

应用于相控阵雷达的光子晶体慢光波导光实时延迟线

崔乃迪¹ 寇婕婷^{2*} 赵 恒¹ 曹国威¹ 王皖君¹ 郭 进¹ 冯俊波¹

¹中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088

²中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031

摘要 光子化研究是相控阵雷达的发展趋势, 光子晶体以其优异的集成度及光学特性在相控阵雷达光子化研究中具有广泛的应用前景。基于光子晶体波导慢光特性及热光调制原理, 设计了应用于相控阵雷达波束形成网路的光实时延迟线。通过优化光子晶体慢光波导参数, 所设计光子晶体光实时延迟线可实现延时量为 0~36.69 ps 的高精度调谐, 得到 23 GHz 以上的延时带宽。通过优化实时延迟线群速度随温度的色散特性, 温度每变化 1 °C, 延时量变化量在 0.36~1.57 ps/mm 范围内。所提出的基于光子晶体波导的光实时延迟线, 可实现延时量的高效、高精度调谐, 相对于传统电域波束形成网络, 具有集成度高、瞬时带宽大、调谐精度高等优点, 为高频段宽带相控阵雷达波束形成网络的研发提供了理论基础。

关键词 材料; 光子晶体; 相控阵雷达; 波束形成网络; 光实时延迟线

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0616001

Optical True Time-Delay lines of Photonic Crystal Slow Light Waveguides Used in Phased Array Radar

Cui Naidi¹ Kou Jieting² Zhao Heng¹ Cao Guowei¹ Wang Wanjun¹
Guo Jin¹ Feng Junbo¹

¹No. 38 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation Hefei, Anhui 230088, China

²Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The photonizing research is the development trend of phased array radar. Due to its excellent characteristics on the integration level and optical properties, the photonic crystals have extensive application prospect in the photonics research of optical true time-delay lines phased array radar. Based on the slow light characteristics and thermo-optical modulation theory, optical true time-delay lines applied in beam forming network of phased array radar are proposed. By optimizing parameters of the photonic crystal slow waveguide, high accurate modulation of of photonic crystal designed ranging from 0 ps/mm to 36.69 ps/mm is achieved. Meanwhile, the delay bandwidth larger than 23 GHz is realized. By optimizing variation characteristics of the group velocity with temperature, the time delay variation is in the range from 0.36 ps/mm to 1.57 ps/mm whenever the temperature changes 1 °C. The optical true time-delay lines based on photonic crystal proposed can achieve highly efficient and accurate modulation on the delay. Compared with the traditional electrical domain beam-forming network, it has the advantages of high integration, wide instantaneous bandwidth and high tuning accuracy, which can provide a theoretical basis for the beam-forming network research of the high frequency wideband phased array radar.

Key words materials; photonic crystal; phased array radar; beam-forming network; optical true time-delay lines

OCIS codes 160.3130; 160.5293; 160.5298; 230.5298

1 引 言

光子晶体又称为光半导体^[1-2], 具有控制光在其中传播的特性。通过制作光子晶体波导人工微结构可使

收稿日期: 2015-10-16; 收到修改稿日期: 2016-01-01

基金项目: 国家自然科学基金(61475144, 61307049, 61307040, 61306089)、安徽省自然科学基金(1408085MF118)

作者简介: 崔乃迪(1983-), 男, 博士, 工程师, 主要从事微纳光学器件以及光电集成方面的研究。E-mail: cuinaidi@163.com

* 通信联系人。E-mail: koujieting@163.com

光产生强烈的散射,并形成复杂的驻波形式,从而大幅度降低光在其中传播的群速度并形成慢光,即光子晶体慢光效应。相对于电磁自感透明^[3]、半导体材料载流子振荡^[4]以及光纤非线性效应^[5]等,光子晶体结构慢光效应对外部环境没有特殊要求,常温下就能实现,且具有集成度高的优点。所以,光子晶体慢光波导现已成为光实时延迟线^[6-7]、全光缓存^[8]及光与材料相互作用^[9]等领域的研究热点。

现阶段相控阵雷达是光子晶体慢光波导应用的一个崭新且极具吸引力的应用领域。光子晶体慢光波导可提供数十吉赫兹甚至更高的延时带宽^[10-12],同时,光子晶体的尺寸优势使得高度集成甚至芯片级光控波束形成变为可能,在对集成度要求较高的机载/星载相控阵雷达领域有着广泛的应用前景。基于光子晶体波导的慢光特性,设计制备应用于相控阵雷达波束形成网络的光实时延迟线,可从根本上解决现阶段相控阵雷达发展面临的性能受限及集成度低两大瓶颈问题,对相控阵雷达关键技术发展以及全光子雷达研究都有重要的现实意义。

光子晶体慢光波导具有慢光模式可操作性强及集成度高的优点,对光子晶体慢光波导群速度的高效、高精度调谐是其应用的主要障碍。目前,对光子晶体慢光波导结构折射率的控制是实现其群速度调谐的主要手段,包括微流体填充^[13]、热光效应调谐^[14-15]等。对于硅基材料光子晶体慢光波导,其高热光效应是对其群速度调谐的有效途径。

本文针对相控阵雷达领域波束形成网络的应用需要,提出基于光子晶体慢光波导的光实时延迟线,并通过设计光子晶体慢光波导结构,在满足相控阵雷达应用所需延时量、延时带宽的前提下,得到调谐精度高、调制难度低的光子晶体慢光波导光实时延迟线结构。相对于已有热光调谐光子晶体波导实时延迟线方案,在兼顾相控阵雷达实际应用需求的前提下提供了高精度延时调制方案,避免了“调不动”以及“调不准”现象的发生,为光子晶体慢光波导在新一代集成化光控相控阵雷达领域的应用提供了理论基础与设计方法。

2 设计原理

光子晶体慢光波导延迟线的延时调制问题归根结底是如何高效、高精度地对光子晶体慢光波导群速度调控的问题。硅基材料由于加工工艺成熟、与传统互补金属氧化物(CMOS)工艺兼容而成为目前光子晶体器件的首选制备材料之一,而硅基材料的高热光系数则为光子晶体慢光波导光实时延迟线群速度的热光调控提供了基础条件。由于光子晶体波导慢光模式较为复杂,如何实现高效、高精度的延时调制,并且避免“调不动”和“调不准”现象是目前光子晶体慢光波导热光延时调制需要解决的问题。

光子晶体慢光波导通过制作人工微结构产生强烈散射,并在光子带隙中引入慢光导模,从而实现光速减慢。利用相对简单的光子晶体慢光波导结构,可在较小器件尺寸下以光速几十甚至几百分之一的速率减慢。平面波展开法是光子晶体器件能带结构及色散特性常用的研究方法^[16-18],其基本思想是对周期性振幅和周期性结构进行空间傅里叶级数展开,将麦克斯韦方程组转化为本征方程并求解,得出其色散曲线,导模群速度及色散特性可由其沿波导方向的波数 $k(\omega)$ 的泰勒展开得到,即

$$k(\omega) = k_0 + k_1(\omega - \omega_0) + \frac{k_2}{2}(\omega - \omega_0)^2, \quad (1)$$

式中 $k_m = \left. \frac{d^m k}{d\omega^m} \right|_{\omega=\omega_0}$, 群速度 v_g 可由 $k_1 = \frac{1}{v_g}$ 计算得出,群速度色散系数 D 可由 $k_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D$ 计算得出。

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n_g}, \quad (2)$$

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2 k}{d\omega^2}, \quad (3)$$

其中 c 为光传播速度, n_g 为导模群折射率。

应用平面波展开法可得填充率为0.2634、具有2维三角晶格空气孔结构的W1型光子晶体波导能带结构,如图1所示。其中光子晶体结构材料为绝缘层硅材料(SOI), a 为晶格常数;空白区域为光子禁带,在光子禁带中的电磁波被禁止传播;圆点部分为电磁波的导带。空气的色散曲线也在图中标出,在空气色散曲线上部光子导带的有效折射率小于空气的有效折射率时,不满足全内反射条件,会造成垂直于基片平面方向的

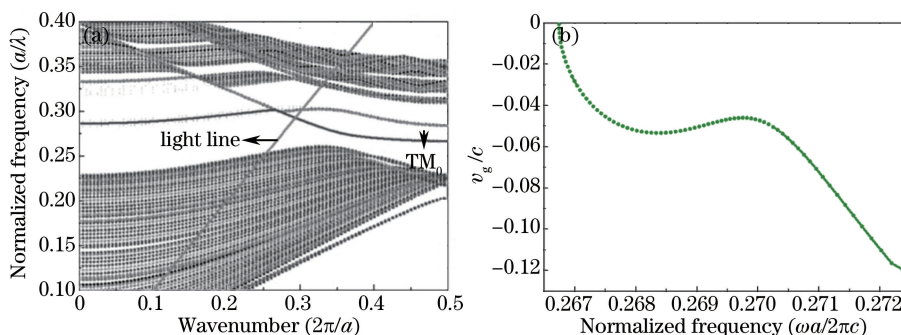


图1 光子晶体慢光波导能带结构图及群速度曲线。(a)填充率为0.2634的2维三角晶格空气孔结构W1型光子晶体波导能带结构图;(b)该结构光子晶体慢光波导群速度随归一化频率变化曲线

Fig. 1 Energy band structure and group velocity curves of the photonic crystal slow light waveguide. (a) Energy band structure of 2D triangular lattice air holes W1 type photonic crystal waveguide with filling rate of 0.2634; (b) curve of group velocity of the photonic crystal slow light waveguide with the normalized frequency

泄露损耗^[19],此处关注空气色散曲线下部的波导导模结构。该结构光子晶体波导有 TM_0 和 TM_1 两种模式,二者会聚一点并产生微型光子禁带^[20]。由图中 TM_0 模式曲线可见,随波数 k 的增大, TM_0 色散曲线趋于平缓,产生群速度降低的慢光效应。根据(2)式可得到该结构光子晶体波导群速度随归一化频率的变化曲线。

光子晶体慢光波导群速度热光调制的基础是其群速度随温度的平移特性。图2为群速度随有效折射率的变化曲线,其中绿色、红色及蓝色曲线分别为有效折射率变化为0、0.1及-0.1时该结构光子晶体慢光波导的群速度曲线。从图2可以看出,有效折射率变化并不改变群速度曲线形状,仅使其沿着归一化频率轴平移,因此针对某一固定归一化频率($f=a/\lambda$)的电磁波,可以通过改变有效折射率来调制其群速度。对于热光材料则通常可以通过改变温度来调制其中传播电磁波的群速度,从而实现对延时量的调制。如图2插图所示,针对归一化频率为0.273的电磁波,通过改变材料温度使得群速度曲线平移,可得到群速度为0.11c、0.14c和0.177c的3种延时状态,从而实现对群速度的有效调控。

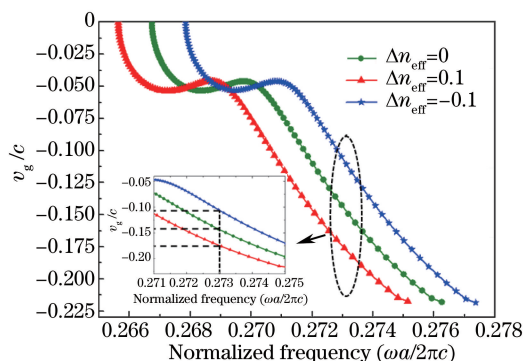


图2 群速度随有效折射率变化曲线

Fig. 2 Variation curves of group velocity with effective refractive index

根据上述调制方案,对光子晶体慢光波导的设计提出以下2点要求:1)光子晶体慢光波导群速度要尽量小,这样可以在较短的波导长度条件下实现较大的延时量调制范围;2)通过结构设计合理调控光子晶体慢光波导群速度曲线斜率(即群速度色散)。过大的群速度色散会使得群速度难以精确调控,造成“调不准”现象;而如果群速度色散过小,群速度调控效率则相对低下,造成调制功耗高和“调不动”现象。所以,通过结构设计得到尽量低的群速度及合理的群速度色散,对提高器件集成度、降低调制功耗、实现高精度高效的光子晶体慢光调制至关重要。

3 设计方法

对光子晶体波导慢光特性的修饰手段主要有改变光子晶体介质单元结构参数^[21-24]、改变线缺陷附近介质单元

位置参数^[25-27] 2种方法。此处通过改变线缺陷相邻两排空气孔的位置实现光子晶体波导的慢光特性的调节。

图 3 为上述光子晶体慢光波导结构示意图,其中材料为 SOI,结构为三角晶格空气孔结构。为了实现成群速度及群速度色散的有效调控,将靠近 W1 型光子晶体波导线缺陷的两排空气孔沿 x 方向平移 Δx 。

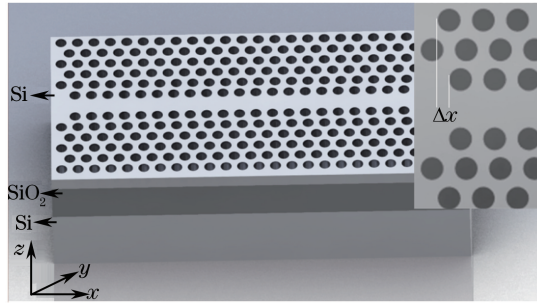


图 3 光子晶体慢光波导结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of the photonic crystal slow light waveguide

应用平面波展开法及(2)式可得不同平移量下的群速度随归一化频率的变化曲线,如图 4 所示。4 条曲线分别是 $\Delta x=0, 0.05w, 0.1w, 0.15w$ (其中 $w=2\sqrt{3}a-2r$, r 为空气孔半径) 4 种状态下的群速度随归一化频率的变化曲线,分别对应图中 I, II, III, IV 四条曲线。这里以 $\Delta x=0$ 时的延时曲线为例把曲线分为 3 段。其中 A 段群速度较高,难以在有限的波导长度下实现大延时;C 段群速度较小,但群速度曲线斜率(即群速度色散)较大,不利于对延时量的高精度调谐;B 段群速度相对较小,便于在单位长度下产生大延时,且其群速度色散适中,便于实现对延时量的精确调谐。从图 4 可以看出,随着沿 $+x$ 方向移动量的增大,延时曲线总体向高频方向移动。针对所关注的曲线 B 段,群速度随 Δx 增大而减小,群折射率色散随 Δx 增大而增大。相对于 $\Delta x=0, 0.05w$ 的 I, II 两条曲线,曲线 III 的群速度更低。而对于曲线 IV,曲线 III 的群速度虽然相对较高,但其群速度色散更小。综合考虑群速度及群速度色散,选择将线缺陷附近 2 排空气孔沿 x 轴正方向移动 $0.15w$ 以获得所需的光子晶体慢光波导结构。

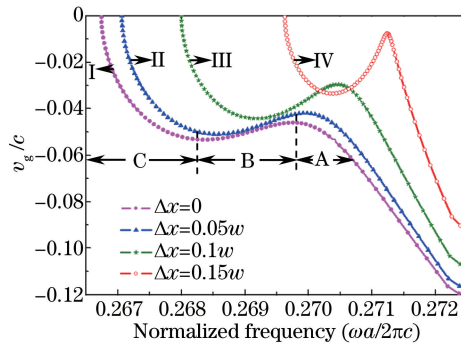


图 4 Δx 对群速度的影响

Fig. 4 Influence of Δx on the group velocity

根据(2)式及(3)式可以得到所设计光子晶体慢光波导群速度及群速度色散随波长的变化曲线,如图 5(a) 所示。从图 5 可以看出,随着传输波长的增加,该结构光子晶体慢光波导群速度随传输波长的增加而升高,从 $0.02958c$ 升高到 $0.04387c$ (其中 $c=3\times 10^8$ m/s),且曲线较平滑,斜率较稳定。通过对光子晶体慢光波导进行温度调控使群速度曲线平移,得到与波长调控相同的效果(如图 1 所示),从而实现对光子晶体慢光波导群速度的调谐。由波长-色散曲线可见,对于该结构光子晶体慢光波导,其波长-色散参数 D 值呈现先升高再降低的趋势。而针对热光调制的延时器件,延时量变化量随温度的变化关系则更具重要意义。为了测试调谐温度对所设计光子晶体慢光波导光实时延迟线的影响,定义长度为 1 mm 的该结构光子晶体慢光波导,其调谐温度每变化 1°C 时延时量的变化量为 D_{GVT} ,单位为 $\text{ps}/(\text{mm}\cdot^\circ\text{C})$ 。图 5(b)给出了 D_{GVT} 随调谐温度的变化曲线,可见调谐温度每升高 1°C , 1 mm 该结构光子晶体慢光波导延时量变化为 $0.36\sim 1.57$ ps。目前的热光电极制备工艺及热光调制能力完全可以满足该结构光子晶体慢光波导光实时延迟线高效、高精度热光调谐要求。

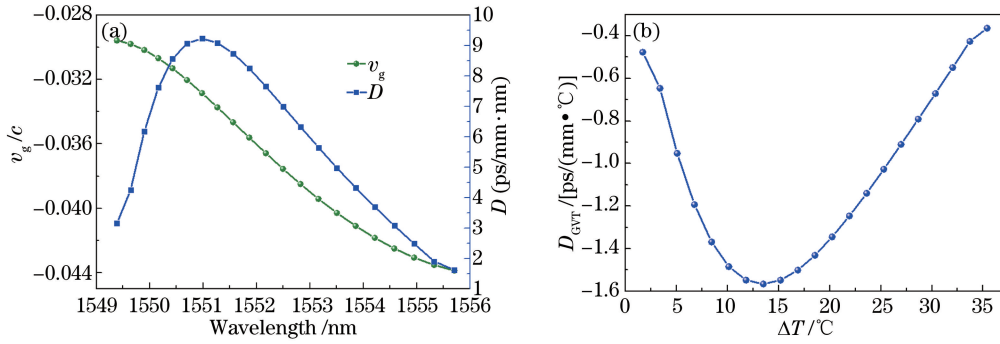


图 5 所设计光子晶体慢光波导特性曲线。(a) 群速度及群速度色散随波长变化曲线；
(b) 延时量变化量 D_{GVT} 随温度的变化曲线

Fig. 5 Characteristic curves of the photonic crystal slow light waveguide designed. (a) Variation curves of the group velocity and group velocity dispersion with wavelength; (b) variation curve of time delay variation D_{GVT} with temperature

硅基材料具有优异的热光特性,其中硅的热光系数为 $1.8 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$,二氧化硅热光系数为 $10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。将上述热光特性代入平面波展开法及光子晶体慢光特性计算方程(2)、(3)式中,可以得到该结构光子晶体慢光波导在 1550 nm 的群速度及延时量随温度的变化曲线,如图 6(a)所示,可见随温度升高光子晶体慢光波导群速度增大。延时量可认为是相对值,这里以群速度最高点($v_g=0.04387c$)为基准,得到图中所示延时量随温度变化曲线,从图 6(a)可以看出随光子晶体慢光波导温度升高,延时量减小。针对长度为 1 mm 的该结构光子晶体慢光波导,通过对光子晶体慢光波导的热光调谐可以实现延时量从 0 ps 到 36.69 ps 的连续调制。图 6(b)为该结构光子晶体慢光波导在 1550 nm 延时量随延时带宽的变化曲线。根据相控阵雷达波束形成网络系统的实际要求,定义延时量变化 ± 0.25 ps 范围内的频率区间为该结构光实时延迟线的延时带宽。由曲线可见,该结构光子晶体慢光波导延时带宽随延时量变化呈现先减小后增大的趋势,其可提供 23 GHz 以上的延时带宽(最大延时带宽可达 101 GHz),因此可以满足相控阵雷达领域光实时延迟线瞬时带宽的需要。

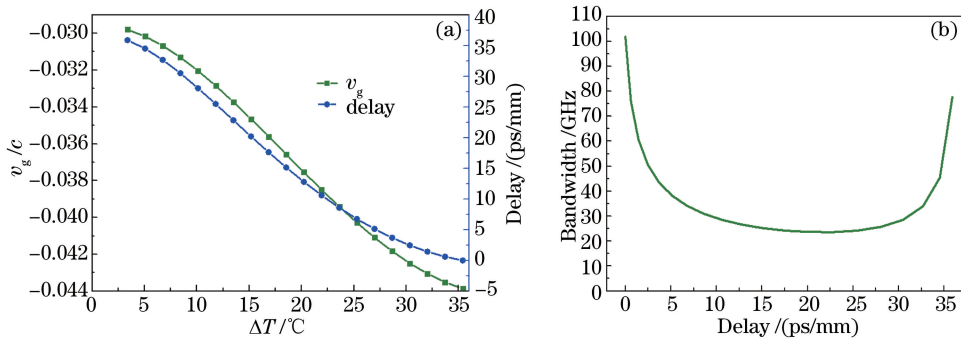


图 6 所设计光子晶体慢光波导在 1550 nm 的延时特性曲线。(a) 群速度及延时量随温度的变化曲线；
(b) 延时带宽随延时量的变化曲线

Fig. 6 Delay characteristics of the photonic crystal slow light waveguide designed at 1550 nm. (a) Group velocity and its time delay curves with temperature ; (b) variation curve of the delay bandwidth with time delay

4 结 论

提出应用于相控阵雷达领域的光子晶体热光调控光实时延迟线,并通过对光子晶体慢光波导结构参数设计来调控其群速度及群速度色散,实现对光子晶体光实时延迟线的延时量及延时带宽的高效、高精度调谐,避免了“调不动”及“调不准”现象的发生。通过合理设计光子晶体慢光波导结构,提出的光实时延迟线可实现每毫米长度 0~36.69 ps 延时量的高精度调谐,并获得了 23 GHz 以上的延时带宽。所设计的光子晶体慢光波导光实时延迟线兼顾了热光调谐效率及精度两方面,为基于光子晶体结构的相控阵雷达领域光实时延迟线的研究及应用提供了理论基础。

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 Sajeev J. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Kash M M, Sautenkov V A, Zibrov A S, *et al.*. Ultraslow group velocity and enhanced nonlinear optical effects in a coherently driven hot atomic gas[J]. Phys Rev Lett, 1999, 82(26): 5229-5232.
- 4 Ku P C, Sedgwick F, Chang-Hasnain C J, *et al.*. Slow light in semiconductor quantum wells[J]. Opt Lett, 2004, 29(19): 2291-2293.
- 5 Sharping J E, Okawachi Y, Gaeta A L. Wide bandwidth slow light using a Raman fiber amplifier[J]. Opt Express, 2005, 13(16): 6092-6098.
- 6 Povinelli M, Steven J, Joannopoulos J. Slow light, band-edge waveguides for tunable time delays[J]. Opt Express, 2005, 13(18): 7145-7159.
- 7 Jacob K. Adiabatically tunable optical delay lines and their performance limitations [J]. Opt Lett, 2005, 30(20): 2778-2780.
- 8 Zhai Yi, Tian Huiping, Ji Yuefeng. Slow light property improvement and optical buffer capability in ring-shape-hole photonic crystal waveguide[J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(20): 3083-3090.
- 9 Soljačić M, Johnson S G. Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity[J]. J Opt Soc Am B, 2002, 19(9): 2052-2059.
- 10 Baba T, Kawasaki T, Sasaki H, *et al.*. Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide[J]. Opt Express, 2008, 16(12): 9245-9253.
- 11 Settle M D, Engelen R J P, Salib M, *et al.*. Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth[J]. Opt Express, 2007, 15(1): 219-226.
- 12 Xu Qianfan, Dong Ping, Lipson M. Breaking the delay-bandwidth limit in a photonic structure[J]. Nature Physics, 2007, 3(6): 406-410.
- 13 Casas-Bedoya A, Husko C, Monat C, *et al.*. Slow-light dispersion engineering of photonic crystal waveguides using selective microfluidic infiltration[J]. Opt Lett, 2012, 37(20): 4215-4217.
- 14 Vlasov Y A, O'Boyle M, Hamann H F, *et al.*. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides [J]. Nature, 2005, 433(7064): 65-69.
- 15 Ebnali-Heidari M, Grillet C, Monat C, *et al.*. Dispersion engineering of slow light photonic crystal waveguides using microfluidic infiltration[J]. Opt Express, 2009, 17(3): 1628-1635.
- 16 Lidroikis E, Sigalas M M, Soukoulis C M, *et al.*. Tight-binding parameterization for photonic band gap materials[J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(7): 1405-1408.
- 17 Leung K M, Liu Y F. Full vector wave calculation of photonic band structures in face-centered-cubic dielectric media[J]. Phys Rev Lett, 1990, 65(21): 2646-2649.
- 18 Johnson S G, Joannopoulos J D. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis [J]. Opt Express, 2001, 8(3): 173-190.
- 19 Mazoyer S, Lalanne P, Rodier J C, *et al.*. Statistical fluctuations of transmission in slow light photonic-crystal waveguides[J]. Opt Express, 2010, 18(14): 14654-14663.
- 20 Olivier S, Benisty H, Weisbuch C, *et al.*. Coupled-mode theory and propagation losses in photonic crystal waveguides [J]. Opt Express, 2003, 11(13): 1490-1496.
- 21 Swati R, Ravindra S, Rue RMDL. Slow light miniature devices with ultra-flattened dispersion in silicon-on-insulator photonic crystal[J]. Opt Express, 2009, 17(16): 13315-13325.
- 22 ASäynätjoki A, Mulot M, Ahopelto J, *et al.*. Dispersion engineering of photonic crystal waveguides with ring-shaped holes[J]. Opt Express, 2007, 15(13): 8323-8328.
- 23 Li Changhong, Wan Yong, Mao Qiangming. Research of slow light performances of photonic crystal coupled resonator optical waveguides formed by oval rods cavities[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0416002.
李长红, 万 勇, 毛强明. 椭圆柱微腔光子晶体耦合腔波导的慢光特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0416002.
- 24 Han Jintao, Zhang Wei, Wei Fengjuan, *et al.*. Investigation of wideband slow light in Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ photonic crystal slab waveguides[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0606002.

- 韩金涛, 张 巍, 魏凤娟, 等. $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫基光子晶体平板波导的宽带慢光特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0606002.
- 25 Mizuki S, Norihiro I, Yosuke H, *et al.*. Nonlinear enhancement in photonic crystal slow light waveguides fabricated using CMOS-compatible process[J]. Opt Express, 2011, 19(22): 22208-22218.
- 26 Ishikura N, Hosoi R, Hayakawa R, *et al.*. Photonic crystal tunable slow light device integrated with multi-heaters[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(22): 221110.
- 27 Dong Xiaowei, Quan Wei. Wideband and low group velocity in a novel photonic crystal waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s106007.
- 董小伟, 权 炜. 宽带低群速度新型光子晶体慢光波导[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s106007.