

文章编号:1004-4213(2010)07-1194-4

基于全内反射光子晶体多模波导偏振无关型光分束器*

李未¹,徐旭明²,陆伟锋¹

(1 南昌工程学院 理学系,南昌 330099)

(2 南昌大学 物理系,南昌 330031)

摘要:研究了全内反射在光子晶体多模波导中的作用,利用常规的耦合模理论对对称入射时的多模干涉行为和自映射现象进行了讨论和分析.研究表明,输入光场依然能沿着多模导光区高效的传输,这种结构中的光场传输是由全内反射和布喇格反射的联合作用而决定的.设计了一种全内反射偏振无关型光分束器,这种分束器在集成光学中具有重大的潜在应用价值.

关键词:光子晶体波导;全内反射;自成像效应;分束器

中图分类号:O436.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103907.1194

0 引言

光子晶体波导是实现新型光子集成回路的关键性部件之一,通过在完整的光子晶体中引入线缺陷而形成,光波沿着线缺陷进行传播.目前,大量文献中报道的光子晶体波导的导光机理利用的是光子带隙^[1-2];然而,理论和实验结果均表明,当传导区的有效折射率(Efficient Index, EI)高于环境折射率时,由于满足常规的全内反射(Total Internal Reflection, TIR)条件,即使没有光子带隙的存在,这类光波导也可以象常规的介电波导一样,将传输光场紧紧地限制在线缺陷波导中高效地进行传输^[3-5].

在导光区的光子晶体单模波导区中,导光区的折射率高于两侧的折射率时,理论研究表明,在光子带隙的频率范围之外的光波依然能够高效地沿着单缺陷层传输,这主要是由全内反射和布喇格反射(Bragg Reflection, BR)的联合效应决定的.多模干涉耦合器由于具有结构紧凑、插入损耗低、频带较宽、制作工艺简单和容差性好等优越特性一直得到人们的广泛关注和研究^[6-7].因此许多新颖的光学器件被提出,如光子晶体光开关^[8]、波分复用/解复用器^[9-10]、光功率分束器^[11-12]等等.但是在传输方向上,偏振光利用全内反射来引导光场的传播,那么就无需完全的禁带,这样在器件的设计中,就可以获得更好的自由度和更宽的工作频率范围.

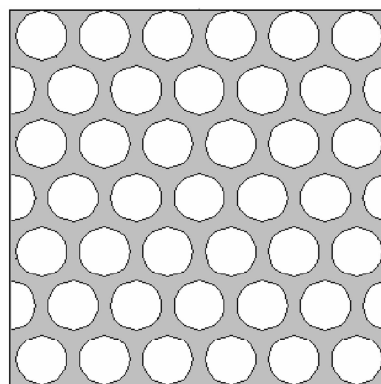
本文研究了全内反射在光子晶体多模波导中的

作用,利用常规的耦合模理论对对称入射时的多模干涉行为和自映像现象进行了讨论和分析.讨论了这种结构中的主要导光机制,提出了偏振无关型光分束器,并采用时域有限差分法模拟光场在这种结构中的传输.

1 光子晶体多模波导结构与分析

本文讨论的晶格模型是在具有一定厚度的平板中形成三角排列的空气孔,平板材料为半导体(硅 Si 或砷化镓 GaAs),空气孔半径为 $R=0.4a$, a 是光子晶体的晶格常量,如图 1(a).采用平面波展开法计算等效结构的光子能带结构,环境折射率为等效折射率 $n_{\text{eff}}=2.95$. TE 和 TM 模式在第一布里渊区(Brillouin Zones)的能带结构如图 1(b).从图中看到, TM 模式没有光子带隙,而 TE 模式在归一化频率 $a/\lambda=0.32\sim 0.48$ 之间存在光子带隙.

在这种完整光子晶体晶格中去掉多排空气孔形成介质通道型的多模波导,如图 2.对于 TE 导模,存在于光子带隙内的光波由于带隙的存在将沿着多模波导发生多模干涉性的传输.但是,对于 TM 模



(a)

* 江西省自然科学基金(2007GZW2547)资助

Tel:0791-8126923

Email:liweiding@163.com

收稿日期:2009-12-24

修回日期:2010-03-02

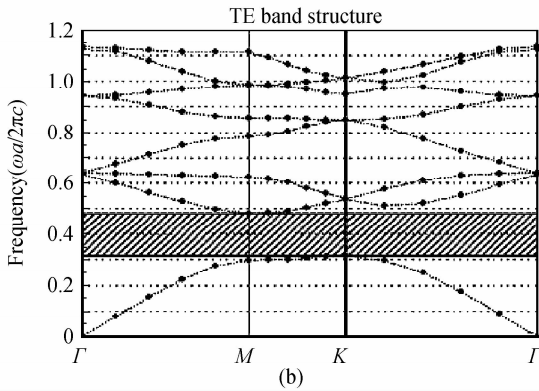


图1 (a)光子晶体平板结构的横截面示意图;(b)TE模能带结构,阴影部分为该偏振模式的光子带隙

Fig. 1 (a) The slab structure of the photonic crystal; (b) The band structure of TE, the shaded part is the band gap of TE

式,由于没有光子带隙,因此输入光场将无法利用呢能带进行导光.那是不是说明这些对应于光子晶体辐射模的传输光场将在传输方向很短的距离上就会被严重地被衰减掉呢?但事实并非如此,下面我们讨论 TM 场在此种多模波导中的传输特性.

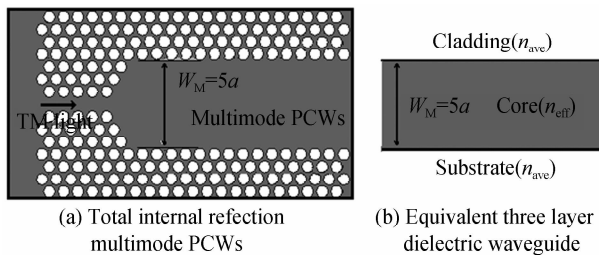


图2 全内反射型光子晶体多模波导结构和等效结构示意图
Fig. 2 Structure of total internal reflection multimode PCWs and equivalent three layer dielectric waveguide

在图2所示的光子晶体多模波导结构中,通过分析可以发现,位于中心的介质型多模通道(即图中多模波导区)的等效折射率比位于其两侧的光子晶体阵列的等效折射率高,因为两侧的光子晶体阵列是由空气孔在介质中排列而成的,其介电常量可以等效为平均介电常量

$$\epsilon_{ave} = \epsilon_{eff} - \pi(r/a)^2(\epsilon_{eff} - 1) \quad (1)$$

明显可以发现两侧的折射率比中心导光区的低,从而满足全内反射原理.在等效的三层平板多模波导中,芯区为多模波导的导光区,也就是移除的多排空气孔区,其折射率为平板的有效折射率 n_{eff} ,其层厚为 W_M ,记为移除的空气孔的排数与晶格常量的乘积;两侧的完整光子晶体阵列分别等效为平板波导的覆层和衬底区,折射率均为 $\epsilon_{ave} = \epsilon_{eff}$,可以看到,等效后的结构模型是一个对称型的三层平板结构.

根据常规介电多模波导中的自映像原理,在离多模区入口 LN 处将成输入场的 N 重像^[13]

$$L_N = 3pL_\pi/4N \quad (2)$$

式中 L_π 为两最低阶导模(零阶模和一阶模)的拍长,即 $L_\pi = \pi/(\beta_0 - \beta_1)$, β_0 和 β_1 分别是零阶导模和第 i 阶导模的传播常量, p 为大于 1 的整数.取光子晶体的晶格常量 $a = 0.682 \mu\text{m}$,通过简单的计算得到,覆层和衬底的平均介电常量 $\epsilon_{ave} = 4.83$.

2 数值模拟与分析

采用时域有限差分法,取入射波长为通信波段窗口的 $1.55 \mu\text{m}$,激发的模式为 TM 偏振模.光子晶体的晶格常量 $a = 0.682 \mu\text{m}$,因此相应的工作归一化频率 $a/\lambda = 0.44$.当光子晶体多模波导由去除五排空气孔而形成时,波导宽度相应为 $W_M = 5a$,即 $3.41 \mu\text{m}$.通过计算,在等效的三层平板波导中, $1.55 \mu\text{m}$ 波长的光波有九个导模.因为输入光场是对称地进入多模波导,满足对称性多模干涉原理,仅有偶导模得到激发,多个偶导模相互耦合,发生多模干涉行为.输入场进入波导后将周期性地出现其单重和多重像.

图3给出了入射波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时电场幅度的稳态模拟分布,从图3可以看出第一个单重像的位置于 $26a$ 处,二重像位于单重像的一半位置,即 $13a$ 处,符合常规的自映像原理.

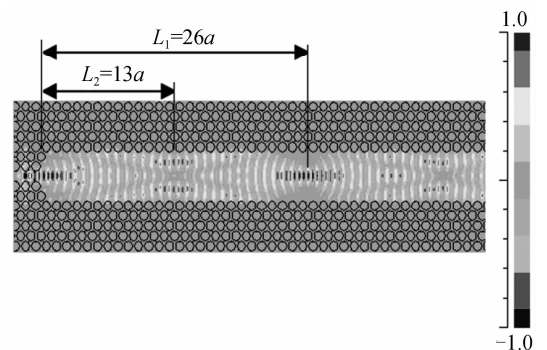


图3 利用全内反射原理导光的光子晶体多模波导中的自映像现象分布图

Fig. 3 Distribution of self-imaging effect for TE modes in multimode PCWs using TIR effect

在光子晶体波导的入射端输入一光脉冲,在位于 $26a$ ($1.55 \mu\text{m}$ 波长的光波第一个单重像所在的位置)处探测输出光功率,得到该结构中的透射响应谱,如图4.从图4可以看出,在几个较宽的频率谱内出现了高的透射,而实际上在这些频率范围内的频率却没有光子带隙存在.也就是这多个频率依然可以被紧紧束缚在波导之中,依据全内反射沿着波导传输.但是,同时可以发现,在高透射的响应谱中存在输出效率的上下波动,其来源于位于导光区两侧的光子晶体阵列带来的布喇格反射.因此,在这种波导系统中不仅仅存在全内反射,还有布喇格反射,两者的联合效应将决定着光场在该结构中的传输.

从图 4 还可以看出响应谱的透射率在很宽的范围内高达 99% 左右. 同时响应谱中的透射波动来源于布喇格反射, 下降峰来源于完整光子晶体中的辐射模式的被激发.

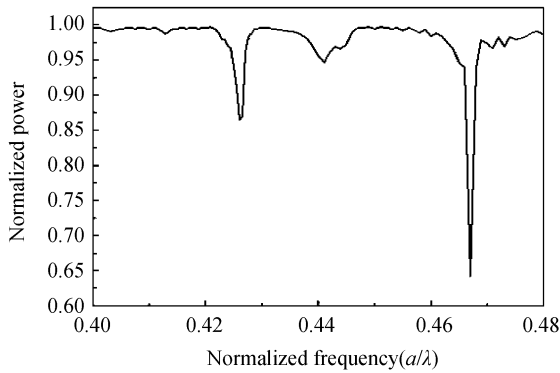


图 4 长度为 $26a$ 的光子晶体多模波导中的透射响应谱
Fig. 4 Transmission response spectra of the multimode PCWs at $L=26a$

在图 4 的响应谱中还出现了多个下降峰. 可见传输光场在这些频率工作时, 虽然依然存在全内反射, 但是传输场却不能得到有效地限制, 沿着覆层和衬底衰减掉了. 这种情况的发生可以解释如下: 由于输入光场可能会激发位于导光区两侧完整光子晶体阵列的某些模式, 而因为没有光子带隙, 光子晶体中所有的模式均为辐射模, 所以这些被激发的模场沿着多模波导传输时将被衰减. 从而导致了那些传输光场在这些频率时透射效率大大降低. 因此, 布喇格反射对于在这种依赖全内反射进行导光的光子晶体多模波导中传输的光场的响应频谱将具有重要的影响.

3 偏振无关型分束器

从图 1 的能带结构图及图 3 的单重像的位置关系图可以看到, 依靠全内反射导光的 TM 模式所对应的频率和利用光子带隙导光的 TE 模式是可以重叠的 (如图 3). 因此在这些重叠的频率范围内, 对于所有的偏振模式均可以满足自映像效应, 而实际上此时并不需要绝对的光子带隙.

取光子带隙内的 TE 模为入射光, 其它结构参量和图 3 完全一致, 工作波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 图 5 给出了此时的磁场强度的稳态分布图. 可以看到, 输入光场在位于多模波导入口约 $25a$ 处出现了第一个单重像, 而第一个二重像的位置大约位于 $13a$ 处. 而对比图 3 可以发现, TM 模场的第一个二重像也出现在该处, 几乎和 TE 模式的二重像重叠出现. 因此, 很明显, 这种结构可以用来设计偏振无关型的光分束器.

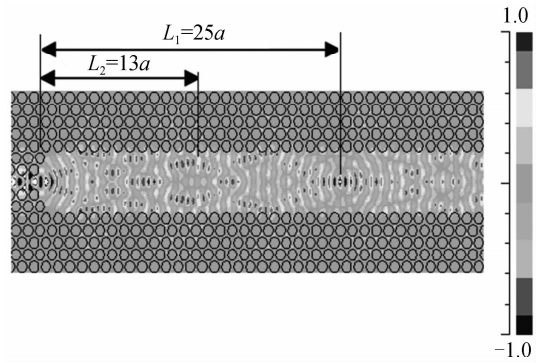


图 5 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, 利用光子带隙导光的 TE 模式的稳态磁场强度分布图
Fig. 5 Distribution of steady-state magnetic field patterns for TE modes at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ in multimode PCWs using PBG effect

图 6 是设计的一种利用全内反射导光的偏振无关型分束器结构示意图, 由一个单模输入光子晶体波导、耦合区和两个单模输出波导组成, 耦合区长度为 $L = 13a$. 取入射波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 用时域有限差分法分析了该分束器. 从图 7(a) 的坡印亭矢量分布图可以看出, 两个输出端口的透射光强是完全相等的, 并且从图 7(b) 还可以看出每个输出端口的透射率可高达 48.5%.

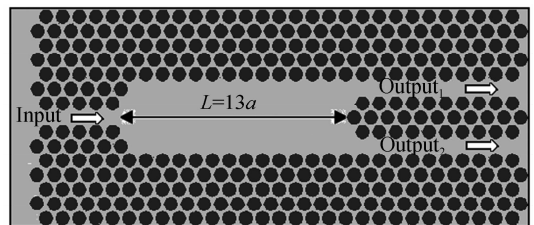


图 6 全内反射导光的偏振无关型分束器结构
Fig. 6 Schematic diagram of total internal reflection polarization insensitive power splitter

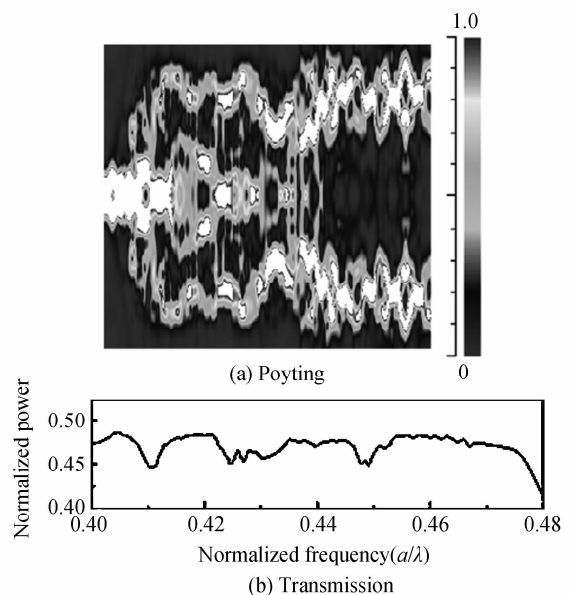


图 7 坡印亭矢量和输出端口的透射率随归一化频率变化分布图
Fig. 7 Schematic diagram of poyting vector and the transmission efficiency of output port with the frequency change

4 结论

本文探讨了光子晶体多模波导中的另一种导光机制-全内反射.当导光区的有效折射率大于位于其两侧的光子晶体阵列的有效折射率时,即使没有光子带隙的存在,输入光场依然能沿着多模导光区高效地传输.模拟结果表明,这种等效结构有效地描述了该结构中的光场传输行为,类似于普通介质多模波导中的自映像效应依然成立.

进一步的研究表明,这种结构中的光场传输是由全内反射和布喇格反射的联合作用而决定的,并且基于这种光子晶体波导结构设计了一种全内反射偏振无关型光分束器,这种分束器的两个输出端口输出的透射光强是完全相等的,并且每个输出端口的透射率可高达 48.5%.这种基于全内反射偏振无关型分束器在集成光学中具有重大的应用价值.

参考文献

- [1] YU T B, JIANG X Q, YANG J Y, *et al.* Self-imaging effect of TM mode in photonic crystal multimode waveguides only exhibiting band gaps for TE modes[J]. *Phys Lett*, 2007, **369**(1/2): 167-171.
- [2] KHOO E H, LIU A Q, WU J H. Nonuniform photonic crystal taper for high-efficiency mode coupling [J]. *Opt Express*, 2005, **13**(20): 7748-7759.
- [3] LIU T, ZAKHANAN A R, FALLAHI M, *et al.* Design of a compact photonic-crystal-based polarizing beam splitter[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(7): 1435-1437.
- [4] YU T B, WANG M H, JIANG X Q, *et al.* Ultracompact and wideband power splitter based on triple photonic crystal waveguides directional coupler[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2007, **41**(9): 37-42.
- [5] ZHU Zhi-hong, YE Wei-min, JI Jia-rong, *et al.* Cascaded taper for mode coupling between photonic crystal waveguide

- and classical waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1516-1519.
- 朱志宏,叶卫民,季家蓉,等.用级联缓变结构实现光子晶体波导和传统波导的耦合[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1516-1519.
- [6] HAN Xiu-you, PANG Fu-feu, CAI Hai-wen, *et al.* Performance analysis of planar curved waveguide coupler[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1629-1631.
 - 韩秀友,庞拂飞,蔡海文,等.平面弯曲波导耦合器的特性分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1629-1631.
 - [7] YU Tian-bao, WANG Ming-hua, JIANG Xiao-qing, *et al.* Coupling characteristics of electromagnetic wave in parallel three photonic crystal waveguides and its applications[J]. *Acta Physics Sinica*, 2006, **55**(4): 1851-1855.
 - 于天宝,王明华,江晓清,等.三平行光子晶体单模波导的耦合特性及其应用[J]. *物理学报*, 2006, **55**(4): 1851-1855.
 - [8] CHEN C C, CHEN C Y, WANG W K, *et al.* Photonic crystal directional couplers formed by In AlGaAs nano-rods [J]. *Opt Express*, 2005, **13**(1): 38-43.
 - [9] LIU T, ZAKHARIAN A R, FALLAHI M, *et al.* Design of a compact photonic-crystal-based polarizing beam splitter[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(7): 1435-1437.
 - [10] ZHANG YAO, LI Zhang-jian, LI Bao-jun. Multimode interference effect and self-imaging principle in two-dimensional silicon photonic crystal waveguides for terahertz waves[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(7): 2679-2689.
 - [11] WANG Zhe-zhe, ZHAO Gao-yang, ZHANG Xiao-lei, *et al.* Fabrication of the Si-based waveguide core materials and the splitters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2214-2218.
 - 王哲哲,赵高扬,张晓磊,等.硅基光波导芯层材料及波导分束器的制备[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2214-2218.
 - [12] PENG Xin-ling, ZHAO Gao-yang. Fabrication of waveguide by photosensitive sol-gel method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1098-1102.
 - 彭新玲,赵高扬.感光溶胶-凝胶法制备光波导研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1098-1102.
 - [13] ZHU Zhi-hong, YE Wi-min, YUAN Xiao-dong, *et al.* Photonic crystal waveguide directional coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1237-1240.

Polarization-insensitive Power Splitter Based on Total Internal Reflection Multi-mode Interference Photonic Crystal Waveguide

LI Wei¹, XU Xu-ming², LU Wei-feng¹

(1 Department of Science, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

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

Abstract: The role of total internal reflection in photonic crystals multimode waveguides is studied, and the multimode interference situation and self-image using conventional coupled-mode theory are discussed and analyzed. The result shows that the input light still can be propagated with high efficiency down to multimode optical area, and resemble index-guided modes owing to the combination of total internal reflection and distribution Bragg reflection. A total internal reflection multi-mode interference photonic crystal waveguide polarization-insensitive power splitter is designed which has great potential value in the integrated optics.

Key words: Photonic crystals waveguides; Total internal reflection; Self-imaging principle; Splitter



LI Wei was born in 1979. Now he is an assistant, and his research interests focus on the photonic crystal waveguides and photonic crystal fibers.