

激光与光电子学进展

具有宽带宽和高归一化延迟带宽积的光子晶体波导慢光传输

吴蓉, 马岩岩*, 李龙飞

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730030

摘要 为了获得优异的慢光性能,设计一种在逆时针旋转 45° 的完整正方晶格的中心行及与其相邻的第二行引入非本征缺陷棒的光子晶体波导(PCW)。引入的连续腔作为电磁能量的存储器和光速减速器,用于PCW中的慢光传输,也适用于光通信、光计算和光信号处理领域。采用平面波展开法研究所提结构的慢光传输特性,分析了结构参数对慢光性能的影响,最终在归一化延迟带宽积(NDBP)达0.40的情况下,带宽达到23.37 nm。所提结构的设计方法为进一步提升具有高带宽和高NDBP慢光的存储容量提供了重要的理论依据。

关键词 光学器件; 光子晶体波导; 慢光; 群速度; 群速度色散; 归一化延迟带宽积

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0723002

Slow Light Transmission of Photonic Crystal Waveguide with Wide Bandwidth and Large Normalized Delay Bandwidth Product

Wu Rong, Ma Yanyan*, Li Longfei

*School of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University,
Lanzhou, Gansu 730030, China*

Abstract In order to obtain excellent slow light performance, we propose a photonic crystal waveguide (PCW) with extrinsic defect rods introduced into the center row of a complete square lattice rotated 45° counterclockwise and the second row adjacent to it. And successive cavities are introduced as electromagnetic energy reservoirs and light speed reducers for slow light transmission in the PCW concerning applications for optical communication, optical computation, and optical signal processing. Then, the plane wave expansion method is used to study the slow light transmission characteristics of the proposed structure, and the influence of the structure parameters on the slow light performance is analyzed. Finally, the bandwidth is obtained at 23.37 nm when the normalized delay bandwidth product (NDBP) reaches 0.40. The design method of the proposed structure provides an important theoretical basis for further improving the storage capacity with high bandwidth and high NDBP slow light.

Key words optical devices; photonic crystal waveguide; slow light; group velocity; group velocity dispersion; normalized delay bandwidth product

OCIS codes 230.5298; 130.5296; 050.5298

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-08-21; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1610RJZA046)

*E-mail: mayanyanlll@outlook.com

1 引言

对所有集成光学元件来说,缩小器件尺寸和降低能耗是非常重要的,可以降低生产和操作成本。光子晶体波导(PCW)中的慢光在这方面具有特殊的潜力^[1]。另外,PCW可以在室温情况下生产,可应用于全光逻辑门^[2]、模分复用器^[3],并提供宽带宽^[4]、低色散^[5]和较小程度的失真。慢光效应可应用于光学缓冲器和光延迟器^[6-7]等光学器件。

对慢光性能进行全面评估的一个关键参数是归一化延迟带宽积(NDBP),它能最大限度地提升缓冲容量和增加延迟时间。要想在低色散宽带和较大的群折射率之间取得平衡,研究人员设计出了不同的PCW来实现更高的NDBP。所设计出的结构大都是沿着两个主要的思路进行构建的,即改变散射元的阵列或是改变散射元的结构。2013年,万勇等^[8]采用渐变圆弓形散射元实现慢光,得到超低色散的同时带宽仅有4.2 nm;2016年,Zhu等^[9]通过引入slot波导结构改善了慢光性能,但是最终的NDBP值只有0.24,慢光效果不好;2017年,Dang等^[10]在逆时针旋转45°的正方晶格中分析了中间三行介质圆柱的半径对慢光性能的影响,耦合效率较低,导致色散较大,最终NDBP值达0.378;2018年,易佳等^[11]采用空气环形散射元结构,降低群速度的同时带宽也大幅度降低;2019年,Abood等^[12]采用光子晶体耦合腔波导(PC-CCW)来改善慢光性能,

NDBP值达0.5873,但带宽仅有12.9 nm,结构复杂,并且没有良好的可扩展性。

为了获得较好的慢光特性,本文首先通过将正方晶格逆时针旋转45°获得新的晶格结构,然后在晶体内部引入一系列非本征缺陷棒,以形成一系列腔体,作为电磁能量的存储器,改善光在波导中的传输特性。基于平面波展开(PWE)法^[13],通过优化缺陷棒的结构参数,研究结构参数对光波的群速度(v_g)、群折射率(n_g)及群速度色散(GVD)的影响,从而获得一种具有宽带宽、高归一化延迟带宽积的光子晶体波导结构。

2 物理模型和理论方法

光子器件中的慢光现象在光信号的处理、减小器件尺寸及减小噪声方面具有重要的应用。因此,基于PCW的色散和慢光在光通信和光信号处理领域起着至关重要的作用。模式的色散关系与非本征材料、本征材料的特性及PhC的几何结构有关系。为了优化表征慢光性能的参数,将二维正方晶格逆时针旋转45°,得到如图1(a)所示的完美光子晶体结构。介质柱为Si,折射率为3.46,背景材料为空气,折射率为1,在完美光子晶体中引入缺陷介质柱,介质柱材料为InP,折射率为3.1,引入外部缺陷棒InP,排列如图1(b)所示,形成了三条线缺陷,中心的5行介质柱的材料为Si和InP,它们交替排列。图1(b)中的虚线矩形是一个超胞,超胞大小为 $\sqrt{2}a \times 6\sqrt{2}a$ 。

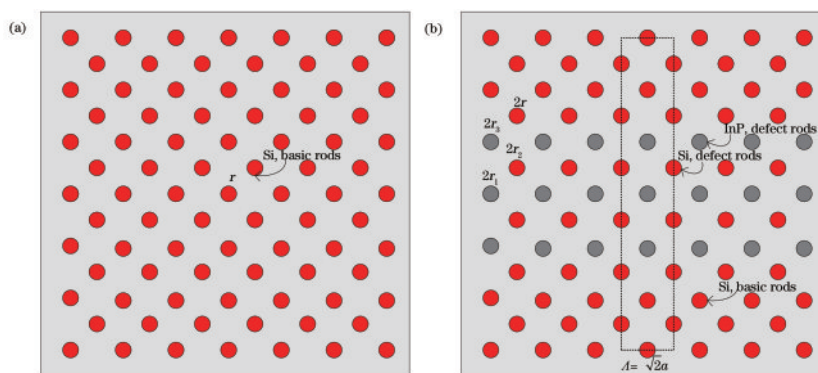


图1 完美光子晶体结构示意图。(a)完美晶格示意图;(b)PCW结构示意图

Fig. 1 Schematic of perfect photonic crystal structure. (a) Schematic of perfect lattice; (b) schematic of PCW structure

基于Rsoft软件,采用PWE法^[13]计算带隙结构,同时考虑三条线缺陷,以此来优化慢光性能。基于此思路,通常将优化过程分为三个步骤:首先,在完美光子晶体中引入缺陷棒,得出缺陷棒对 n_g 和GVD的影响,缺陷介质柱的引入需能够使得群速度色散在不同频率下产生正值和负值,以便在某些频

率下GVD可以近似为零;然后,改变中心行缺陷介质柱的半径,固定中心行介质柱半径为最佳值,改变邻近中心行介质柱的第二行介质柱的半径,以优化慢光性能;为了优化第一行介质柱对GVD和带宽的影响,最后将第二行介质柱的半径固定为NDBP最大时的值,并更改第一行介质柱的半径。

衡量慢光的重要因素之一是群速度,定义为群折射率的倒数^[8],表达式为

$$\nu_g = \frac{d\omega}{d\kappa} = \frac{c}{n_g}, \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; κ 为波矢量大小; c 为光速。GVD是色散介质的特性,表达式为

$$D_{GV} = \frac{a}{2\pi c^2} \frac{dn_g}{dU} = \frac{a}{2\pi c} \frac{d}{dU} \left(\frac{1}{\nu_g} \right), \quad (2)$$

式中:归一化频率 $U = \omega a / 2\pi c = a / \lambda$ 。参数 n_g 和 D_{GV} 作为 U 的函数,可以从 PCW 的色散曲线中得到。在 PCW 中,对慢光的优劣描述使用参数 n_g 、 ν_g 、归一化带宽、 D_{GV} 和 NDBP^[14],这些参数直接影响系统性能。但是给定结构的群折射率和带宽成反比,NDBP 可以从多角度衡量慢光的性能,它定义为群折射率 n_g 的平均值和归一化带宽 $\Delta\omega / \omega_0$ 的乘积^[15]:

$$P_{NDB} = \langle n_g \rangle \times \frac{\Delta\omega}{\omega_0}, \quad (3)$$

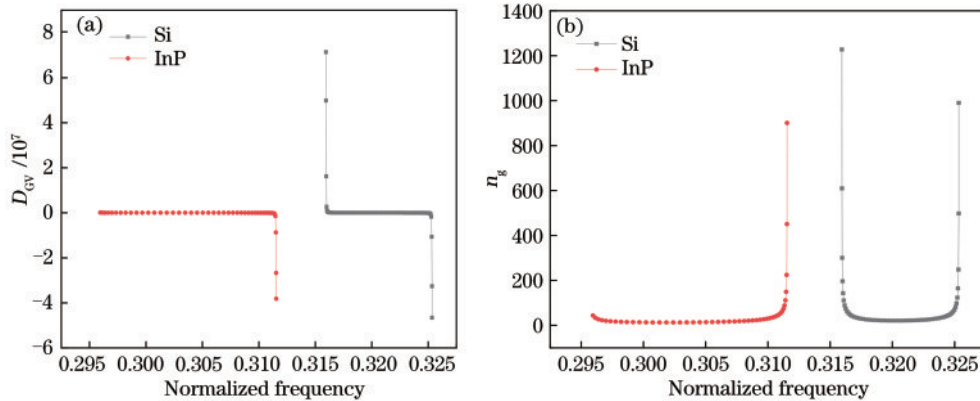


图 2 不含与含有外部缺陷棒的 PCW 慢光特性对比。(a)GVD 与归一化频率的关系;(b)群折射率与归一化频率的关系
Fig. 2 Comparison of slow light properties of PCW without and with extrinsic defect rods. (a) GVD versus normalized frequency; (b) group index versus normalized frequency

通过改变中心行介质柱的半径 r_1 ,同时将第一行、第二行介质柱的半径保持为 $r_2 = r_3 = r = 0.20a$, r_1 在 $0.11a \leq r_1 \leq 0.16a$ 内以步长 $0.01a$ 变化。研究此范围是因为需使 D_{GV} 为 $-10^8 \sim 10^8$ 。数值计算方法使用 PWE 方法,并进行超胞处理,可以获得色散曲线^[17]。色散曲线如图 3(a)所示,随着 r_1 的增加,导模曲线从高频移向低频区域。利用(1)、(2)式求解色散关系的一阶和二阶导数参数,可以得到 n_g 和 D_{GV} 。图 3(b)和图 3(c)即为 r_1 在 $0.11a \leq r_1 \leq 0.16a$ 变化时 n_g 和 D_{GV} 的结果。表 1 说明了描述慢光优劣的 NDBP 值。

从图 3(b)和图 3(c)可以看出:保持 r_2 和 r_3 不变,改变 r_1 ,随着 r_1 的增大,群折射率从 28.46 不断

减小到 7.92,而带宽值不断增大,由 10.57 nm 上升至 42.51 nm,因此群折射率和带宽之间需要权衡,由(3)式计算各个半径值所对应的 NDBP 值。从表 1 可知:随着半径值的增大,NDBP 值先增大后减小,当 $r_1 = 0.14a$ 时,NDBP 值达到最大,为 0.2314,此时带宽 $\Delta\lambda = 30.59$ nm,群折射率 $n_g = 11.73$ ($\Delta\lambda = \Delta\omega / \omega_0 \times 1550$ nm)。另一个衡量慢光的动态因素 GVD 会导致脉冲失真,如图 3(c)所示, D_{GV} 从正 $D_{GV} > 10^8$ 下降到负 $D_{GV} < -10^8$,这揭示了使用所提结构进行色散补偿的可能性。

3 仿真结果与分析

首先研究引入外在非本征缺陷介质柱对 PCW 慢光性能的影响。当 $r_1 = 0.12a$ 时,分析含有和不含有 InP 缺陷介质柱对 n_g 和 D_{GV} 参数的影响,如图 2 所示。可知:InP 缺陷介质柱的引入产生了正的 GVD 和负的 GVD,这对色散补偿应用很重要^[16];引入 InP 缺陷介质柱使得群折射率有了一定幅度的提高, n_g 的最小值由 12.86 上升至 20.95。由以上分析可知,非本征缺陷介质柱的引入改善了慢光性能。接下来通过改变结构中的半径值,得到最佳参数值,从而使 D_{GV} 为 $-10^8 \sim 10^8$ 同时获得高的群折射率。

若一行缺陷介质柱半径与另一行的缺陷半径不同,则相对应的缺陷结构的谐振频率也会稍有不同,从而影响带宽的大小。波导中光波的传播速度

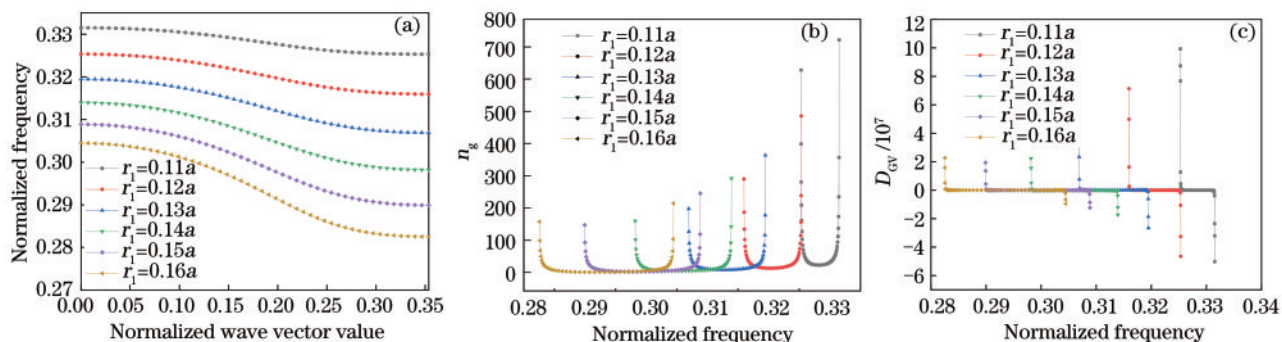


图 3 r_2 和 r_3 固定为 $0.20a$ 时, $0.11a \leq r_1 \leq 0.16a$, r_1 对慢光特性的影响。(a) 导模色散曲线; (b) 群折射率随归一化频率的变化; (c) GVD 随归一化频率的变化

Fig. 3 Slow light properties affected by the radius r_1 in the range of $0.11a \leq r_1 \leq 0.16a$ with r_2 and r_3 fixed at $0.20a$. (a) Dispersion curves of guided modes; (b) group index versus normalized frequency; (c) GVD versus normalized frequency

表 1 $r_2 = r_3 = r = 0.20a$ 且 $0.11a \leq r_1 \leq 0.16a$, 受半径 r_1 影响的慢光特性

Table 1 Slow light properties affected by the radius r_1 for $0.11a \leq r_1 \leq 0.16a$ and $r_2 = r_3 = r = 0.20a$

| r_1/a | $\Delta\omega \times 10^4$ | $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \times 10^4$ | $\Delta\lambda/nm$ | n_g | NDBP |
|---------|----------------------------|---|--------------------|-------|--------|
| 0.11 | 22.4 | 68.2 | 10.57 | 28.46 | 0.1941 |
| 0.12 | 35.9 | 112.0 | 17.35 | 19.73 | 0.2209 |
| 0.13 | 47.7 | 152.3 | 23.61 | 14.85 | 0.2262 |
| 0.14 | 60.4 | 197.3 | 30.59 | 11.73 | 0.2314 |
| 0.15 | 67.5 | 225.4 | 34.95 | 9.44 | 0.2129 |
| 0.16 | 80.5 | 274.2 | 42.51 | 7.92 | 0.2173 |

会随着缺陷介质柱数量的增加而降低, 因为需要更多的空腔填充能量, 而这需要更多的时间, 从而减慢了传播速度。在之前分析的基础上, 进一步研究靠近中心行的第二行介质柱对带宽、 n_g 和 NDBP 的影响, 将 r_1 固定为 $0.14a$ 的同时固定 r_2 为 $0.20a$ 并更改 r_3 , r_3 的取值范围为 $0.28a \leq r_3 \leq 0.34a$, 进而分析色散曲线。

邻近中心行的第二行介质柱为 InP, 因此分析其半径值的变化对 n_g 、带宽、GVD 及 NDBP 的影响是很有必要的。通过对半径 r_3 的分析得出, r_3 会使各个参数发生变化, 从而影响光的传播行为。从图 4(a) 可以清楚地看到, 群速度随 r_3 的增加而增大, 群速度的最大值由 $0.084c$ 增大至 $0.091c$ 。从图 4(b) 中得到, 随着 r_3 的增加, 群折射率在不断减小, 这也符合群速度与群折射率的关系 $n_g = c/v_g$ 。可以将这个结果解释为, 邻近中心行的第二行半径为 r_3 的介质柱被看作缺陷腔, 随着 r_3 的增大, 缺陷腔内的有效折射率相应的减小, 可以预测出随着 r_3 的增大, 共振频率也将会向高频移动, 与此同时群速度值增大。从图 4(c) 中得出, D_{GV} 在 $-4 \times 10^7 \sim 1 \times 10^7$ 内变化, 具有零色散的平坦带。将各个 r_3 所对应的带宽、 n_g 及 NDBP 值汇总, 如表 2 所示, 可以得出, 带宽值与群折射率成反比, 因此 NDBP 是不可缺少的衡量慢光性能的参数。当 $r_3 = 0.28a$ 时, 群折射率最大为 $n_g = 12.49$ 且带宽值

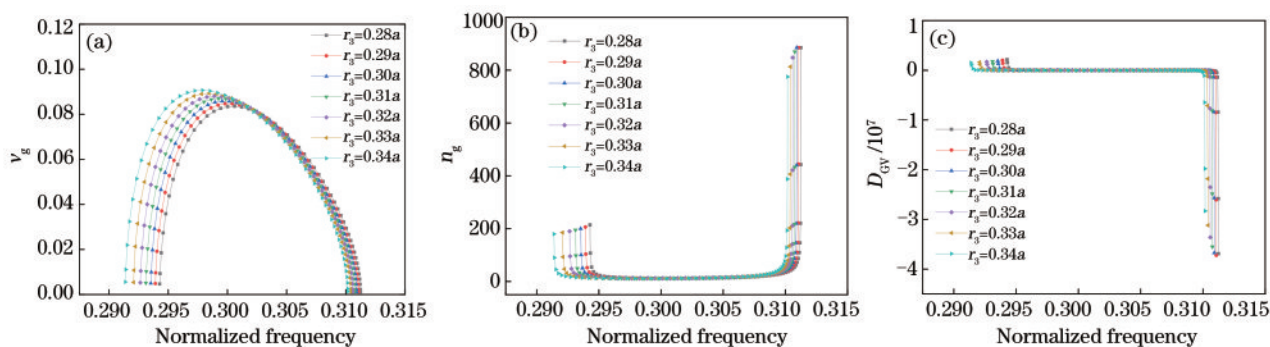


图 4 $r_1 = 0.14a, r_2 = 0.20a, r_3$ 从 $0.28a$ 到 $0.34a$ 变化, r_3 对慢光特性的影响。(a) 群速度随归一化频率的变化; (b) 群折射率随归一化频率的变化; (c) GVD 随归一化频率的变化

Fig. 4 Slow light properties affected by the radius r_3 changing from $0.28a$ to $0.34a$ with r_1 fixed at $0.14a$ and r_2 fixed at $0.20a$. (a) Group velocity versus normalized frequency; (b) group index versus normalized frequency; (c) GVD versus normalized frequency

表 2 $r_1 = 0.14a, r_2 = r = 0.20a$ 且 $0.28a \leq r_3 \leq 0.34a$, 受半径 r_3 影响的慢光特性

Table 2 Slow light properties affected by the radius r_3 for $0.28a \leq r_3 \leq 0.34a$ and $r_1 = 0.14a, r_2 = r = 0.20a$

| r_3/a | $\Delta\omega \times 10^4$ | $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \times 10^4$ | $\Delta\lambda/\text{nm}$ | n_g | NDBP |
|---------|----------------------------|---|---------------------------|-------|--------|
| 0.28 | 73.7 | 243.4 | 37.73 | 12.49 | 0.3041 |
| 0.29 | 74.7 | 246.9 | 38.28 | 12.33 | 0.3044 |
| 0.30 | 80.9 | 267.7 | 41.49 | 12.25 | 0.3281 |
| 0.31 | 82.0 | 271.6 | 42.09 | 12.09 | 0.3284 |
| 0.32 | 83.0 | 275.2 | 42.65 | 11.94 | 0.3052 |
| 0.33 | 84.3 | 279.8 | 43.38 | 10.92 | 0.3056 |
| 0.34 | 85.7 | 284.9 | 44.16 | 10.74 | 0.3061 |

最小为 $\Delta\lambda = 37.73 \text{ nm}$; 当 $r_3 = 0.34a$ 时, 群折射率最小为 $n_g = 10.74$ 且带宽值最大为 $\Delta\lambda = 44.16 \text{ nm}$, NDBP 值随着半径值的增大先增大后减小; 当 $r_3 = 0.31a$ 时, NDBP 值达到最大, 为 0.3284。与改变半径 r_1 所得到的最佳结果相比较, 改变半径 r_3 时, 带宽和群折射率值都得到了提升, 说明半径 r_3 的改变对整个结构是起到积极作用的。

改变邻近中心行的第一行介质柱的半径值, 通

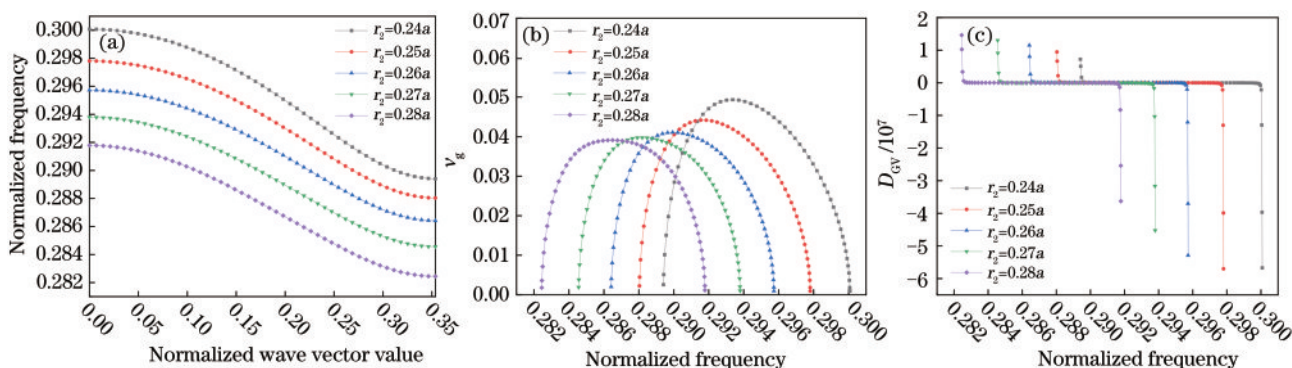


图 5 $r_1 = 0.14a, r_3 = 0.31a, r_2$ 从 $0.24a$ 到 $0.28a$ 变化, r_2 对慢光特性的影响。(a) 导模色散曲线; (b) 群速度随归一化频率的变化; (c) GVD 随归一化频率的变化

Fig. 5 Slow light properties affected by the radius r_2 changing from $0.24a$ to $0.28a$ with r_1 fixed at $0.14a$ and r_3 fixed at $0.31a$. (a) Dispersion curves of guided modes; (b) group velocity versus normalized frequency; (c) GVD versus normalized frequency

色散关系的二阶导数得出了群速度色散, 这引发了相位调制和脉冲展宽, 因此, 携带数据信息的脉冲在传输路径中可能会发生失真, 此时需要 GVD 的色散补偿^[18]。图 5(c) 为 GVD 与归一化频率的关系。 n_g 在 $-10\% \sim 10\%$ 变化时的归一化频率范围即为本文所求带宽, 如图 6 所示, 此带宽所对应的 GVD 范围如表 3 所示。当 $r_2 = 0.24a$ 时, 平坦频段所对应的色散值为 $-2089.9(a/2\pi c^2) \sim 2454.8(a/2\pi c^2)$, 几乎接近于零色散值; 当 $r_2 = 0.28a$ 时, 随着群折射率增大, 带

过此改变最大限度地提升慢光特性。同样仿真分析导模曲线, 通过导模关系图得出 ν_g, n_g 及 D_{GV} 的变化规律。导模曲线的斜率变化描述了群速度的变化趋势, 此关系可由 (1) 式得出; 从群速度与归一化频率的关系图可以得出光被减慢的程度及相应的带宽; 而色散曲线描述了慢光的优劣, 色散值越小, 则慢光效果越优, 在慢光的平坦波段存在着较低的 D_{GV} , 在慢光的拐点处存在接近零值的 D_{GV} 。较小的 D_{GV} 使得光信号可在可接受的失真范围内传播。由 GVD 方程可知, 当 n_g 在 ω_0 附近的宽频范围内几乎不变时, 二阶导数几乎为零, 这对慢光器件和需高度保真的光信号的传输具有重要意义。

保持 $r_1 = 0.14a, r_3 = 0.31a$ 不变, 以 $0.01a$ 的步长在 $0.24a$ 至 $0.28a$ 内改变 r_2 。如图 5(a) 和 (b) 所示, 随着半径 r_2 的增大, ν_g 逐渐减小, 其最大值由 0.049 下降至 0.039, 与改变 r_3 引起群速度的变化相比较, r_2 的改变使得群速度下降的幅度更大, 由此可得, 邻近中心行的半径值对结构的性能影响较大。图 6 为当 $r_2 = 0.25a, 0.26a, 0.27a, 0.28a$ 时, 所对应的群折射率及相应的带宽, 可以得出, 带宽值 $\Delta\lambda$ 随着半径 r_2 的增大而逐渐减小, n_g 逐渐增大。

宽值减小, 所对应的 GVD 值为 $-2174.5(a/2\pi c^2)$ 至 $3712.3(a/2\pi c^2)$ 。根据 GVD 方程, 当 n_g 在 ω_0 附近的宽频范围内几乎不变时, 其二阶导数达到零, 这对慢光设备至关重要, 对高保真度的光信号传输也很重要。改变 r_2 使得结构的 GVD 维持为 $-6 \times 10^7 \sim 2 \times 10^7$, 这符合光传输对色散值的要求。当 $r_2 = 0.28a$ 时, 群折射率 n_g 达到最大, 为 26.16, 且带宽值 $\Delta\lambda$ 最小为 23.37 nm, 此时 NDBP 值最大为 0.3944。为了更方便观察规律, 参数值汇总于表 3。

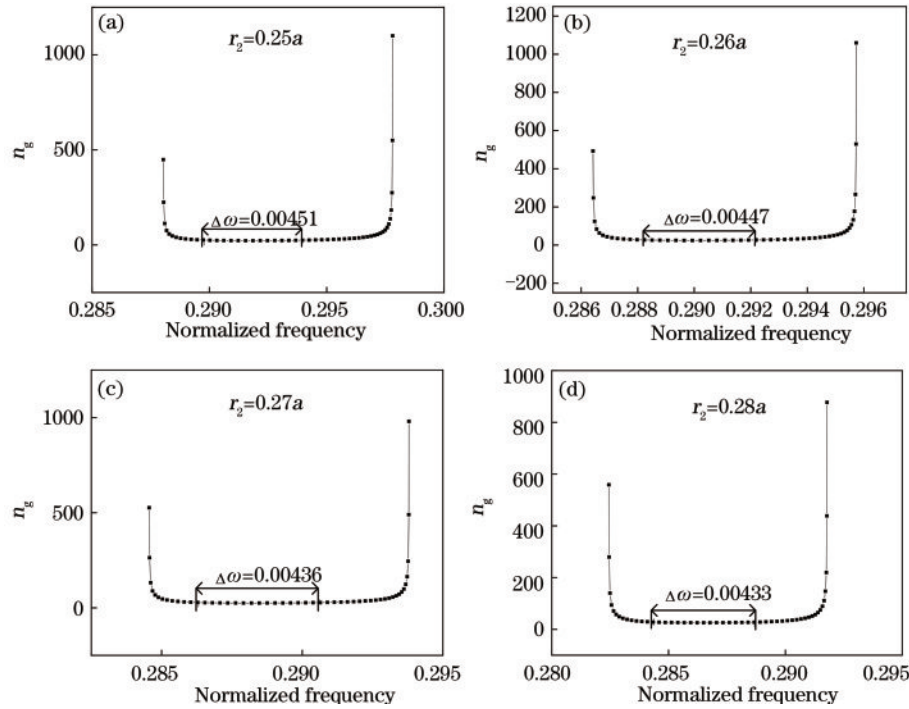


图 6 当 $0.25a \leq r_2 \leq 0.28a$ 时, 各个半径值带宽对比。(a) $r_2 = 0.25a$; (b) $r_2 = 0.26a$; (c) $r_2 = 0.27a$; (d) $r_2 = 0.28a$
 Fig. 6 When $0.25a \leq r_2 \leq 0.28a$, the bandwidth comparison of each radius value. (a) $r_2 = 0.25a$; (b) $r_2 = 0.26a$; (c) $r_2 = 0.27a$; (d) $r_2 = 0.28a$

表 3 $r_1 = 0.14a, r_3 = 0.31a$ 且 $0.24a \leq r_2 \leq 0.28a$, r_2 对慢光特性的影响

Table 3 Slow light properties affected by the radius r_2 for $0.24a \leq r_2 \leq 0.28a$ and $r_1 = 0.14a, r_3 = 0.31a$

| r_2/a | $\Delta\omega \times 10^4$ | $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \times 10^4$ | $\Delta\lambda/\text{nm}$ | n_g | NDBP | GVD($a/2\pi c^2$) |
|---------|----------------------------|---|---------------------------|-------|--------|---------------------|
| 0.24 | 50.0 | 169.6 | 26.29 | 18.41 | 0.3123 | -2089.9-2454.8 |
| 0.25 | 45.1 | 154.0 | 23.86 | 21.98 | 0.3384 | -2096.4-4596.7 |
| 0.26 | 44.7 | 153.6 | 23.80 | 22.17 | 0.3405 | -2220.4-3988.7 |
| 0.27 | 43.6 | 150.8 | 23.38 | 24.35 | 0.3671 | -2520.9-4550.5 |
| 0.28 | 43.3 | 150.8 | 23.37 | 26.16 | 0.3944 | -2174.5-3712.3 |

对 PCW 结构参数进行了完整的分析, 所得结构参数为 $r = 0.20a$, 同时使 $r_1 = 0.14a, r_2 = 0.28a$ 且 $r_3 = 0.31a$, 此时慢光效果最优。对此结果与在相同结构参数下未引入三行 InP 缺陷介质柱的情况所得结果进行对比, 如表 4 所示。可以看出, 引入 InP 本征缺陷使得带宽提升了近 50%, n_g 增大了近 44%, NDBP 值提升了近 116%。表 5 为所提结构的改善参数和不同文献中对应参数的比较, 本文与文

表 4 引入 InP 非本征缺陷与 Si 本征缺陷时慢光特性对比
 Table 4 Comparison of slow light characteristics when introducing InP extrinsic defects and Si intrinsic defects

| Type of defect | $\Delta\omega/10^4$ | $\frac{\Delta\omega}{\omega_0}/10^4$ | $\Delta\lambda/\text{nm}$ | n_g | NDBP |
|-----------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------|--------|
| With InP defect | 43.3 | 150.8 | 23.37 | 26.16 | 0.3944 |
| With Si defect | 27.3 | 100.5 | 15.57 | 18.14 | 0.1823 |

献[10]采用相同的晶格结构, 与未引入非本征缺陷介质柱相比, 所提结构带宽值得到提升的同时 NDBP 有了很大的改善。

表 5 不同文献的 $n_g, \Delta\lambda, \text{NDBP}$ 在 1550 nm 处
 Table 5 $n_g, \Delta\lambda$ at 1550 nm, and NDBP in different literatures

| Structure | $\langle n_g \rangle$ | $\Delta\lambda$ | NDBP |
|------------------------|-----------------------|-----------------|--------|
| Proposed structure | 26.16 | 23.37 | 0.3944 |
| Structure in Ref. [19] | 23.0 | | 0.385 |
| Structure in Ref. [20] | 24.01 | | 0.2728 |
| Structure in Ref. [21] | 850 | 0.6689 | 0.378 |
| Structure in Ref. [22] | 21 | 20.3 | |
| Structure in Ref. [23] | 20.1 | 23.04 | 0.3083 |
| Structure in Ref. [24] | 373.4 | 0.068 | |
| Structure in Ref. [10] | 48 | 12.21 | 0.378 |
| Structure in Ref. [9] | | | 0.245 |
| Structure in Ref. [25] | 54.55 | 9.13 | 0.32 |

4 结 论

通过在逆时针旋转 45° 的正方晶格中引入三条非本征缺陷 InP 介质柱, 构成光子晶体波导, 实现了具有高带宽和高 NDBP 的慢光传输。将缺陷棒置入中心行及与中心行相邻的第二行, 缺陷腔作为能量的存储器和光速的减速器, 增加了传播时间, 降低了传播速度。通过改变缺陷介质柱的半径, 完成了对衡量慢光性能的参数的优化。优化之后的参数为 $r_1 = 0.14a$, $r_2 = 0.28a$, $r_3 = 0.31a$, $\Delta\lambda = 23.37 \text{ nm}$, $n_g = 26.16$, 并且 NDBP 为 0.3944, 与此同时, 群速度色散在保证光传输过程中不失真的范围之内。研究了中心行介质柱及与其相邻两行缺陷棒对带宽和 NDBP 的影响。对此结果与相同结构参数下未引入非本征缺陷介质柱得到的结果相比较, 引入非本征缺陷介质柱情况下, 各个性能参数都获得了提高。与文献[10]相比较, 两者均采用了逆时针旋转 45° 的正方晶格结构, 但所提结构带宽提高了近 50%, 衡量慢光性能的综合参数 NDBP 也有明显的提高。因此, 所提方法为未来的光子晶体缓存发展提供了一种新的思路和方法。

参 考 文 献

- [1] Krauss T F. Why do we need slow light?[J]. Nature Photonics, 2008, 2(8): 448-450.
- [2] Liu Z, Wu R, Yan Q B, et al. Design and simulation of two-dimensional photonic crystal all-optical logic gates [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 182301.
刘振, 吴蓉, 严清博, 等. 二维光子晶体全光逻辑门的设计与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 182301.
- [3] Fu P D, Chen H M. Design and performance analysis of three-mode division multi/demultiplexer based on two-dimensional photonic crystals [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 020602.
付培栋, 陈鹤鸣. 基于二维光子晶体三模式模分复用/解复用器的设计与性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020602.
- [4] Settle M D, Engelen R J, Salib M, et al. Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth [J]. Optics Express, 2007, 15(1): 219-226.
- [5] Elshahat S, Abood I, Khan K, et al. Five-line photonic crystal waveguide for optical buffering and data interconnection of picosecond pulse[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(3): 788-798.
- [6] Danaie M, Geravand A, Mohammadi S. Photonic crystal double-coupled cavity waveguides and their application in design of slow-light delay lines [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2018, 28: 61-69.
- [7] Cui N D, Kou J T, Zhao H, et al. Optical true time-delay lines of photonic crystal slow light waveguides used in phased array radar[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0616001.
崔乃迪, 寇婕婷, 赵恒, 等. 应用于相控阵雷达的光子晶体慢光波导光实时延迟线[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0616001.
- [8] Wan Y, Li C H, Yun M J, et al. Realization of slow light effect for photonic crystal waveguide using graded eye-shaped scatterers[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.
- [9] Zhu N, Li Y Y, Chen C, et al. Slow light in dual-periodic photonic crystals based slotted-waveguide coupled cavity [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 83: 125-130.
- [10] Dang S Z, Shu J. Study and analysis on slow light in photonic crystal waveguide [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1025: 102565X.
- [11] Yi J, Zhu N. Research on slow light characteristics of nonlinear photonic crystal line defect waveguide with ring-shaped holes[J]. Optoelectronic Technology, 2018, 38(1): 55-57, 62.
易佳, 朱娜. 非线性光子晶体环型腔线缺陷波导的慢光特性研究[J]. 光电子技术, 2018, 38(1): 55-57, 62.
- [12] Abood I, Elshahat S, Khan K, et al. Slow light with high normalized delay-bandwidth product in low-dispersion photonic-crystal coupled-cavity waveguide[J]. Optics Communications, 2019, 439: 181-186.
- [13] Zhang W, Wang Z Y, Wang W C, et al. Investigation on a novel photonic crystal structure with dispersion-free slow light based on line-defect of quadrate air holes[J]. Chinese Journal of 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.

- [14] Schulz S A, O'Faolain D M, et al. Dispersion engineered slow light in photonic crystals: a comparison [J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(10): 104004.
- [15] Abedi K, Mirjalili S M. Slow light performance enhancement of Bragg slot photonic crystal waveguide with particle swarm optimization algorithm [J]. *Optics Communications*, 2015, 339: 7-13.
- [16] Mori D, Kubo S, Sasaki H, et al. Experimental demonstration of wideband dispersion-compensated slow light by a chirped photonic crystal directional coupler [J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5264-5270.
- [17] Johnson S, Joannopoulos J. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis [J]. *Optics Express*, 2001, 8(3): 173-190.
- [18] Li J, White T P, O'Faolain L, et al. Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides [J]. *Optics Express*, 2008, 16(9): 6227-6232.
- [19] Zhu N, Ren Q, Wang Y, et al. Slow light in photonic crystals waveguide constructed with symmetrically perturbed structure [J]. *Optik*, 2014, 125(11): 2616-2619.
- [20] Wang D B, Zhang J, Yuan L H, et al. Slow light engineering in polyatomic photonic crystal waveguides based on square lattice [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24): 5829-5832.
- [21] Lotfi H, Granpayeh N, Schulz S A. Photonic crystal waveguides with ultra-low group velocity [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10/11): 2743-2745.
- [22] Maache M, Hocini A, Khedrouche D. Geometrically tunable slow light based on a modified photonic crystal waveguide [J]. *Chinese Journal of Physics*, 2017, 55(6): 2318-2324.
- [23] Bagci F, Akaoglu B. A systematic analysis of hole size, hole-type and rows shifting on slow light characteristics of photonic crystal waveguides with ring-shaped holes [J]. *Optik*, 2014, 125(11): 2702-2707.
- [24] Janrao N, Janyani V. Slow light photonic crystal waveguide with large quality factor [J]. *Optik*, 2016, 127(3): 1260-1264.
- [25] Khodamohammadi A, Khoshshima H, Fallahi V. Slow light engineering in a photonic crystal slab waveguide through optofluidic infiltration and geometric modulation [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2017, 124(5): 712-717.