

一维非线性光子晶体全光开关的数值研究*

吴冰冰, 何晓东[†], 薛伟, 全薇, 胡贵军, 王媛媛

(吉林大学 通信工程学院 光通信系, 长春 130012)

摘要:在光子晶体的缺陷层内掺入 Kerr 介质, 基于 Kerr 非线性效应导致的缺陷态迁移原理, 设计了两种一维光子晶体全光开关结构. 应用时域有限差分(FD-TD)法, 编制 Matlab 计算程序, 对全光开关进行数值特性分析. 讨论频率混合效应对全光开关的影响. 观察光子局域效应增强光子晶体非线性的现象, 验证了光子局域效应与光子晶体完整周期结构的层数有关, 层数太少光子局域效应不明显.

关键词:光子晶体; 全光开关; 非线性; 频率混合; 光子局域

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-293-5

0 引言

全光开关是一种重要的集成光子学器件, 完全利用光子与介质的相互作用来实现对光传输状态的控制, 在光通信等领域具有广阔的应用前景. 光子晶体是一种折射率在空间周期性变化的新型人造光子学材料, 具有独特光子禁带^[1-2]和光子局域特性, 能够有效地控制光的传输状态, 因而是实现全光开关的重要基础.

光子晶体全光开关的实现, 主要依赖光子与非线性光子晶体的相互作用, 由非线性效应导致的缺陷态迁移是实现光子晶体全光开关的一种重要原理. 本文根据该原理, 设计了两种全光开关结构; 应用 FD-TD 法, 参考 Tran 分析光子晶体所采用的技术^[3], 编制了用于分析一维非线性光子晶体传输特性的计算程序; 应用该程序对所设计的两种全光开关进行了数值研究.

1 全光开关的结构设计

在光子晶体周期性结构中引入杂质或缺陷层, 禁带内会出现相应的缺陷态^[4]. 本文选择光子晶体 (HL)²(D)⁴(LH)² 结构, 如图 1, 介质的高、低折射率及缺陷层折射率分别为 n_H 、 n_L 、 n_D .

选择固体光学介质氟化钠作为低折射率层, $n_L = 1.30$; 硫化锌作为高折射率层, $n_H = 2.38$; 设缺陷层折射率 $n_D = n_H = 2.38$, 基片折射率为 1. 采用四分之一波长厚度的高低折射率间隔层, 这样整个缺陷层厚度 $d = 4 \times (\lambda_0 / 4n_H) = \lambda_0 / n_H$. 设光通信低损

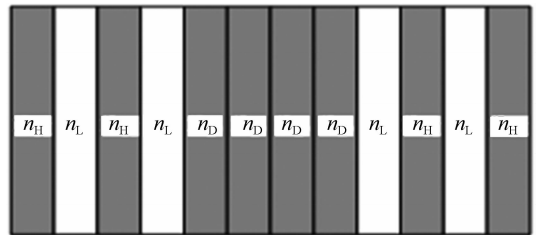


图 1 含缺陷层结构的一维光子晶体

Fig. 1 1-D photonic crystals with defect layers

耗传输窗口的工作波长 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 为光子晶体的中心入射波长. 在缺陷层掺入 Kerr 介质, 满足关系式^[3]

$$\tilde{E}_z^{n+1}(i) = \frac{\tilde{D}_z^{n+1}(i)}{\epsilon_r \epsilon_0 + \chi^{(3)} A} \quad (1)$$

式中 \tilde{E}_z 和 \tilde{D}_z 满足关系: $D_z = \epsilon_r \epsilon_0 E_z$, $\tilde{E}_z = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_z$, $\tilde{D}_z = \frac{D_z}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$; 设三阶非线性系数 $\chi^{(3)} = 0.001$; A 为光强, $\epsilon_r = n_D^2$ 为缺陷层的相对介电常量.

该结构的禁带较宽, 缺陷态较窄, 且缺陷态透射峰值接近于 1, 满足实现全光开关传输特性的基本要求.

2 全光开关的工作原理

采用频率、幅值各异的信号光和泵浦光作用于光子晶体. 由泵浦强光与非线性 Kerr 介质相互作用, 改变光子晶体禁带结构, 从而控制信号光的“开”、“关”两种状态.

$E_{\text{source}} = E_0 \cos(2\pi f_s n \Delta t) + K \cos(2\pi f_p n \Delta t)$ (2)
 E_0 为信号光幅值, f_s 为信号光频率, K 为泵浦光幅值, f_p 为泵浦光频率, $n \Delta t$ 为离散时间. 信号光频率取在禁带内缺陷态透射峰所对应的位置, 泵浦光频率选择在禁带外部透射率较大且相对稳定的位置. 没有泵浦光作用时, 如图 2 实线所示, 信号光能够透

* 吉林省科技发展计划(20050524)和长春市国际合作科技计划(2007114)资助

[†] Tel: 0431-85938666 Email: hexiaodong220@163.com

收稿日期: 2007-09-16

过光子晶体,实现全光开关的“开”状态;有泵浦强光作用时,发生 Kerr 非线性效应,改变介质折射率从而改变禁带结构,缺陷态透射峰迁移到图 2 虚线所示的位置,信号光频率落入禁带不能通过光子晶体,实现全光开关“关”状态.

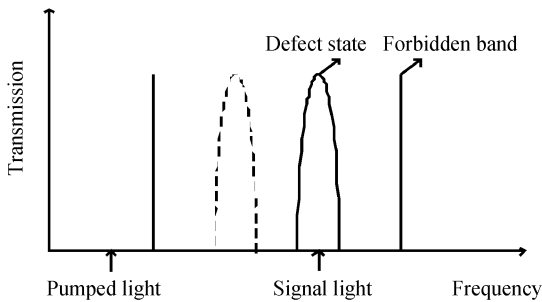
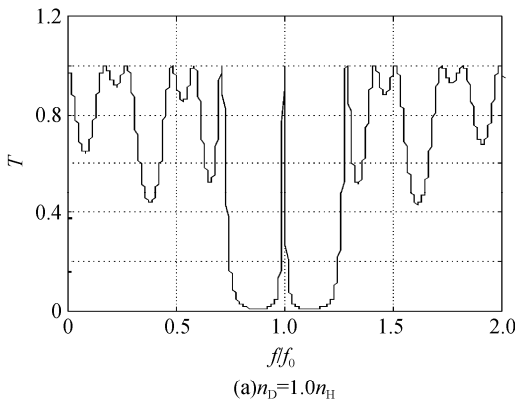


图 2 全光开关工作原理
Fig. 2 Theory of all-optical switching



3 静态模拟非线性传输特性

实现全光开关特性,利用的是 Kerr 非线性效应导致的缺陷态微小移动,泵浦光过强或太弱都不合适.在研究含有非线性介质光子晶体的动态传输特性之前,先分析不加入非线性介质时线性光子晶体的禁带特性,由静态工作点对动态进行模拟,根据禁带变化情况可以初步得到泵浦光的频率、强度范围.

假设场在空间分布均匀,强光引起缺陷层折射率的变化完全相同,电磁场差分迭代时,将缺陷层折射率设为线性折射率 n_H 的 1.0 和 1.1 倍,观察缺陷态在禁带中的位置变化.图 3 纵坐标为光子晶体透射系数 T ,横坐标为相对于光子晶体中心入射频率 f_0 ($f_0 = C/\lambda_0$) 的归一化频率.

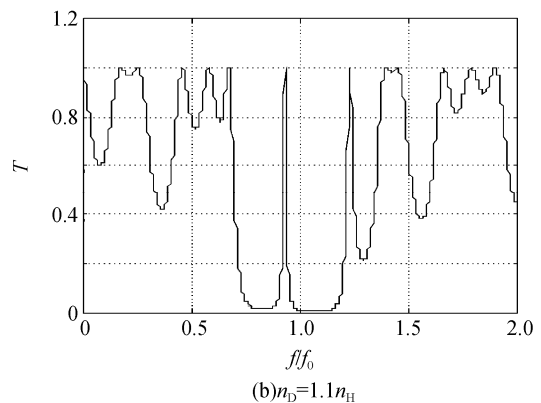
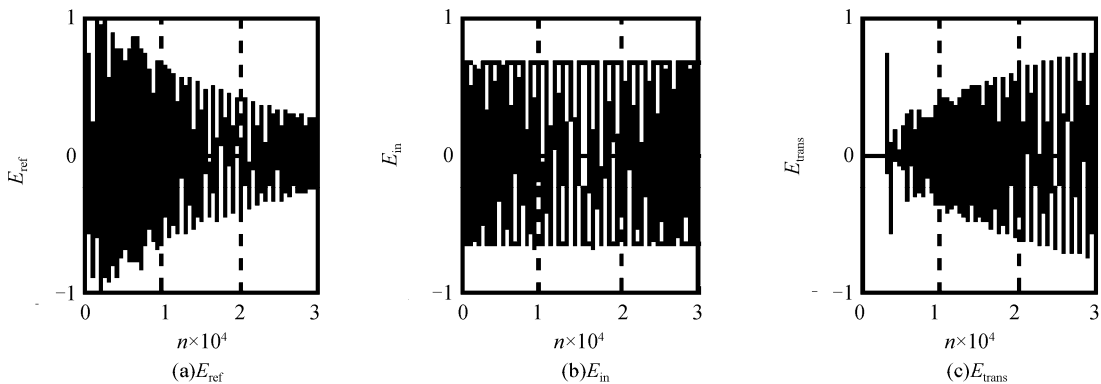


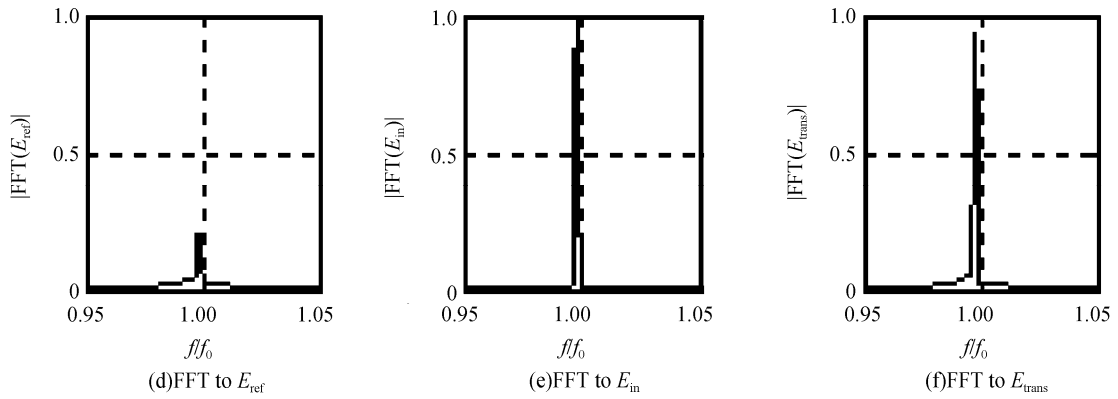
图 3 缺陷态位置的变化
Fig. 3 Shifting of the defect mode

由图 3(b) 知,频率 f_0 所对应的透射率基本为 0,这意味着将信号光频率选为 f_0 ,由泵浦强光非线性效应引起的折射率变化为原线性折射率 1.1 倍时便可实现全光开关的“关”状态,代入式子 $\epsilon_{rD} + \chi^{(3)} A = (1.1)^2 \epsilon_{rD}$,计算得 $A = 35^2$,初步设定泵浦光电场强度幅值 $K = 35$.泵浦光频率选在透过率较高且作用前后相对稳定的 $0.71f_0$.图 3(a) 为无泵浦强光作用 $K = 0$ 时的情况,折射率没有改变,频率为 f_0 的信号光全部透射,为全光开关的“开”状态.

4 全光开关的特性分析

泵浦光频率为 $0.71f_0$,幅值为 K ;信号光频率为 f_0 ,幅值为 1. $K = 0$ 时,反射波、入射波和透射波的时域波形及信号光的频域波形如图 4.由图 4(f) 可知,入射的信号光强 88.36% 透射,为全光开关“开”状态.





E_{ref} : Reflected electric field intensity; E_{in} : Incident electric field intensity; E_{trans} : Transmitted electric field intensity; FFT: Fast fourier transform

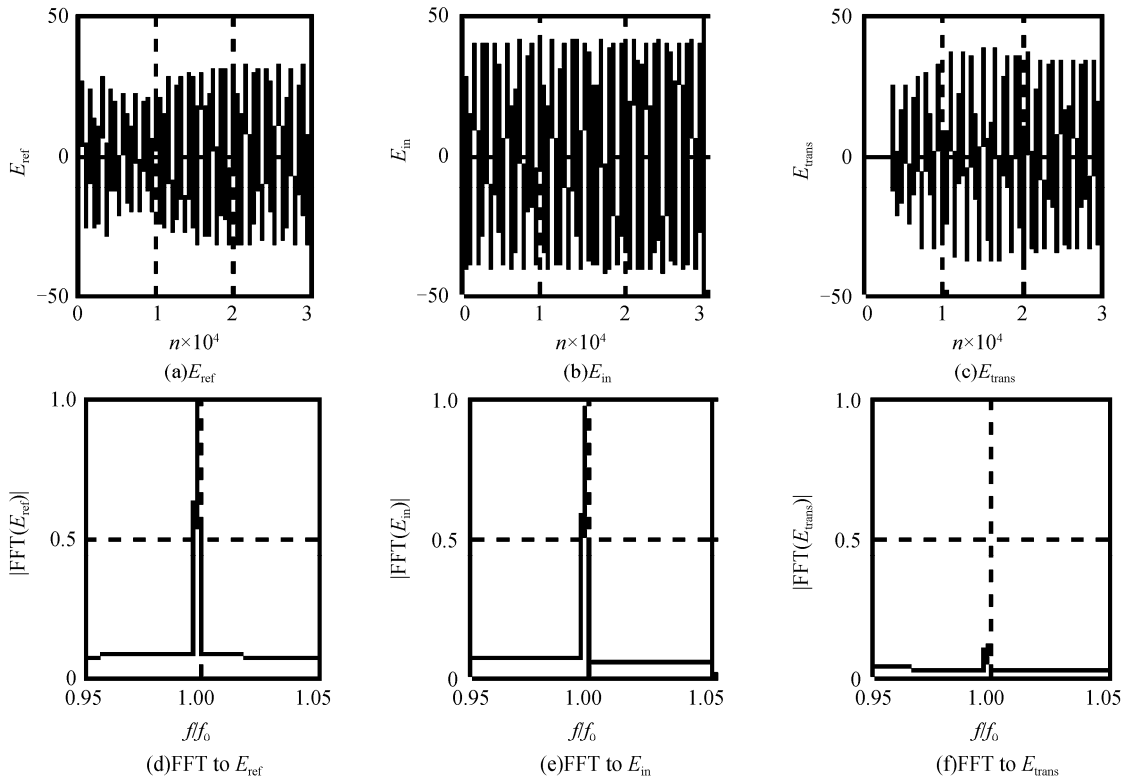
图 4 全光开关“开”状态

Fig. 4 All-optical switching ON states

静态模拟时,假设场是均匀的,非线性介质所在空间位置折射率的变化完全相同.实际过程中的场并非如此,要达到图 3(b)的“关”状态,需要将泵浦光幅值 K 在 35 附近调整试验.

透射信号光强降低,消光比提高.图 5 给出 $K=40$ 时的情况,由图 5(f)可知入射信号光强 1.51%透射,实现了全光开关的“关”状态.计算消光比 17.67 dB.

观察透射波频谱,发现随着泵浦光幅值的提高,



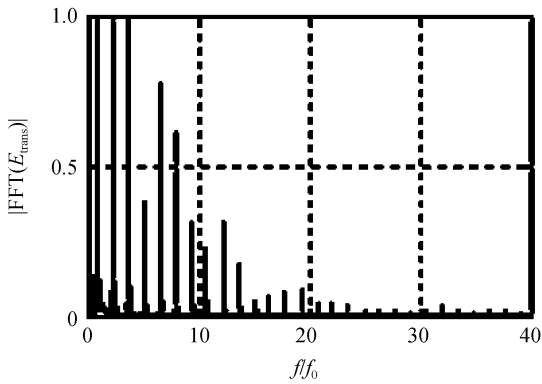
E_{ref} : Reflected electric field intensity; E_{in} : Incident electric field intensity; E_{trans} : Transmitted electric field intensity; FFT: Fast fourier transform

图 5 全光开关“关”状态

Fig. 5 All-optical switching OFF states

此外,在泵浦光较强时,发生非线性频率混合现象.反射、透射光均产生以 2 倍泵浦光频率为间隔的众多新频率,如图 6,且泵浦光越强产生的新频率越多.单信道传输信号时,产生的新频率对信号光没有

影响;应用于 WDM 系统时,为防止新频率干扰其他信道信号,造成“开”“关”状态的误判,需要有效地抑制频率混合效应.



E_{trans} : Transmitted electric field intensity;

FFT: Fast fourier transform

图6 频率混合效应

Fig. 6 Frequency mixing effects

5 光子局域效应的讨论

Kerr 非线性介质是一种折射率强度有关的介质,在普通晶体中掺杂,光只能一次性直接透过介质,而在含缺陷层的光子晶体中掺入 Kerr 介质,由于光子局域效应,光会束缚在光子晶体的缺陷中来回反射,这些局限在里面的光波叠加使得光强增强,从而增强介质的非线性. Tran 给出数据:以缺陷态透射峰对应频率的光入射光子晶体,光子晶体内部场强有最高 26 倍增益^[5].

在上述的全光开关结构中,泵浦光强($K = 40$)是根据通用的计算式计算、调整得到的,泵浦光强依然很大,光子局域效应不明显.

增加完整周期结构的层数,设计第二种光子晶体结构 $(HL)^5(D)^3(LH)^5$,各层折射率分别为 $n_H = 1.4, n_L = 1.0, n_D = 1.40$,三层缺陷的厚度依次为 $0.1758\lambda_0, 0.4\lambda_0, 0.1758\lambda_0$,其余参量与前面相同.调整 K 值进行试验, $K = 20$ 时即可实现“关”状态,信号光强 0.87% 透射, $K = 0$ 时信号光强 39.27% 透射,计算消光比 16.55 dB.可见,在较小的泵浦光时即可实现“关”状态.说明该结构中存在光子局域效应,光子局域效应使较小的泵浦光强得到放大,增强了非线性,在较低泵浦条件下实现开关状态的转换.

对比两种不同层数的光开关结构可以看出,光子局域效应与光子晶体完整周期结构的层数有关,层数太少光子局域效应不明显.

6 结论

本文基于 Kerr 非线性效应导致的缺陷态迁移原理,设计两种光子晶体全光开关结构,并对其传输特性进行了分析.基于该原理的光子晶体全光开关,缺陷态透射峰始终出现在光子晶体的中心入射频率处,只要将信号光频率设置为光子晶体中心入射频率,它便可准确地对应在缺陷态透射峰位置.意味着信号光频率的选取具有很大的自由性,全光开关结构易于设计.由于缺陷峰很窄,实际应用时,还可以起到消噪滤波的作用.此外,讨论了频率混合效应和光子局域效应对全光开关的影响.本文通过对一维非线性光子晶体全光开关的数值特性研究,为实际制作提供了理论依据.

参考文献

- [1] LIANG Hua-qiu. Giant band gaps of rectangle lattice 2D photonic crystal at high frequency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5):781-784.
梁华秋. 在高频区存在巨带隙的长方晶格二维光子晶体[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5):781-784.
- [2] YANG Yi-biao. Numerical simulation of the photonic bandgap of two-dimensional photonic crystals with kagome lattice[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5):724-728.
杨毅彪. 二维 Kagome 格子光子晶体禁带的数值模拟[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5):724-728.
- [3] TRAN P. Optical switching with a nonlinear photonic crystal: a numerical study[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(15):1138-1140.
- [4] LIU Dan-dong. Tunable transmittance of defect modes in one-dimensional photonic crystal with 3 defects[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2):286-289.
刘丹东. 缺陷态透射率可调的三缺陷层的一维光子晶体[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2):286-289.
- [5] TRAN P. Optical limiting and switching of short pulses by use of a nonlinear photonic bandgap structure with a defect [J]. *JOSA B*, 1997, **14**(10):2589-2595.

Numerical Research on One Dimension Nonlinear Photonic Crystal All-optical Switching

WU Bing-bing, HE Xiao-dong, XUE Wei, QUAN Wei, HU Gui-jun, WANG Yuan-yuan

(*Department of Optical Communication, College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)

Received date: 2007-09-16

Abstract: Nonlinear Kerr-type medium was doped in defect layers of photonic crystals. Based on the dynamical shift of defect mode caused by Kerr nonlinear effect, two schemes of optical switching and the calculating programs with method of FD-TD were designed to simulate optical switching. Photonic localization and frequency mixing effects were discussed.

Key words: Photonic crystals; All-optical switching; Nonlinearity; Frequency mixing; Photonic localization



WU Bing-bing was born in 1984. She graduated from Jilin University in 2007 and received her B. S. degree in optical communication. Now she is a M. S. degree candidate at Beijing Posts and Telecommunications University.