

文章编号: 0253-2239(2005)09-1157-4

硅基二维光子晶体耦合器理论研究*

林旭彬¹ 刘玉奎² 李宝军¹

(¹ 中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275
² 中国电子科技集团公司第二十四研究所模拟集成电路国家重点实验室, 重庆 400060)

摘要: 光子晶体是一种具有光子带隙的新型人工材料, 利用其具有控制和限制光子运动的特性可以制成新颖的光学器件。利用硅基二维光子晶体, 提出了一种 4 端口耦合器。采用时域有限差分法作为研究工具, TM 模作为研究对象, 从理论上分析了这种器件的特性。在不同的耦合长度下研究光在输出端的功率透射率, 结果表明选择适当的耦合长度可以使光在器件中呈现不同的状态。进一步研究表明, 通过改变器件内部介质柱的半径, 可以改变光在输出端的输出功率。从而证实了这种器件不仅具有波长选择性, 而且具有潜在的可调节性, 这些特性使得这种器件在全光开关的应用上具有潜在的优势。

关键词: 导波与光纤光学; 光子晶体; 耦合器; 时域有限差分法; 透射率

中图分类号: O488 文献标识码: A

Theoretical Study of Silicon-Based Two-Dimensional Photonic Crystal Coupler

Lin Xubin¹ Liu Yukui² Li Baojun¹

(¹ State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275
² National Key Laboratory of Analog Integrated Circuits, The 24th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060)

Abstract: Photonic crystal is a new artificial material. Its unique optical properties enable it to be used in fabricating novel optical devices. In this work, a 4-port coupler is proposed theoretically in silicon based on two-dimensional silicon photonic crystals. The optical properties of the 4-port coupler device have been demonstrated for TM polarization by finite-difference time-domain method. Transmittivity in each output port of the device is given as a function of coupling length. Results show that propagation direction of the input light beam can be controlled by changing coupling length of the device. Further studies indicate that the output optical power in each output port of the device can be tuned by reducing the radii of the silicon rods in the photonic crystals. The properties make the device find its potential applications in all-optical switching systems with wavelength-selective and tunable properties.

Key words: guided wave and fiber optics; photonic crystal; coupler; finite-difference time-domain; transmission

1 引 言

光子晶体是当前光电子学中最热门、发展最快的领域之一, 它是一种介电常量随空间呈周期性变化的人工材料^[1,2], 由于其具有控制和限制光子运动的能力而备受瞩目。光子晶体的一个重要特征就是具有

光子带隙, 当光子的能量落在带隙时, 光子的传播是禁止的。如果在光子晶体中引入缺陷的话, 那么在带隙中就会存在缺陷态, 这使得光子可以在缺陷中传播, 于是就可以通过控制缺陷的存在, 从而控制和限制光的传播方向。完全光子带隙只在三维光子晶体

* 国家自然科学基金重大研究计划(90401008)、教育部科学技术研究重点项目(104144)、高等学校博士学科点专项科研基金(20040558009)、广东省科技计划重大专项(2003A106020)和广州市科技计划项目——纳米专项(2004Z3-D2051)资助课题。

作者简介: 林旭彬(1981~), 男, 广东人, 在读硕士研究生, 主要从事二维光子晶体波导器件的研究。

E-mail: linxubin_zsu@126.com

收稿日期: 2004-11-24; 收到修改稿日期: 2005-01-06

中才存在,但是由于三维光子晶体制备比较困难,所以人们把更多的目光投向制备简单的二维光子晶体。目前,世界上越来越多的研究人员研发了各种基于二维光子晶体的光电元件,例如波导^[3~6]、功率分离器^[7,8]、光微腔滤波器^[9,10]、光纤^[11]等。

当光子晶体中有两个或两个以上线缺陷波导时,在一定条件下,这些光子晶体波导之间会发生耦合,并且光子晶体波导耦合遵循普通介质波导耦合的一般规律,也有定向耦合的功能^[12]。如果在两个光子晶体波导之间移去一个矩形区域,这个矩形区域类似于一个谐振腔,波导之间同样可以产生耦合。Danglot 等^[13]于 1999 年提出并制备了一种基于二维金属光子晶体的 4 端口谐振光耦合器,发现其具有波长选择性,并预测这种结构具有可调性。但是金属介质对于入射电磁波在红外和可见光波段存在很强的色散和吸收,其应用受到一定的限制。二维硅基光子晶体不仅可以克服这种缺点,而且由于硅在微电子中的广泛应用,所以研究基于硅基光子晶体的器件更有利于光电子集成和在光纤通信等系统中的应用。为此,本文提出了一种基于二维硅基光子晶体的 4 端口谐振耦合器结构,并采用时域有限差分方法(FDTD)^[14,15]作为研究工具,对这种结构进行研究,发现这种结构不仅具有波长选择的特性,而且在输出端的透射率具有可调节性。

2 器件结构

图 1 为这种 4 端口器件的结构示意图。它有四个端口,分别为 P1、P2、P3、P4。本文假定 P1 是输入端,P2、P3、P4 都是输出端。它由两个单模波导(P1-P3, P2-P4)和一块干涉耦合区组成,两个单模波导相互平行,而干涉耦合区连通了两个单模波导。单模波导是通过移除一排介质柱形成的,两个单模波导之间的距离为 W , W 是晶格常量 a 的整数倍。由于我们希望器件的尺寸越小越好以便于光电子集成,所以 W 应尽可能的小。但是如果 W 太小的话,光在两个单模波导之间的传输就会产生相互耦合^[16],所以在我们的结构中选择 $W=5a$,使得光不会在两个单模波导之间产生相互耦合。干涉耦合区是通过去掉一个宽为 W 、长为 L 的矩形区域里的介质柱而形成的。在不同耦合长度 L 下,光在输出端有不同的功率分布光谱。

图 1 中对应的完整二维方型光子晶体的参量如下:背景材料为空气,晶格常量为 a ,介质柱的半径和折射率分别为 r 和 n 。本文取其半径 $r=0.19a$,

折射率 $n=3.4$ (与硅的折射率对应)。由于二维光子晶体的对称性,入射的电磁波可以分解成两个偏振模:TM 模和 TE 模。TM 模的电场方向平行介质柱方向,而 TE 模的磁场方向平行介质柱方向。由于这两种模是相互线性独立的,所以可以分别研究这两种模在光子晶体中传播的特性。用时域有限差分方法分别计算该光子晶体对于 TM 模和 TE 模的光子带隙可以得到,对于 TM 模,该光子晶体存在着光子带隙,其范围为 $0.291c/a \sim 0.431c/a$,其中 c 为光在真空中传播的速度,而类似的光子带隙对于 TE 模则不存在。所以下面的工作都是以 TM 模作为研究对象。

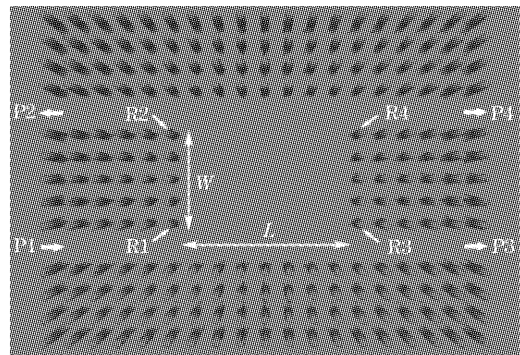


图 1 4 端口光子晶体器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed photonic crystal device with 4 waveguide ports

3 计算结果与分析

下面我们研究在不同耦合长度 L 下不同频率的光在输出端的功率透射率。将输入光从输入端 P1 沿着箭头的方向入射,通过改变干涉耦合区的耦合长度,得到归一化频率分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 的光在输出端 P2、P3、P4 的透射率,其中 $f_1=0.4c/a$ 、 $f_2=0.361c/a$ 、 $f_3=0.326c/a$ 。图 2 分别为不同频率的光随不同耦合长度 L 变化时在端口 P2、P3、P4 上功率透射率的变化情况,实线连接的正方形数据点、点线连接的圆形数据点和虚线连接的三角形数据点分别对应频率为 f_3 、 f_2 、 f_1 的光的透射率。从图 2 可以看出,透射率不仅与 L 有关,而且在相同的 L 下,透射率也与输入光的频率有关。也就是说,在 L 一定的情况下,该器件具有波长选择性,从而可以通过控制不同的耦合长度 L 来实现某一频率在输出端的特定输出。从图 2 还可以看出,当 $L=7a$ 时,频率为 f_2 的光大部分从 P4 端输出,其透射率为 95.36%;当 $L=8a$ 时,频率为 f_1 的光大部分从 P2 端输出,透射率为 99.0%;当 $L=14a$ 时,频率为 f_3

的光大部分从 P3 端输出,透射率为 98.94%。

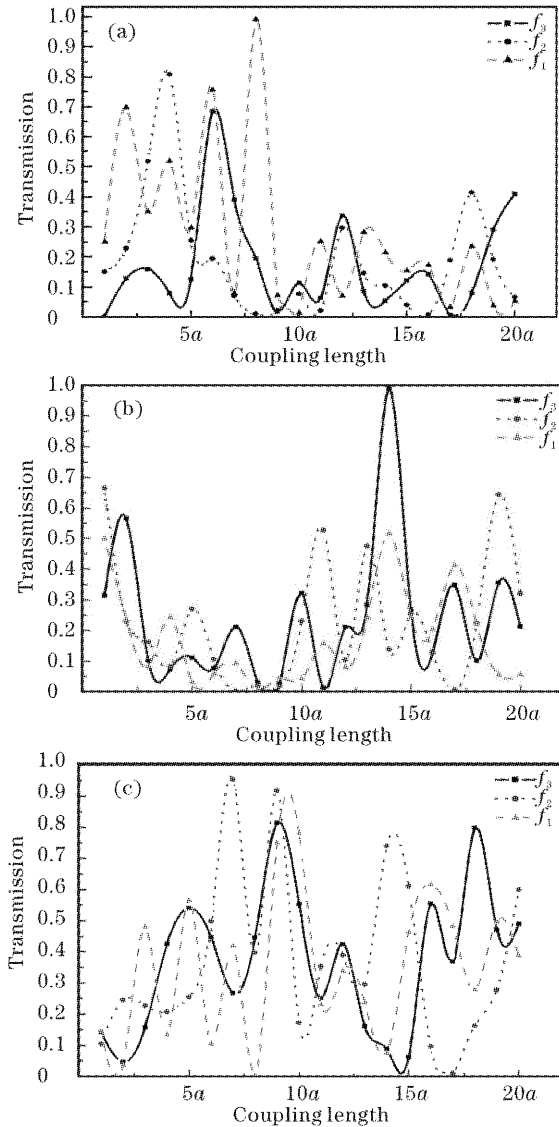


图 2 光分别在输出端口 P2(a)、P3(b)、P4(c)上功率透射率随耦合长度变化的曲线

Fig. 2 Power transmissions at the ports P2 (a), P3 (b), P4 (c) for different coupling length

这种结构不仅具有波长选择性,而且还具有可调节性。从上面可以知道,当 $L=7a$ 时,频率 $f=0.361c/a$ 的光大部分都传输到输出端 P4 上,而其他两个输出端的光能量输出几乎为零。图 3 所示为用时域有限差分方法模拟中心频率 $f=0.361c/a$ 的光从输入端 P1 输入之后能量在该器件中传输的过程。更进一步研究发现,通过同时改变图 1 中四个介质柱 R1、R2、R3 和 R4 的特性还可使频率 $f=0.361c/a$ 的光大部分从输出端 P3 输出。

在光子晶体中,我们知道介质柱的特性包括半径、折射率、吸收率等,下面通过改变介质柱的半径来

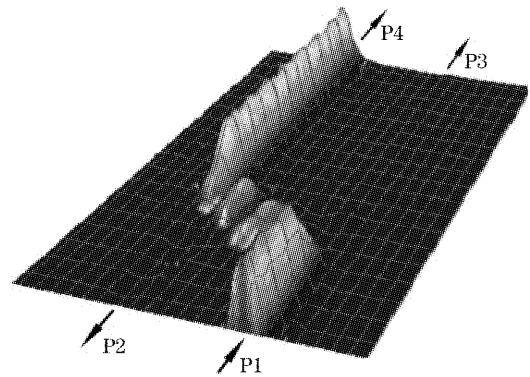


图 3 在耦合长度 $L=7a$ 时,中心频率 $f=0.361c/a$ 的光在器件中坡印亭矢量分布图

Fig. 3 Poynting vector pattern of the structure for a coupling length of $7a$ at the frequency of $0.361c/a$

研究这种结构的可调节性。假设在图 1 所示的干涉耦合区的四个角落分别对应着四个介质柱,它们的半径分别为 R_1, R_2, R_3, R_4 。则当四个介质柱的半径 $r_1=r_2=r_3=r_4=r$ 时,用时域有限差分方法计算在不同 r 的情况下中心频率 $f=0.361c/a$ 的光在端口 P2、P3、P4 的输出透射率如图 4 所示。不同半径 r 下,光在 P2、P3、P4 的输出透射率分别对应着三角形、正方形和圆形的数据点。从图中可以看到,当 $r \geq 0.08a$ 的时候,同时改变四个介质柱的半径大小对于 P2 输出端的影响不大,P2 输出端的透射率几乎为零。而输出端 P3、P4 的光输出透射率则随着四个介质柱半径的减小有着相反的变化,光在 P4 端的输出透射率逐渐减少而在 P3 端逐渐增加。所以在这个区域 ($0.19a > r \geq 0.08a$),可以通过改变这四个介质柱的半径来得到光在 P3、P4 端口上输出功率的不同比例,而 P2 端不受任何影响。从图中还可以看到,当 $r=0.08a$ 时,光在 P3 的输出达到最大值 91.7%,而在其

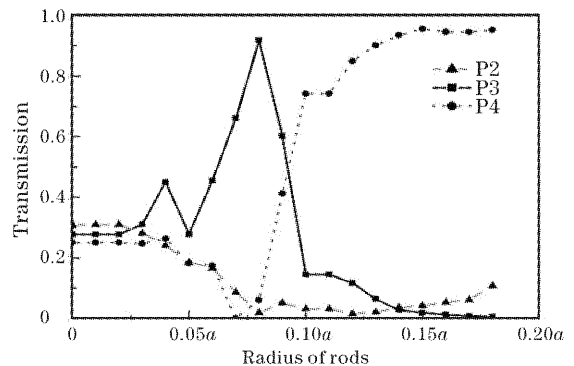


图 4 不同介质柱半径 r 时中心频率 $f=0.361c/a$ 的光在输出端的透射率

Fig. 4 Transmission at the output ports for different value of r at the frequency of $0.361c/a$

他两个输出端 P2、P4 的光透射率分别为 1% 和 6%。用时域有限差分方法模拟 $r_1=r_2=r_3=r_4=0.08a$ 时中心频率 $f=0.361c/a$ 的光从 P1 输入之后在器件中能量的传输过程,如图 5 所示。从图 5 可以看到,大部分的光从 P3 端输出,而只有小部分的光从其他输出端输出。

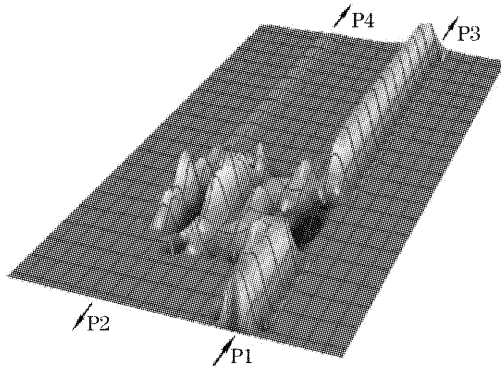


图 5 当 $R=0.08a$ 时,中心频率 $f=0.361c/a$ 的光在器件中坡印亭矢量分布图

Fig. 5 Poynting vector pattern of the structure at the frequency of $0.361c/a$ with $R=0.08a$

为了解释上述结果,我们利用如下简单模型:即将该器件等效于由两个相互独立的平行波导和它们之间引入的一个矩形谐振腔构成。假设两个相互独立的平行波导分别为波导 1(图 1 中 P1 到 P3)和波导 2(图 1 中 P2 到 P4),谐振腔的引入使得这两个相互独立的平行波导之间通过谐振腔而发生耦合。当耦合长度适当时,可以使得光从波导 1 完全耦合到波导 2 去,从端口 P4 输出,呈交叉态。如果在系统中引入微扰,谐振腔的作用将发生变化,从而可以改变各端口的输出能量。当然,通过改变四个角落介质柱的特性可以保持原有谐振系统的对称性。若同时减小介质柱的半径且半径变化不大,即在不破坏原有谐振系统的情况下在系统中引入微扰,可改变波导与谐振腔的耦合效率。所以当同时减小介质柱的半径时,耦合效率减小,耦合到波导 2 的光减少,剩余的光直接从端口 P3 输出,从而出现端口 P4 的输出减小,端口 P3 的输出增加,而端口 P2 的输出几乎没有影响。若半径继续减小,波导与谐振腔之间的耦合效率继续减小。当半径减小到一定程度时,谐振系统破坏较严重,以至于不能通过改变四个角落介质柱的特性来保持原有谐振系统的对称性,从而致使波导与谐振腔之间不能产生耦合,所以能量直接从端口 P2 输出,呈直通态。当介质半径再继续减小到一定程度时,谐振系统严重破坏,上述模型将不成立,故三个输出端口均有能量输出(见图 4)。

4 总 结

研究了一种基于二维硅基光子晶体的 4 端口器件,这种器件具有波长选择性,通过设计不同的耦合长度可以获得在输出端的特定能量输出。通过改变介质柱的半径还证实了这种器件具有功率输出可调性,甚至可以将输出端 P4 的能量几乎全部转移到输出端 P3 上输出,具有全光开关的潜在优势。

参 考 文 献

- 1 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Attila Mekis, J. C. Chen, I. Kurland *et al.*. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(18): 3787~3790
- 4 Mehmet Bayindir, B. Temelkuran, E. Ozbay. Propagation of photons by hopping: A waveguiding mechanism through localized coupled-cavities in three-dimensional photonic crystals[J]. *Phys. Rev. (B)*, 2000, **61**(18): R11855~R11858
- 5 Marko Loncar, Dusan Nedeljkovic, Theodor Doll *et al.*. Waveguiding in planar photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(13): 1937~1939
- 6 Song Junfeng, Chang Yuchun, Wang Haisong *et al.*. Transmission characteristic of photonic crystal waveguide[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 711~713 (in Chinese)
- 7 宋俊峰, 常玉春, 王海嵩等. 光子晶体光波导传输特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 711~713
- 8 Jun Yonekura, Mitsutaka Ikeda, Toshihiko Baba. Analysis of finite 2D photonic crystals of columns and lightwave devices using the scattering matrix method[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(8): 1500~1508
- 9 Mehmet Bayindir, B. Temelkuran, E. Ozbay. Photonic crystal based beam splitters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(24): 3902~3904
- 10 Shanhui Fan, Pierre R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos. Channel drop tunneling through localized states[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **80**(5): 960~963
- 11 Hitomichi Takano, Yoshihiro Akahane, Takashi Asano *et al.*. In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(13): 2226~2228
- 12 Song Junfeng, Wang Haisong, Zhang Jian. Study of dispersion in photonic crystal fiber using mode symmetry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 800~803 (in Chinese)
- 13 宋俊峰, 王海嵩, 张健等. 利用模式的对称性研究光子晶体光纤的色散[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 800~803
- 14 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Photonic crystal waveguide directional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1237~1240 (in Chinese)
- 15 朱志宏, 叶卫民, 袁晓东等. 光子晶体波导定向耦合器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1237~1240
- 16 J. Danglot, O. Vanbesien, D. Lippens. A 4-port resonant switch patterned in a photonic crystal[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, 1999, **9**(7): 274~276
- 17 Kane S. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1966, **14**(3): 302~307
- 18 A. J. Ward, J. B. Pendry. Calculating photonic Green's functions using a nonorthogonal finite-difference time-domain method[J]. *Phys. Rev. (B)*, 1998, **58**(11): 7252~7259
- 19 Masanori Koshiba. Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(21): 1970~1975