

## 一种全光开关及任意比能量输出光分束器的设计\*

廖清华<sup>†</sup> 张旋 夏全 于天宝 陈淑文 刘念华

(南昌大学物理系, 南昌 330031)

(2012年7月23日收到; 2012年9月3日收到修改稿)

基于光子晶体非线性 Kerr 效应设计了一种结构简单的任意比能量输出光分束器, 通过控制抽运光的强度来控制端口能量输出比. 该结构还可以实现控制光传输的动态开关作用, 并且具有插入损耗低、无串扰、信号光的开/关两个状态下的透射率相差非常大的特点, 因此该光开关具有很高的开关比.

**关键词:** 全光开关, 光分束器, 非线性 Kerr 效应, 光子晶体

**PACS:** 42.70.Qs, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.62.044220

## 1 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过程有效的“开”、“关”控制作用, 在光通信、光计算和快速光信息处理等领域都具有非常广阔的应用前景. 自 1994 年 Scalora 等<sup>[1]</sup>提出光子晶体全光开关的思路以来, 光子晶体全光开关的研究受到了极大关注. 光子晶体作为一种新型材料有着许多优良的品质, 其中非线性介质和光子晶体相结合可以产生非常明显的非线性现象, 就是很好地利用了光子晶体光子局域的特性.

实现光子晶体开关的方法主要有: 通过光子带隙迁移<sup>[1]</sup>、缺陷模式迁移<sup>[2]</sup>、非线性频率转换<sup>[3]</sup>、利用光子态密度<sup>[4]</sup>、双稳态<sup>[5,6]</sup>、通过波导和微腔的耦合<sup>[7-9]</sup>等, 在二维光子晶体中引入点缺陷, 通过改变点缺陷的折射率等结构参数来控制探测光通过光子晶体的状态<sup>[10]</sup>, 利用光子带隙光子来实现全光开关<sup>[11]</sup>等. 这些设计有的开关效率太低, 有的结构过于复杂导致在制作工艺上难以实现; 特别是这些设计在结构确定以后, 其能量的输出比一般不能再发生变化.

由于 Kerr 效应是瞬态的非线性效应, 因此用来

构建光子晶体光开关具有极高的响应速度或极短的响应时间. 本文利用时域有限差分法 (FDTD)<sup>[12]</sup>模拟了用 Kerr 非线性光学材料来构建全光开关及光分束器, 模拟计算的结果表明其插入损耗仅为 0.1 dB 左右, 无串扰, 体积小, 并且阈值低于 Rahmati 等<sup>[13]</sup>设计的非线性定向耦合全光开关的阈值. 同时, 该结构同样可以通过控制加载在耦合区抽运光的强度来改变非线性材料的折射率, 从而控制输出端口的能量比. 结果表明, 该结构可实现输出能量比动态自由调节, 真正意义上实现了任意比能量输出. 分束器的总透射率可达到一个很高的值, 为器件的实用化和多功能化提供了保证.

## 2 结构原理及相关参数

图 1 中, 介质柱按正方晶格周期性排列在空气背景中, 构成完整的光子晶体结构. 整个结构的参数选取如下: 介质柱材料为 GaAs, 其折射率  $n = 3.4$ , 介电柱半径  $r = 0.18a$  ( $a$  为晶格常数), 中间耦合区的一排介电柱 (矩形框内部分) 为 AlGaAs 介电柱. 这是因为制作此类全光开关, 要求材料的非线性折射率大, 线性吸收和非线性吸收系数小, 响应速度快, 物理化学稳定性好. AlGaAs 介电柱半径为  $r_c = 0.08 \mu\text{m}$ , 其介电常数为  $\epsilon = 11.56$ , 非线性折

\* 集成光电子国家重点实验室 (半导体研究所) 开放课题、江西省自然科学基金 (批准号: 2008GZW0006) 和江西省教育厅科学研究课题 (批准号: 2007-59, GJJ08066) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: lqhua@ncu.edu.cn

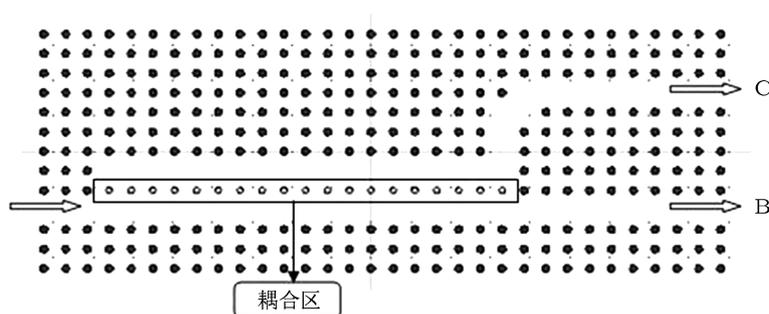


图1 开关结构图,其中矩形框内的介质柱为耦合区介质柱

射率  $n_2 = 1.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ , 耦合区长度  $L = 20a$ . 该光子晶体结构具有二维的 TM 模 (电场方向平行于介电柱的轴向方向) 禁带, 禁带范围为  $0.302 \leq a/\lambda \leq 0.443$  ( $\lambda$  为真空中的波长), 而类似的光子带隙对于 TE 模 (磁场方向平行于介电柱的轴向方向) 则不存在. 选取工作频率为归一化频率  $a/\lambda = 0.355$  的高斯型光波为入射光源 (若取晶格常数为  $a = 0.55 \mu\text{m}$ , 则该归一化频率对应波长为  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , 正好是光通信中常用的波长). 光子晶体线缺陷波导对处于禁带范围内的 TM 波有高效的导光性, 故以 TM 模作为研究对象. 通过在完整的二维正方格光子晶体中移去几排介电柱, 形成线缺陷波导. 同时为了减少传输模式在转弯处的衰减与损耗, 有意在拐角处采用优化后的  $90^\circ$  弯曲波导结构<sup>[14-16]</sup>, 见图 1.

若光波在两耦合波导中独立传播时具有相同的传播常数  $\beta$ , 将两个耦合的波导 (波导 1 和波导 2, 图 1 中耦合区上面的波导为波导 2, 耦合区下面的波导为波导 1) 看成一个波导系统, 支持两个本征导模, 一个是对称模 (或偶模), 其传播常数记为  $\beta_e$ , 另一个为反对称模 (或奇模), 其传播常数记为  $\beta_o$ , 一般情况下  $\beta_e \neq \beta_o$ . 定义拍长  $L_B = 2\pi/|\beta_o - \beta_e|$ , 耦合系数为  $\kappa = |\beta_o - \beta_e|/2$ . 从波导 1 进入的光波, 当耦合长度为  $L_B/2$  的奇数倍时, 将从波导 2 的端口 C 输出, 形成交叉态 (cross state), 耦合长度为  $L_B$  的整数倍时, 光波将从原输入波导的端口 B 出射, 形成直通态 (bar state). 因此, 输入信号的功率在两耦合波导中可以不断进行着交替传输, 即只要两波导之间的距离以及波导长度允许, 就可以实现能量在两条波导之间连续的交流. 利用平面波展开法计算了上述条件下的色散关系, 如图 2 所示, 由此可以计算起始状态下的耦合长度为  $4.7a$ .

在光子晶体材料中对于非线性光学的响应, 可以用介质极化强度与电场的函数关系来表示.

当入射光频率远离介质共振频率区域且入射光较弱时, 极化强度与光场的关系可以表示为 (为简单起见, 我们事先假定  $E, P$  及各阶极化率  $\chi^{(i)}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) 均为标量):  $P = \epsilon_0[\chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots + \chi^{(n)}E^n + \dots]$ , 其中  $\chi^{(1)}$  是一阶极化率或线性极化率, 它是个二阶张量;  $\chi^{(2)}$  是二阶极化率, 是三阶张量;  $\chi^{(3)}$  是三阶极化率, 是四阶张量等等; 由于材料的三阶以上的非线性系数非常小, 所以一般只考虑三阶非线性效应. 对于光子晶体所具有的周期对称性, 可以不考虑二阶非线性效应. 由于 Kerr 效应是瞬态的非线性效应, 具有极高的响应速度, 因此用来构建光子晶体光开关的响应时间也会极短.

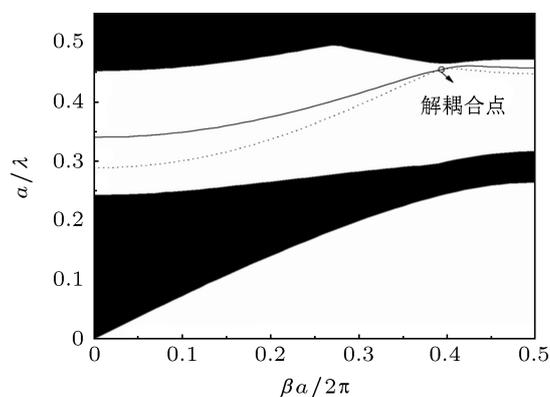


图2 两波导光子晶体耦合结构的色散关系

在用 FDTD 迭代过程中遇到非线性 Kerr 介质时,  $D$  和  $E$  已不满足线性正比关系, 其关系可表示为  $D^{n+1} = \epsilon_0 E^{n+1} + \epsilon_0 \chi^{(3)} |E^{n+1}|^2 E^{n+1}$ , 其中  $\epsilon_0$  为介电常数,  $\chi^{(3)}$  为三阶非线性系数. 迭代过程中求出  $D^{n+1}$  后, 可以通过上式求出  $E^{n+1}$ , 最简单的方法就是将上式中的  $|E^{n+1}|^2$  用上一个时间步的值替代, 即  $E^{n+1} = \frac{D^{n+1}}{\epsilon_0(1 + \epsilon_0 \chi^{(3)} |E^n|^2)}$ , 该式作为一个补充方程带入 FDTD 的计算中, 就可以求解含有非线性

性介质的光子晶体所具有的效应. 这与利用 Tran 模型<sup>[17]</sup> 处理 Kerr 介质问题的结果一致.

由于光束与介质的三阶非线性作用, 介质的折射率发生与光强成正比的变化, 从而使折射率在横截面上也存在如下的分布:  $n_c = n_o + n_2 I(r)$ , 其中  $n_o$  是介质没有光作用时的折射率,  $n_2$  是前面所说非线性折射率, 其值为  $n_2 = 1.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ . 根据以上分析, 可以使结构实现全光开关的功能, 图 3 为该结构全光开关的工作示意图.

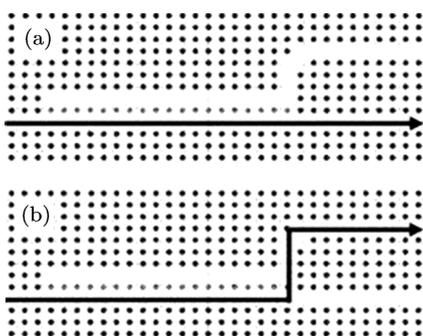


图 3 全光开关工作示意图 (a) 耦合区无抽运光作用 ( $n_c = 3.400$ ); (b) 耦合区有抽运光作用 ( $n_c = 3.470$ )

众所周知, 图 1 所示结构的关键部分为耦合区内具有非线性光学效应的介质柱折射率的变化. 图 4 所示的是耦合区介质柱折射率  $n_c$  的变化与各端口透射率的关系.

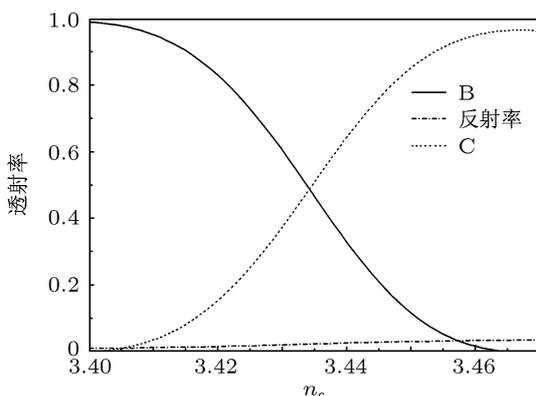


图 4 耦合区介质柱折射率的变化与各端口输出的关系 ( $r_c = 0.08 \mu\text{m}$ )

由图 4 知, 当耦合区介质柱折射率变化  $\Delta n_c = 0.07$  时便可以实现开关状态的切换, 且所需光功率较小, 低于 Rahmati 等<sup>[13]</sup> 所设计的  $1.55 \text{ W}$ , 优于一般光开关的功耗, 而在实现分束器功能时, 其功耗更低.

### 3 模拟计算及讨论

利用 FDTD 方法模拟光开关在两种不同状态下的开关状态, 如图 5(a) 和 (b) 所示. 同时我们模拟计算了入射光均分及其他情况, 如图 5(c) 和 (d). 由图 3 中的关系知, 通过耦合区介质柱折射率的变化, 端口 B 与端口 C 两端口输出比可实现任意比能量输出, 表 1 中给出了几种类型的输出比.

表 1 几种典型的输出能量比

	端口 B	端口 C
$n_c = 3.400$	98.8%	0
$n_c = 3.430$	60.0%	38.5%
$n_c = 3.434$	48.9%	48.9%
$n_c = 3.438$	38.5%	59.0%
$n_c = 3.470$	0	96.5%

显然, 随着抽运光强度的变化, 端口 B 的输出能量由 98.8% 连续变为 0, 同时端口 C 由 0 连续变化到 96.5%, 由于损耗极小, 因此基本能实现两端口任意比能量输出. 综上所述, 利用光子晶体的光子禁带特性, 通过在二维光子晶体中设置线缺陷波导, 将两条波导平行地排列在一起, 可以实现定向波导耦合器. 它通过波导间的耦合作用, 可以将一个波导中被激励的基模耦合到另一个波导中, 实现光能量在两个波导间的来回传递, 从而实现光开关的功能. 在耦合区不加抽运光时信号光完全由端口 B 输出, 当加上抽运光并达到阈值时, 信号光完全由端口 C 输出, 进而达到控制光路的作用. 进一步的计算表明, 如果改变耦合区有效耦合长度或利用具有较大三阶非线性系数的材料所制备的光子晶体 (例如: Ce:BaTiO<sub>3</sub>, 氧化碲系统玻璃, 硫系玻璃等), 可进一步提高开关效率及降低抽运光的强度.

### 4 结论

本文利用 FDTD 模拟计算并设计了一种二维光子晶体波导全光开关及光分束器. 计算表明, 波长为  $1550 \text{ nm}$  的信号光在抽运光作用下能够实现严格的开关行为, 证明了该设计的可行性. 通过调整抽运光的强度, 致使材料折射率发生相应的改变, 使得输出端口能量比例也随之改变, 并进一步实现光分束器的任意输出比能量的动态控制. 该器件体积小, 具有较低的插入损耗和串扰, 这无疑将在未来全光通信、光子计算机和复杂光信号处理中发挥重要的作用.

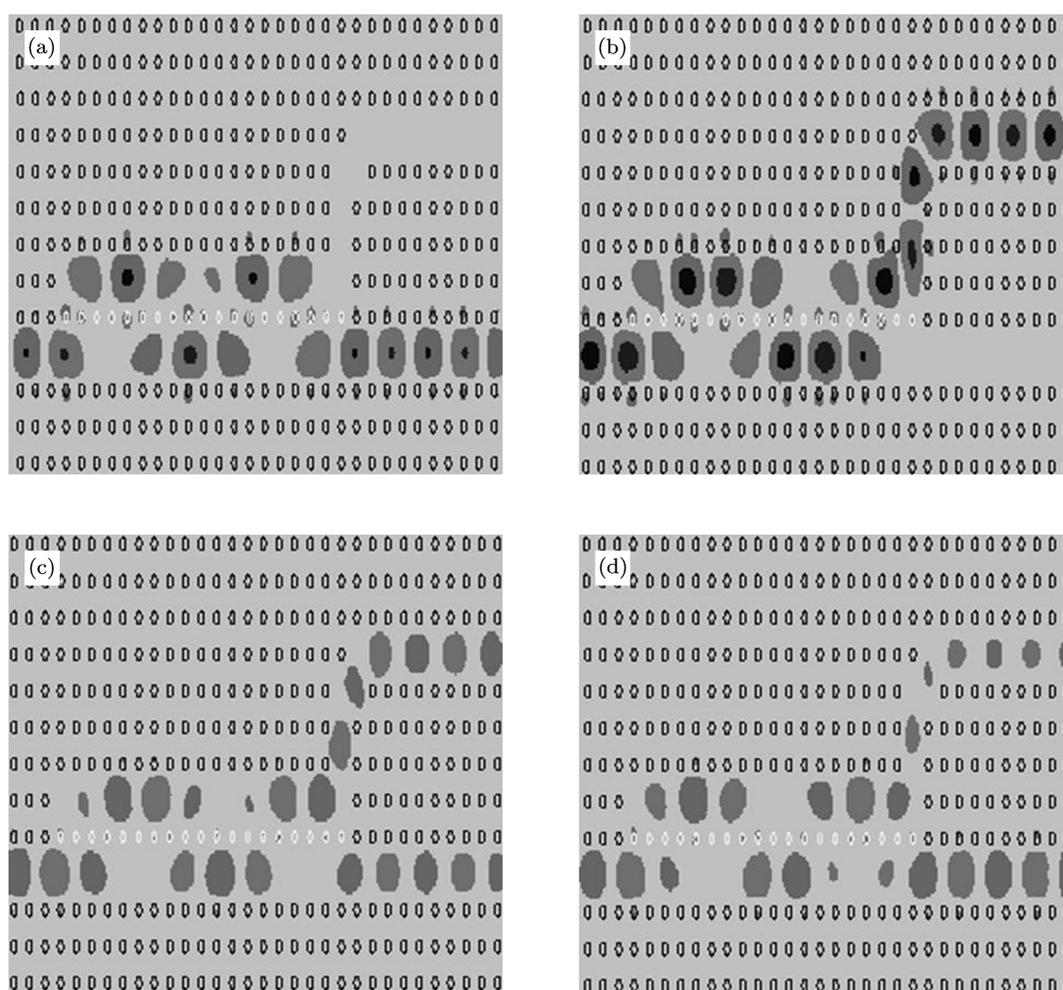


图5 (a)  $n_c = 3.400$ , 信号光仅由 B 输出; (b)  $n_c = 3.470$ , 信号光仅由 C 输出; (c)  $n_c = 3.434$ , 输出能量在 B 与 C 端口实现均分; (d)  $n_c = 3.442$ , B 端输出能量比为 70%, C 端输出能量比为 27.5%

- [1] Scalora M, Dowling J P, Bowden C M, Bloemer M J 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 1368
- [2] Tran P 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 2589
- [3] Tran P 1996 *Opt. Lett.* **21** 1138
- [4] Johnson P M, Koenderink A F, Vos W L 2002 *Phys. Rev. B* **66** 081102(R)
- [5] Chen L X, Kim D 2003 *Opt. Commun.* **218** 19
- [6] Chen L X, Deng X X, Ding W Q, Zhang Y, Liu S T 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 798
- [7] Yanik M F, Fan S, Soijacic M 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2739
- [8] Villeneuve P R, Abrams D S, Fan S, Joannopoulos J D 1996 *Opt. Lett.* **21** 2017
- [9] Locatelli A, Modotto D, Paloschi D, Angelis C D 2004 *Opt. Commun.* **237** 97
- [10] Wang X, Kempa K, Ren Z F, Kimball B 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1817
- [11] Pereira S, Chak P, Sipe J E 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2191
- [12] Taflove A, Hagness S C 2000 *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* (2nd Ed.) (Norwood: Artech House)
- [13] Rahmati A T, Granpayeh N 2010 *Optik: Int. J. Light Electron Opt.* **121** 1631
- [14] Guo H, Liao Q H, Yu T B, Chen S W, Huang Y Z 2011 *Moden Phys. Lett. B* **25** 1963
- [15] Zhang X, Chen S W, Liao Q H, Yu T B, Liu N H, Huang Y Z 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 084201
- [16] Zhang X, Liao Q H, Yu T B, Liu N H, Huang Y Z 2012 *Opt. Commun.* **285** 274
- [17] Tran P 1995 *Phys. Rev. B* **52** 10673

# A design for all-optical switch and arbitrary proportion of energy output beam splitter\*

Liao Qing-Hua<sup>†</sup> Zhang Xuan Xia Quan Yu Tian-Bao  
Chen Shu-Wen Liu Nian-Hua

(*Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

(Received 23 July 2012; revised manuscript received 3 September 2012)

## Abstract

According to the nonlinear Kerr effect of photonic crystal, we design a simple structure with arbitrary proportion of energy output, which can be controlled by the pump intensity. At the same time, the structure can also realize the dynamic control of optical switch function, and has low insertion loss, crosstalk, two states of the signal light on/off. Therefore the light switch is of high efficiency.

**Keywords:** all-optical switch, beam splitter, the nonlinear Kerr effect, photonic crystals

**PACS:** 42.70.Qs, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.62.044220

---

\* Project supported by the Open Project of the State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics from Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant No. 2008GZW0006), and the Research Project from Department of Education of Jiangxi Province, China (Grant Nos. 2007-59, GJJ08066).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lqhua@ncu.edu.cn