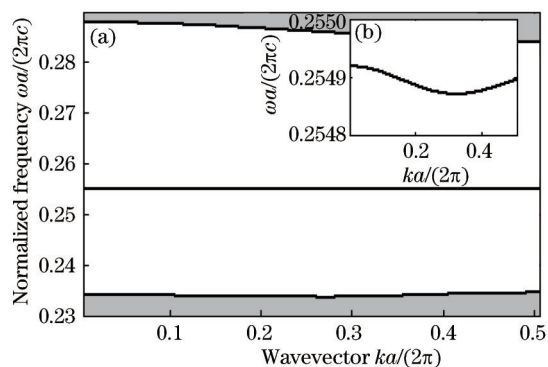


图4 $r_1=0.35a$ 的PC-CROW(a)色散带图和(b)导模细化图

Fig.4 (a) Dispersion band diagram and (b) guided mode in detail of PC-CROW with $r_1=0.35a$

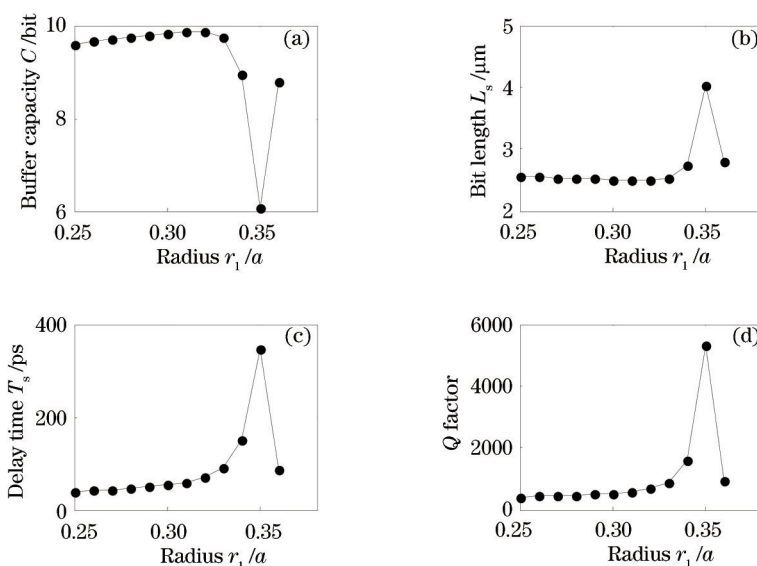


图5 (a) 存储容量、(b) 比特长度、(c) 延迟时间和(d) 品质因子随着 r_1 的变化规律($r_1=0.25a\sim 0.36a$)

Fig.5 (a) Buffer capacity, (b) bit length, (c) delay time and (d) Q factor as a function of r_1 ($r_1=0.25a\sim 0.36a$)

综合导模慢光传输特性和存储能力,当 $r_1=0.35a$ 时,虽然导模群速度达到最小, Q 值达到最大值,但是,由于高阶色散,存储性能也急剧劣化。比较发现,当 $r_1=0.31a$ 时,存储容量 C 达到最大值,此时导模最大群速度 $v_{gmax}=0.0014c$,可作为大介质柱环绕微腔PC-CROW的最优化慢光结构。此时,导模中心频率在 0.2648 ,带宽为 4.6031×10^{-4} ,RZ码比特长度为 $2.4936\ \mu\text{m}$,慢光波导的延迟时间为 $58.3\ \text{ps}$ 。

4 椭圆介质柱环绕微腔的慢光传输与存储特性

基于第3节的讨论, $r_1=0.31a$ 时,大介质柱环绕微腔的PC-CROW的存储容量达到最大,导模最大群速度为 $1.4\times 10^{-3}c$,以此为基础,逐步将微腔周围大介质柱椭圆化,讨论此过程中慢光特性和存储性能的变化。椭圆微腔PC-CROW结构如图6所示,其中, a_c 为椭圆型介质柱长轴长度, b_c 为短轴长度, a_c 从 $0.31a$ 开始以 $0.01a$ 为间隔逐渐增加到 $0.45a$,同时, b_c 从 $0.31a$ 也以 $0.01a$ 为间隔逐渐减小到 $0.17a$ 。图7(a)详尽描述了介质柱椭圆度变化过程中各导模群速度变化的情况,随着椭圆度的增加,导模先向低频方向移动,当 $a_c=0.39a$ 时,频率最小为 0.2634 ,椭圆度继续增大时,导模迅速向高频方向移动;当 a_c 增大时,导模群速度减小,当 $a_c=0.42a$, $b_c=0.20a$ 时群速度达到最小,导模最大群速度为 $v_{gmax}=2.3053\times 10^{-4}c$,之后,长轴 a_c 继续增大,短轴 b_c 继续减小时,导模群速度增大,但是变化幅度很小。图7(b)画出了导模中心波长、导模最大群速度随着长轴 a_c 增大的变

化曲线。导模中心波长变化与图7(a)中频率相对应,呈开口向下的抛物线形状, $a_c=0.31a\sim 0.39a$ 时,导模波长从1544.8 nm向长波方向移动到1552.9 nm,随后 $a_c=0.39a\sim 0.45a$ 时,导模波长又从1552.9 nm向短波方向移动到1540.4 nm;同时,群速度呈指数形式下降,在 $a_c=0.42a$ 时,群速度达到最小,随后,当 a_c 继续增大时,群速度反而增大。也就是在微腔周围的6个介质柱为长轴为 $0.42a$ 、短轴为 $0.20a$ 的椭圆形时慢光群速度达到最小,与增大圆形介质柱微腔 $r_1=0.31a$ 的慢光波导相比,椭圆化后的慢光波导最大导模群速度减小一个数量级,此时导模带宽也达到最小 $\Delta\omega=7.547\times 10^{-5}$,对应的品质因子达到3575.1。

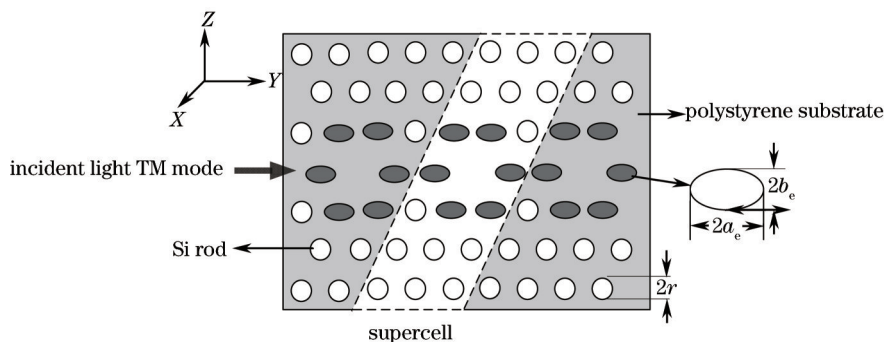


图6 环微腔椭圆介质柱PC-CROW结构示意图

Fig.6 Schematic of PC-CROW with elliptical rod circled cavity

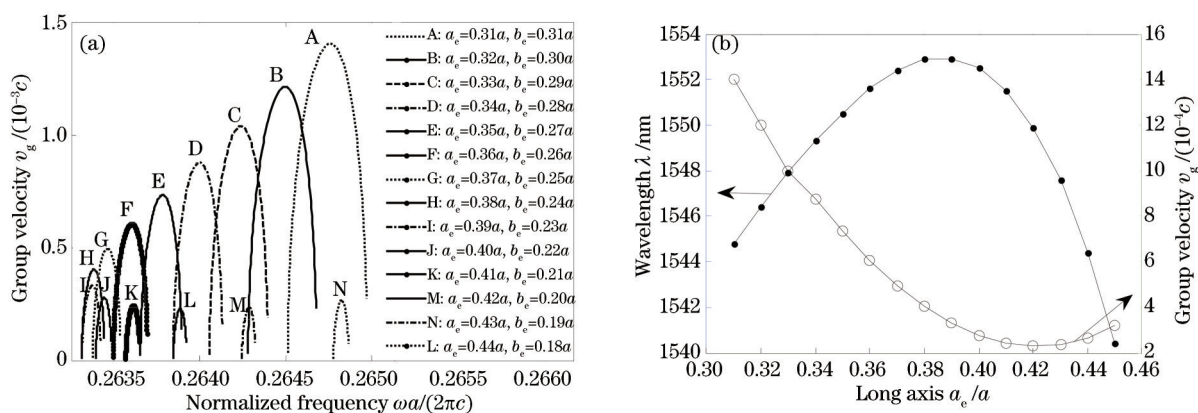


图7 (a)不同 a_c 和 b_c 的椭圆柱PC-CROW的导模群速度变化规律;(b)导模波长和最大群速度随着椭圆柱长轴 a_c 的变化曲线
Fig.7 (a) Guided mode group velocity as a function of normalized frequency with variation of a_c and b_c ; (b) v_{gmax} and center wavelength of guided mode as a function of a_c .

为了进一步讨论介质柱椭圆化对慢光波导存储能力的影响,图8描述了存储容量 C 、RZ码比特长度 L_b 、延迟时间 T_d 和品质因子 Q 随着椭圆柱长轴 a_c 的变化关系(PC-CROW结构同第3小节)。变化曲线显示,慢光

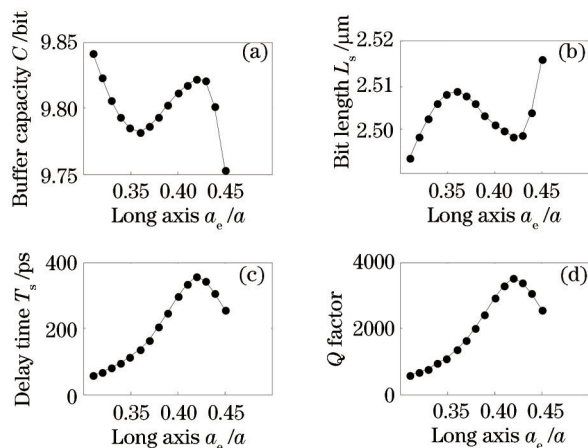


图8 (a)存储容量、(b)比特长度、(c)延迟时间和(d)品质因子随着 a_c 的变化规律($r_1=0.31a\sim 0.45a$)

Fig.8 (a) Buffer capacity, (b) bit length, (c) delay time and (d) Q factor as a function of a_c ($r_1=0.31a\sim 0.45a$)

波导存储容量 C 随着长轴 a_c 的增大而减小, 到 $a_c=0.36a$ 时达到最小, 随后 C 随着 a_c 增大而增大, 到 $a_c=0.42a$ 时, 存储容量 C 达到最大为 9.8214, 随后, C 又随着 a_c 的增大而逐渐减小; RZ 码比特长度 L_c 与存储容量 C 的变化规律相反。延迟时间 T_d 随着 a_c 增大呈指数形式增加, 当 $a_c=0.42a$ 时达到最大为 354.8 ns ($a_c=0.31a$ 时为 58.3 ns), 品质因子 Q 也达到最大值 3575.1。之后, 随着椭圆柱长轴 a_c 增大, 各种存储性能指标迅速下降, 并且传输群速度也逐渐变大。

表 1 与图 6 对应的不同参数下的慢光特性和存储性能

Table 1 Slow light parameters and buffer properties for Fig.6

a_c / a	b_c / a	v_{gmax} / c	$\Delta\omega / 10^{-4}$	Q	C / bit	$L_c / \mu\text{m}$	T_d / ps
0.31	0.31	0.0014	4.6031	582.85	9.8412	2.4936	58.3
0.34	0.28	8.7441×10^{-4}	2.8642	945.28	9.7931	2.5059	93.2
0.36	0.26	6.0557×10^{-4}	1.9745	1366.1	9.7818	2.5087	135.1
0.38	0.24	4.0421×10^{-4}	1.3195	2039.5	9.7929	2.5059	202.4
0.4	0.22	2.7794×10^{-4}	0.9089	2960.5	9.8111	2.5012	294.3
0.42	0.2	2.3053×10^{-4}	0.7547	3575.1	9.8214	2.4986	354.8
0.44	0.18	2.6675×10^{-4}	0.8714	3114.2	9.8009	2.5038	306.7

为了进一步说明慢光效果和存储性能, 环微腔的椭圆柱 PC-CROW 的慢光性能和存储性能参数在图 7~8 的变化转换成表 1, 从表中可见, 在大介质柱椭圆化过程中, 当椭圆柱长轴 a_c 从 $0.31a$ 增大到 $0.36a$ 时, 存储容量 C 由 9.8412 bit 减小到 9.7818 bit, 当 a_c 继续增大到 $0.42a$ 时, C 反向增加到 9.8214 bit, 比 $a_c=0.31a$ 时的初值 C 小了 0.00198 bit, 变化极小, 而在此过程中导模最大群速度却是一致减小, 从 $v_{gmax}=0.0014c$ 减小到 $v_{gmax}=2.3053 \times 10^{-4}c$, 减小到原来的 1/6, 是均匀介质柱 PC-CROW 群速度的 1/9。优于调整微腔间距离得到的慢光效果^[24-26], 也优于仅调整介质柱尺寸得到的慢光结果^[25-26]。

5 结 论

三角晶格结构的 PC-CROW, 增大微腔周围 6 个介质柱的尺寸 r_1 , 导模慢光群速度会显著减小, 当 $r_1=0.35a$ 时导模群速度达到最小 $v_{gmax}=2.37 \times 10^{-4}c$, 这比均匀介质柱微腔波导的最大群速度减小了一个数量级, 继续增大 r_1 时, 群速度迅速增大; 在 r_1 持续增大时, 慢光导模一致向低频长波方向移动; 存储性能随着 r_1 的增大而逐渐提高, 并且在 $r_1=0.31a$ 时达到最高, 存储容量 $C=9.8412$ bit, 此后, 随着 r_1 的增大存储容量 C 急剧减小, 到 $r_1=0.35a$ 时达到最小 6.077 bit, 这一存储容量的减小是由于导模高阶色散变大所致。为了进一步改善 PC-CROW 的慢光特性和存储性能, 将尺寸增大了 ($r_1=0.31a$) 的环微腔圆形介质柱横向椭圆化, 当椭圆柱长轴 a_c 取 $0.42a$, 短轴取 $0.20a$ 时, 在保持存储特性基本不变的情况下, 导模群速度减小到 $v_{gmax}=2.3053 \times 10^{-4}c$, 是椭圆化之前的 1/5, 存储容量 $C=9.8214$ bit, RZ 码比特长度 L_c 为 2.4986 μm , 延迟时间 T_d 达到 354.8 ps 品质因子 Q 也达到了最大值 3575.1。

仿真结果和计算分析表明, 对于耦合腔光子晶体慢光波导, 增大微腔周围的圆柱形介质柱尺寸可以迅速地降低慢光导模的传输速度, 并且存储容量得到有效的提高。另外, 将微腔周围增大的圆形介质柱椭圆化, 能够进一步降低传输速度的同时, 保持基本不变的存储能力。这种结构变化对慢光特性和存储能力的研究, 为低速慢光的实现和应用提供了新的研究思路和途径, 对于光子晶体的慢光缓存和光存储的工程实现具有一定的实用价值和意义。

参 考 文 献

- 1 R S Tucker, P C Ku, C J Chang-Hasnain. Delay-bandwidth product and storage density in slow-light optical buffers [J]. Electron Lett, 2005, 41(4): 208-209.
- 2 S Rawal, R K Sinha, R M De La Rue. Slow light miniature devices with ultra-flattened dispersion in silicon-on-insulator photonic crystal [J]. Opt Express, 2009, 17(16): 13315-13325.
- 3 S K Tripathy, S Sahu, C Mohapatro, et al.. Implementation of optical logic gates using closed packed 2D-photonic crystal structure [J]. Opt Commun, 2012, 285(13-14):3234-3237.

- 4 K Nozaki, A Shinya, S Matsuo, *et al.*. Ultralow-energy and high-contrast all-optical switch involving Fano resonance based on coupled photonic crystal nanocavities [J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 11877-11888.
- 5 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.
- 6 T Baba. Slow light in photonic crystals [J]. *Nature Photon*, 2008, 2(8): 465-473.
- 7 L V Hau, S E Harris, Z Dutton, *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultra cold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, 397(6720): 594-598.
- 8 L Thevenaz. Slow and fast light in optical fibres [J]. *Nature Photon*, 2008, 2(8):474-481.
- 9 T F Krauss. Slow light in photonic crystal waveguides [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2007, 40(9): 2666-2670.
- 10 H Gersen, T H Karle, R J Engelen, *et al.*. Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(7): 073903.
- 11 R J P Engelen, Y Sugimoto, Y Watanabe, *et al.*. The effect of higher-order dispersion on slow light propagation in photonic crystal waveguides [J]. *Opt Express*, 2006, 14(4): 1658-1672.
- 12 A Yariv, Y Xu, R Lee, *et al.*. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis [J]. *Opt Lett*, 1999,24(11): 711-713.
- 13 K Sakai, E Miyai, S Noda. Two-dimensional coupled wave theory for square-lattice photonic-crystal lasers with TM-polarization [J]. *Opt Express*, 2007, 15(7): 3981-3990.
- 14 Liang Jian, Ren Liyong, Yun Maojin, *et al.*. Wideband slow light with ultralow dispersion in a W1 photonic crystal waveguide [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(31): G98-G103.
- 15 A Y Petrov, M Eich. Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(21): 4866-4868.
- 16 B W Wang, M A Dunder, R Notzel, *et al.*. Photonic crystal slot nanobeam slow light waveguides for refractive index sensing [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(10):151105.
- 17 Wu Jun, Li Yanping, Peng Chao, *et al.*. Wideband and low dispersion slow light in slotted photonic crystal waveguide [J]. *Opt Commun*, 2010, 283(14): 2815-2819.
- 18 Leng Fengchun, Liang Wenyao, Liu Bin, *et al.*. Wideband slow light and dispersion control in oblique lattice photonic crystal waveguides [J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 5707-5712.
- 19 Wan Yong, Li Changhong, Yun Maojin, *et al.*. Realization of slow light effect for photonic crystal waveguide using graded eye-shaped scatters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1016003.
万 勇, 李长红, 云茂金, 等. 采用渐变圆弓形散射元实现光子晶体结构慢光效应[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1016003.
- 20 S Kubo, D Mori, Y Baba. Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(20): 2981-2983.
- 21 Wan Yong, Fu Kai, Yun Maojin, *et al.*. Slow light effect with low group velocity and low dispersion by adjusting parameters of cylindner-segment scatters [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0106002.
万 勇, 付 凯, 云茂金, 等. 调整圆弓形散射元参数实现低群速和低色散的慢光效应[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0106002.
- 22 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao, *et al.*. Investigation on anovel photonic crystal structure with dispersion free slow light based on line-defect of quadrate air holes [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1006006.
张 伟, 王智勇, 王文超, 等. 基于方形孔线缺陷的新型光子晶体零色散慢光结构研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1006006.
- 23 F Hosseinibalam, S Hassanzadeh, A Ebnali-Heidari, *et al.*. Design of an optofluidic biosensor using the slow-light effect in photonic crystal structures [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(5): 568-576.
- 24 Li Changhong, Tian Huiping, Lu Hui, *et al.*. Effect of waveguide basic structure on slow light in photonic crystal coupled resonator optical waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2108-2115.
李长红, 田慧平, 鲁 辉, 等. 波导基本结构对光子晶体耦合腔光波导慢光特性的影响[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2108-2115.
- 25 Lu Hui, Tian Huiping, Li Changhong, *et al.*. Research on new type of slow light structure based on 2D photonic crystal coupled cavity waveguide [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(3): 2049-2055.
鲁 辉, 田慧平, 李长红, 等. 基于二维光子晶体耦合腔波导的新型慢光结构研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(3): 2049-2055.
- 26 Tian Huiping, Long Fang, Liu Weijia, *et al.*. Tunable slow light and buffer capability in photonic crystal coupled-cavity waveguides based on electro-optic effect [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(10-11): 2760-2764.
- 27 S Kocaman, X Yang, J F McMillan, *et al.*. Observations of temporal group delays in slow-light multiple coupled photonic crystal

- cavities [J]. Appl Phys Lett, 2010, 96(22): 221111.
- 28 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao, *et al.*. Investigation on waveguide slow light based on photonic-crystal coupled waveguide [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0213001.
张 伟, 王智勇, 王文超, 等. 基于光子晶体耦合波导的宽带慢光研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0213001.
- 29 R S Tucker, P C Ku, C J Chang-Hasnain. Slow-light optical buffers: capabilities and fundamental limitations [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(12): 4046-4066.
- 30 J Shim, E K Lee, Y J Lee, *et al.*. Density-functional calculations of defect formation energies using the supercell method: Brillouin-zone sampling [J]. Phys Rev B, 2005, 71(7): 245204.
- 31 S Guo, S Albin. Numerical techniques for excitation and analysis of defect modes in photonic crystals [J]. Opt Express, 2003, 11(9): 1080-1089.
- 32 S Johnson, J Joannopoulos. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis [J]. Opt Express, 2001, 8(3): 173-190.
- 33 K Hosomi, T Katsuyama. A dispersion compensator using coupled defects in a photonic crystal [J]. IEEE J Quantum Elect, 2002, 38(7): 825-829.
- 34 S H Kwon, T Sunner, M Kamp, *et al.*. Ultrahigh- Q photonic crystal cavity created by modulating air hole radius of a waveguide [J]. Opt Express, 2008, 16(7): 4605-4614.

栏目编辑: 史 敏