

文章编号: 0253-2239(2009)05-1374-05

聚合物光子晶体波导中慢光传输的电光动态调制

王雪莹 田慧平 李长红 纪越峰

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 全光缓存器是未来全光网络中不可或缺的关键器件。针对可控光延迟和光存储的应用需求,研究了光子晶体波导中慢光传输的外部动态调制。设计了一种新型的聚合物光子晶体波导结构。用平面波展开法仿真得到该波导结构带隙中存在单一的 TE 导模,导模带边处的群速度可达 $10^{-2}c$ 。由于基底聚合物材料具有高电光系数和瞬态的电光响应时间,且导模慢光传输产生的电磁场局域对电光效应有增强作用,可在低调制电压的条件下实现对慢光导模的大范围动态调制。数值分析得到在外加调制电压为 80 V 时导模带边波长的移动幅度达 80.8 nm。慢光导模的移动随调制电压的变化基本呈线性关系,且调制的灵敏度约为 1 nm/V。这种线性的外部动态调制基本可满足全光网络对慢光缓存器的需求。

关键词 光子晶体波导;动态调制;平面波展开法;聚合物;慢光

中图分类号 O734⁺.1

文献标识码

Adoi: 10.3788/AOS20092905.1374

Tunable Slow Light by Electro-Eptic Effect in Polymer Photonic Crystal Waveguide

Wang Xueying Tian Huiping Li Changhong Ji Yuefeng

(Key Laboratory of Optical Communications and Lightwave Technology, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract All-optical buffers have been considered as essential components for all-optical communications. Considering the requirements of controllable optical delay lines and optical buffers, the external dynamic tuning of slow light in photonic crystal waveguides has been studied. A novel photonic crystal waveguide on polymer substrate is proposed. Numerical study using plane wave expansion method shows that this structure supports a single guided mode transmission, which allows a low group velocity of $10^{-2}c$ in the vicinity of band edge. Since the substrate material possesses a high electro-optic coefficient and a subpicosecond nonlinear response time, and local field effect induced by slow light transmission can enhance electro-optic effect greatly, these properties offer the opportunity to tune the slow light mode in wide frequency range with low power. Numerical analysis shows that by applying an external voltage of 80 V, the guided mode will shift 80.8 nm, and moreover the wavelength shift is nearly linearly increased with the increase of applied modulated voltage. Modulation sensitivity is about 1 nm/V. The flexible dynamical tuning of slow light mode can meet the requirements for the use of optical buffer in all-optical network in principle.

Key words photonic crystal waveguide; dynamic tuning; plane-wave expansion method; polymer; slow light

1 引言

光子晶体波导 (Photonic crystal waveguide,

PCW) 中,导模受到光子晶体的强结构色散,群速度会大幅度降低,形成光子晶体慢光效应^[1]。慢光由

收稿日期: 2008-08-28; 收到修改稿日期: 2008-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(60707001,60711140087)、国家 973 计划(2007CB310705)、国家 863 计划(2007AA01Z247)、新世纪优秀人才计划(NCET-07-0110)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”(IRT0609)和科技部国际合作计划(2006DFA11040)资助项目。

作者简介: 王雪莹(1985-),女,硕士研究生,主要从事宽带通信网、光子晶体方面的研究。E-mail: gwxy324@gmail.com

导师简介: 田慧平(1976-),女,博士,副教授,主要从事光学传输与超快过程、光纤通信与光子晶体方面的研究。

E-mail: hptian@bupt.edu.cn

于在光缓存,光存储,时域光信息处理方面有潜在应用^[2~3],已经成为目前光学领域的研究热点。经过理论研究和实验观察^[4~6]可知,光子晶体与其他可实现慢光的介质相比,潜在的带宽大;结构设计灵活,通过合理设计,可以在任意波长上实现慢光;且光子晶体结构体积小,便于与现有的光通信器件集成,因此基于光子晶体的慢光具有良好应用前景。目前光子晶体慢光的研究大多集中在如何得到更慢的光速度^[7],或改善慢光性能^[8~9],如减小导模的传输损耗、增大可用的工作带宽、改善群速度色散特性等,但对于实现灵活可控慢光传输的研究相对较少。在光子晶体集成光路、光缓存器等实际应用中,慢光传输的动态调制显得更加重要。

很多物理效应都可以实现光子晶体特性的动态调制^[10~13],包括声光效应、电光效应、热光效应、电吸收效应等。目前,由于可获得的折射率变化太小且制造工艺复杂,可调的光子晶体器件很难实现。由于聚合物材料具有很高的电光系数^[14](10 pm/V~170 pm/V)以及瞬态的电光响应时间(纳秒量级),本文在光子晶体的设计中选择聚合物材料作为基底材料。此外,聚合物材料可沉积在任何半导体材料上,可低温、大规模、低成本制作,是制作可调光子晶体,实现光子集成的合适材料。光子晶体波导中慢光传输引起的电磁场局域会显著增强介质的非线性效应,受局域场因子的影响^[15~16],光子晶体的电光系数会显著增加,从而增大了可获得的折射率变化范围,实现更有效的电光调制。因此,在聚合物光子晶体波导中可实现低调制电压的高速电光调制。本文研究了基于电光效应的聚合物光子晶体波导中慢光传输的动态调制。

2 PCW 结构设计

在光学器件常用的聚合物材料中,聚苯乙烯(Polystyrene)具有很低的玻璃化转变温度,很高的电光系数($\gamma_{33} = 80$ pm/V)^[14],易于进行刻蚀制作光子晶体。而且折射率($n = 1.59$)^[17]相对较高,所以我们选择聚苯乙烯作为 PCW 的基底材料。本文设计的光波导结构如图 1 所示。在聚合物聚苯乙烯基底上刻蚀呈三角晶格排列的圆形空气孔,增加其中一行空气孔的半径形成光子晶体线缺陷波导。频率限制在光子带隙(PBG)中的光,在波导中被局域在缺陷中,并沿着缺陷方向传输。入射光波为 TE 极化,即导模的电场分量垂直于的空气孔的轴向(空气

孔沿 Y 切方向);线缺陷沿着晶体的 X 方向;金属电极加在波导的两侧,即调制电压沿晶体的 Z 方向。聚苯乙烯材料的二阶极化率张量可用一个矩阵来表达,电光系数 γ_{33} 是极化张量矩阵中的分量,由于 $\chi^{<2>}$ 是沿着结构的 Z 方向,与所加电极的方向是一致的,所以这样的结构设计使得可以较低的电压实现对材料折射率较大范围的电光调制。

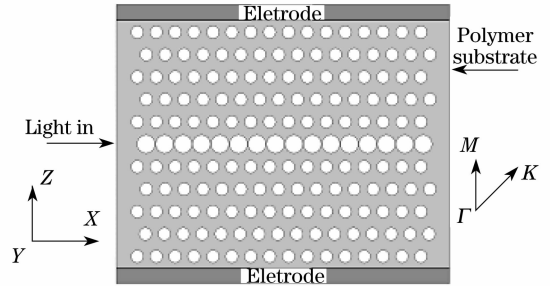


图 1 聚合物光子晶体波导结构示意图

Fig. 1 Schematic of line defect photonic crystal waveguide (PCW) in polymer substrate

为了使聚合物光子晶体波导能支持通信波段波长(1550 nm)附近的单模传输,设计晶格常数 $a = 700$ nm,空气孔半径 $r = 0.38a$,缺陷半径 $r_0 = 0.5a$ 。

3 数值模拟及分析

3.1 能带结构

用平面波展开法计算上述光子晶体波导 TE 模的能带结构^[18],可得到归一化频率与沿波导方向的波矢 k 之间的关系。由于入射光波沿 x 方向传输,所以只就波矢 k 沿 x 方向的情形计算如图 2 所示。可以看到,光子晶体禁带(图上标记为两条虚线之间的频率范围)中存在能够沿缺陷传输的单一 TE 模的导模,标记为“Guided mode”,导模带边的归一化频率为 0.4564,对应的波长为 1533.7 nm。

禁带中导模的群速度可通过下面公式计算^[5]:

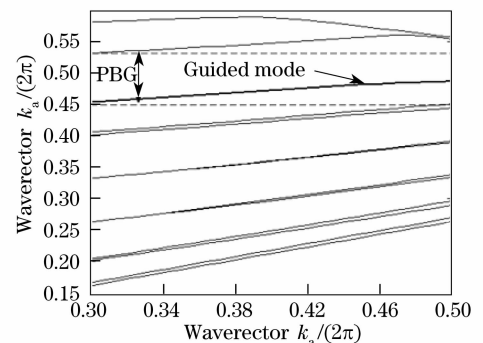


图 2 光子晶体波导带隙图

Fig. 2 Band-gap diagram of PCW

$$V_g = \frac{d\omega}{dk}, \quad (1)$$

即带隙图中导模对应的色散曲线的斜率。可以看到,带隙图(图2)中的导模非常平坦,对应着很小的群速度。计算得到导模群速度随归一化频率的变化曲线如图3所示,其中实线对应的是本文所讨论的归一化频率段。

可以看出,导模的群速度小于 $0.183c$ (c 为真空中的光速),导模带边处的最小群速度为 $0.02c$ 。

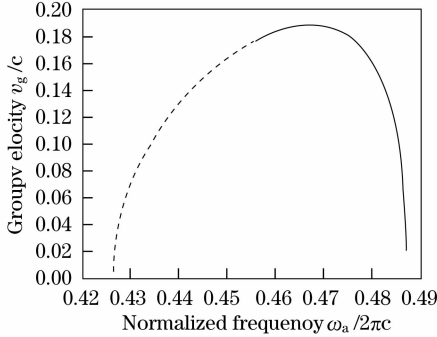


图3 导模的群速度曲线

Fig. 3 Group velocity of the guided mode versus normalized frequency

3.2 基底材料折射率变化的数值计算

在外加调制电压的作用下,聚苯乙烯材料的折射率变化主要受普克尔效应的影响,与材料的二阶极化率相关,可表达为^[14]

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_{\text{poly}}^3 \gamma_{33} \frac{U}{e}, \quad (2)$$

式中 γ_{33} 是聚苯乙烯的电光系数,与材料的二阶极化率 $\chi^{<2>}$ 相关, n_{poly} 为聚苯乙烯材料的折射率, U 为外加的调制电压, e 为电极之间的距离。

式(2)中考虑的是整体聚苯乙烯材料的非线性特性,打孔制作光子晶体后就必须考虑由于微结构引起的二阶极化率的变化^[14]。光子晶体中的有效二阶极化率由局域场因子 f 决定,可表达为^[19]

$$\chi_{\text{PC}}^{<2>} = f^3 \chi_{\text{BULK}}^{<2>}, \quad (3)$$

式中, $\chi_{\text{PC}}^{<2>}$ 为 PCW 中的有效二阶极化率, $\chi_{\text{BULK}}^{<2>}$ 为整体聚苯乙烯材料中二阶极化率。

考虑局域场因子后,折射率随外加电场变化的表达式变为^[12]

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_{\text{poly}}^3 f^3 \gamma_{33} \frac{U}{e}; \quad (4)$$

而光子晶体中局域场因子 f 的计算可按式(5)进行^[20]:

$$f = \sqrt{\frac{V_g^{\text{bulk}}}{V_g^{\text{PC}}}}, \quad (5)$$

其中 V_g^{bulk} 为光在聚苯乙烯介质中传播的速度, V_g^{PC} 为光在光子晶体波导中传播的速度。在带隙之外,保持整体材料的特性, $V_g^{\text{bulk}} \approx V_g^{\text{PC}}$, 局域场因子的值约为 1; 在带隙内,由于导模的传输的速度很慢, $V_g^{\text{PC}} \ll V_g^{\text{bulk}}$, 局域场因子的值大于 1。由图3的群速度可以得到带隙内局域场因子 f 随归一化频率的变化关系如图4所示。

可以看出,由于导模在聚合物光子晶体中的群速度的降低,局域场因子的值急剧增大,在导模带边附近的平坦的慢光区域,群速度的平均值为 $0.04c$, 由式(5)计算得出 $f = 3.97$ 。

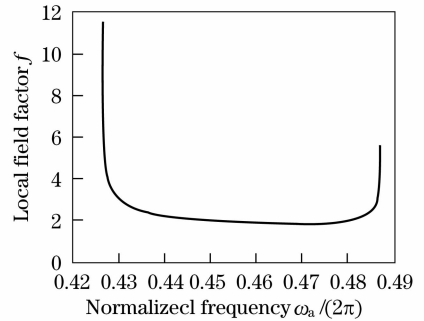


图4 带隙内的局域场因子

Fig. 4 Local field factor inside the bandgap

图5对比分析了在不同调制电压下 PCW 基底材料折射率与整体聚苯乙烯材料折射率的变化。

可以看出,在 PCW 可获得的折射率的变化为整体聚苯乙烯材料的 50~80 倍。光子晶体中慢光传输引起的电磁局域作用极大地增强了电光效应。

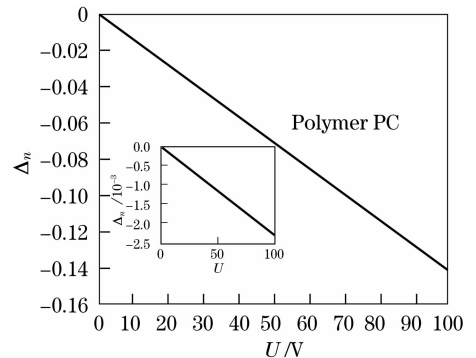


图5 材料折射率随外加电压的变化规律

Fig. 5 Variation of the refractive index versus applied voltage for both bulk polymer and polymer PCW

3.3 动态调制

考虑 PCW 的结构设计,取如下参数: $e = 6.2 \mu\text{m}$, $n_{\text{poly}} = 1.59$, $\gamma_{33} = 80 \text{ pm/V}$ 。

在不同外加调制电压下,分析得到 PCW 的能带结构如图6所示。

可以看出,随着外加电压的增加,导模带边的归一化频率明显地向高频方向移动。在调制电压 $U=0\text{ V}$ 、 20 V 、 50 V 、 80 V 时,导模带边的归一化频率分别为 0.4564 、 0.4625 、 0.4709 、 0.4818 ,各自对应的导模带边的波长分别为 1533.7 nm 、 1513.5 nm 、 1486.5 nm 和 1452.9 nm ,导模带边波长的移动 $\Delta\lambda$ 分别为 0 nm 、 -20.2 nm 、 -47.2 nm 、 -80.8 nm 。导模频率的变化表明,可通过外加调制电压的变化方便的控制导模传输的导通与截止,实现对慢光导模的选频与滤波。

计算不同调制电压下导模的群速度如图 6 所示。可以看出,随外加调制电压的增加,导模保持慢光传输的特性,群速度有所下降;另外,对于一个确定的传输频率,如图 6 中竖直虚线对应的频率位置,导模传输的群速度随调制电压的升高具有较大幅度的降低,这一性能为延迟时间的动态控制提供了可能。

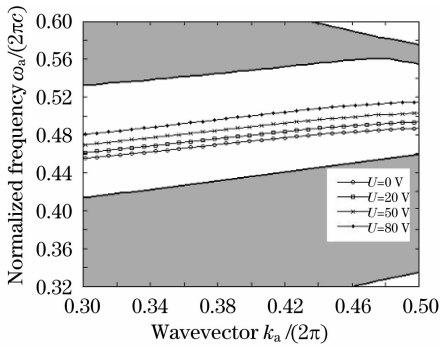


图 6 外加调制电压时导模带隙移动特性
Fig. 6 Modulated band gap of PCW versus applied modulated voltage

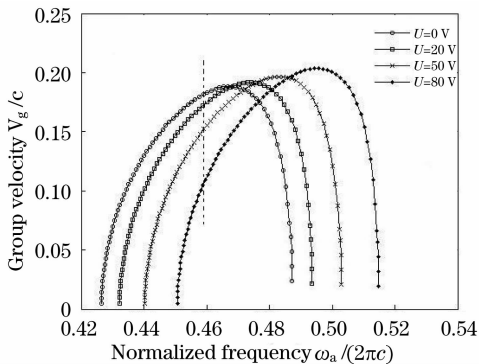


图 7 导模的群速度曲线随外加电压的变化规律
Fig. 7 Group velocity of the guided mode as a function of applied voltage

为了更明确描述导模的带边波长随外加调制电压的变化,又对其变化规律进行了仿真分析,结果如图 8 所示。

可以看出,导模的带边波长随调制电压的变化基本呈线性规律,慢光导模移动随电压变化的灵敏度约为 1 nm/V 。所以,通过调节电压的大小,可以在很宽的频率范围内实现对导模频率的动态控制,这种控制作用基本可满足密集波分复用(DWDM)系统对光延迟和光缓存的需求(DWDM 系统信道间隔 $0.2\text{ nm}\sim 1.2\text{ nm}$)。

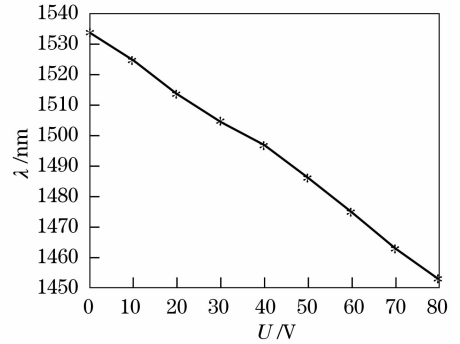


图 8 导模带边波长随外加电压的调制规律

Fig. 8 Guided mode shift as a function of applied voltage

4 结 论

本文研究了基于电光效应的聚合物光子晶体波导中慢光传输的动态调制。设计了一种聚合物基底光子晶体波导结构,该结构支持 TE 模的单模传输,且导模带边的群速度可达 $0.02c$;计算得出 PCW 中慢光速所引入的局域场因子对电光效应有显著的增强作用。最后分析了外加调制电压对慢光导模特性的电光动态调制。数值仿真的到该结构在低调制电压的条件下实现了对慢光导模的大范围动态调制。调制灵敏度约为 1 nm/V 。这种调制效果可实现慢光导模的开关、选频、和群速度调制,可满足全光网络对慢光光缓存动态调制的需求。

参 考 文 献

- 1 T. F. Krauss. Slow light in photonic crystal waveguides[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**: 2666~2670
- 2 Toshihiko Baba, Daisuke Mori. Potential of slowlight in photonic crystal[C]. *SPIE*, **6351**: 63511Z-1~63511Z-9
- 3 D. J. Gauthier, A. L. Gaeta, R. W. Boyd. Slow light: from basics to future prospects[J]. *Photonics Spectra*, March, 2006: 44~50
- 4 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
- 5 Alex Figotin, Ilya Vitebskiy. Slow light in photonic crystals[J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2006, **6**(3)293~382
- 6 Liang Qingchang, Wang Haihua, J iang Zhankui. Investigation on electromagnetically induced transparency and slowing-down of group velocity in $\text{Eu}^{3+} : \text{Y}_2\text{SiO}_5$ Crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 946~950

- 梁卿昌,王海华,蒋占魁. $\text{Eu}^{3+} : \text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体中电磁感应透明及群速度减慢研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 946~950
- 7 M. Svaluto Moreolo, V. Morra, G. Cincotti. Design of photonic crystal delay lines based on enhanced coupled-cavity waveguides [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**, 064002-1~064002-6
- 8 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. Express*, 2007, **15**(1): 219~226
- 9 DaisukeMori, Toshihiko Baba. Wideband and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(23): 9398~9408
- 10 M. T. Tinker, J-B. Lee. Thermal and optical simulation of a photonic crystal light modulator based on the thermo-optic shift of the cut-off frequency[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(8): 7174~7188
- 11 Edilson A. Camargo, Harold M. H. Chong, Richard M. De La Rue. 2D Photonic crystal thermo-optic switch based on AlGaAs/GaAs epitaxial structure[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(4): 588~592
- 12 Matthieu Roussey, Fadi I Baida. Experimental and theoretical observations of the slow-light effect on a tunable photonic crystal[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(6):1416~1422
- 13 Li Dashan, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Photorefractive Grating Dynamics under Large Modulation and Strong Applied Electric Field[J], *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 148~154
李大汕,刘立人,刘德安等. 强外加电场与大调制度下光折变动力学光栅形成研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(1): 148~154
- 14 Jan Michael Brosi, Christian Koos, Lucio Claudio Andreani *et al.*. High-speed low-voltage electro-optic modulator with a polymer infiltrated silicon photonic crystal waveguide[J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**N(o. 6): 4177~4191
- 15 M. Soljac ić, J. D. Joannopoulos. Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals[J]. *Nature Material*, 2004, **13**: 211~218
- 16 M. Soljacić, S. G. Johnson, S. Fan, E. Ippen *et al.*. Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2002, **19**(9): 2052~2059
- 17 Choon-Gi Choi, Chul-Sik Kee, Helmut Schift. Fabrication of polymer photonic crystal slabs using nanoimprint lithography[J]. *Current Appl. Phys.*, 2006, **6**(S1): e8~e11
- 18 Quan Yujun, Han Peide, Lu Xiaodong *et al.*. A Numerical Method to Calculate and Analyze of Defect Modes in Two-Dimensional Photonic Crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1841~1846
全宇军,韩培德,陆晓东等. 一种计算和分析二维光子晶体缺陷模式的方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(12): 1841~1846
- 19 Luca Razzari, Denis Träger, Magali Astic. Kerr and four-wave mixing spectroscopy at the band edge of one-dimensional photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**: 231106-1~231106-3
- 20 Yannick Dumeige, Isabelle Sagnes, Paul Monnier *et al.*. $\chi^{(2)}$ semiconductor photonic crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**: 2094~2101