

基于耦合边界的紧凑型光子晶体定向耦合器的优化设计

柏宁丰, 孙小菡

(东南大学电子器件与系统可靠性研究中心, 江苏南京 210096)

摘要: 本文采用平面波展开法分析了双线型缺陷并列平行光子晶体波导的带隙结构、缺陷模式及耦合长度, 提出了一种具有耦合边界的光子晶体定向耦合器, 并探讨了光波在其中的传输性能. 同时基于平面波展开法及时域有限差分法, 深入分析和讨论了光波在光子晶体并列波导、光子晶体直角转弯模块中的工作模式和传输特性. 利用该光子晶体定向耦合器结合光子晶体转角器件可以将两根平行标准单模光纤传输模式组合成交叉态、直通态和功分态等状态. 仿真结果表明在交叉态和直通态时, 使用该光子晶体定向耦合器的传输峰值可以在较大频率带宽内达到 90% 以上.

关键词: 平面光波光路; 光子晶体; 定向耦合器; 耦合边界

中图分类号: TN814+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)02-0220-04

Optimum Design on Compact Photonic Crystal Waveguide Directional Coupler Based on Adiabatic Coupling

BAI Ning-feng, SUN Xiaohan

(Research Center for Electronic Device and System Reliability, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: We present an optimal design of Photonic Crystal Waveguide Directional Coupler (PCW-DC) with adiabatic coupling boundary in this paper. The Planar Wave Expand method (PWE) is employed to analyze the band gap and the properties of defect mode in parallel PCW. A 90° bend PCW is designed to couple the PCW-DC and two parallel single mode fibers which connect to PCW-DC at port one and port two, respectively. The transmission properties of the PCW-DC with adiabatic coupling boundary are analyzed with finite difference time domain (FDTD) method. It is shown that use this PCW-DC can achieve efficient transmission ratio in cross state, bar state and power division state at different coupling length. The simulation results show that the coupling ratio can be higher than 90% in a wide wavelength range when the PCW-DC is designed in bar and cross states.

Key words: planar lightwave circuits; photonic crystal; directional coupler; coupling boundary

1 引言

WDM 光通信系统是构成下一代光网络的支撑技术, 平面光波光路 (PLCs) 已成为未来全光交换可行的解决方案. 借助于微电子技术和工艺, PLC 集成化研究在近两年取得了重大进展^[1]. 紧凑型 PLC 单元芯片是实现实用化大规模 PLC 集成模块的基础. 定向耦合器 (DC) 是实现各类集成 PLCs 的关键部件之一. 利用 DC 可以构成光开关、调制器、光上下路复用器和功率分配器等^[2-4]. 传统的脊波导 DC 耦合长度很长 (0.2 到 10mm)^[5], 体积较大, 难以真正实现光子器件的集成化.

自 1987 年 Yablonovitch 提出光子晶体的概念以来^[6,7], 关

于光子晶体的理论和应用研究成为热门领域之一^[8-10]. 由于光子晶体具有在波长量级上控制光路的特性, 这已经使其成为实现紧凑型光子集成芯片的首选^[11]. 同时由于 PC 对不同偏振态有不同的带隙, 可以非常容易的设计出保持相关偏振态不变的光子晶体器件. 因此, PC 在未来紧凑型 PLCs 中有着巨大的应用前景. 由于三维光子晶体的制造工艺尚未取得突破性的进展, 而平面 PC 的制造工艺相对成熟, 因此目前主要将采用平面光子晶体构成各类光子器件.

光子晶体定向耦合器 (PCW-DC) 是利用两段并列光子晶体波导实现耦合功能的器件, koshiba 等人首次发表了 PCW-DC 结构^[12], 随后关于 PCW-DC 的研究日益逐渐成为热点^[13]. PCW-DC 的长度可以控制在 10 到 100mm^[14], 相比传统 DC 的

长度大大缩小,是构成各类光子晶体器件的关键元件.探究光波在 PCW-DC 中的传输,研究其基本光学特性,是研制高性能光子晶体器件的首要任务.同时,高效实现 PCW-DC 与传统光波导器件连接则是困扰此类器件的主要问题之一.

本文提出了一种基于耦合边界的紧凑型光子晶体定向耦合器.基于平面波展开法(PWE)^[15]研究了并列 PCW 的带隙结构和光波的工作模式,分析了缺陷模特性,确定了并列 PCW 的耦合长度;使用 FDTD 法^[16]模拟、仿真了光波在该定向耦合器中传输和工作模式的演变过程,讨论了缓变边界实现脊波导到光子晶体波导高效耦合的技术^[17];给出了光子晶体 90 度转角传输单元结构,从而保证定向耦合器具有低损耗特性和保偏特性.最后,给出了优化设计结果.

2 双线型平行并列 PCW 中缺陷模分析

本文研究基于介质材料制作的光子晶体波导结构.选择材料相对介电常数为 $\epsilon_r = 11.4$, (例如 GaAs). 格点处为介质材料,其余部分为空气.本文仅考虑二维情况,这样的光子晶体对 TM (电场 E 垂直于光子晶体二维平面) 入射波具有完全带隙,而 TE 带隙非常小且不与 TM 带隙重合.这就意味着,采用这种光子晶体构成的光子晶体波导只能传输 TM 波,而 TE 波将无法传输.

光子晶体波导通常是沿某一方向改变理想光子晶体的格点直径. $W1 \times PCW$ 代表了沿 ΓX 方向改变一排光子晶体格点直径.本文中设计的光子晶体波导都是沿 ΓX 方向改变格点直径.选择如下参数构成光子晶体波导,折射率为 $n = 3.37$,空气折射率为 $n = 1.0$,光子晶体晶格常数为 a ,晶格直径为 $d = 0.6a$.频率 f 单位为 c/a , c 为真空中光速.沿 ΓX 方向改变光子晶体中间一排格点的直径,形成线缺陷,缺陷晶格直径为 $d' = 0.6a$.带隙采用归一化频率 $\omega a / 2\pi c$ 表示.理想光子晶体的带隙求解可采用 PWE 实现,对于存在线缺陷的光子晶体波导带隙可结合 supercell^[18] 技术,采用 PWE 法实现.本文利用 matlab 编程实现.图 1 给出了理想光子晶体和光子晶体波导的带隙图.从图中可以看出,理想光子晶体的 PBG 为 $0.23 \leq a/\lambda \leq 0.30$,光子晶体波导的 PBG 为 $0.27 \leq a/\lambda \leq 0.31$.因此,光子晶体波导的理想传输频率为 $0.23 \leq a/\lambda \leq 0.27$.

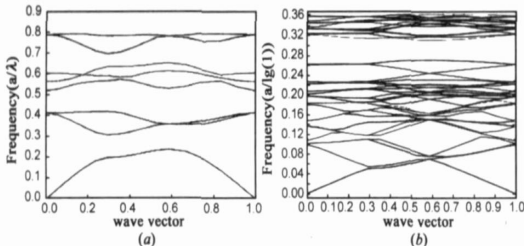


图 1 正方晶格光子晶体 TM 入射波带隙图 (a)理想光子晶体; (b) $W1 \times PCW$ 带隙

本文采用如图 2 所示结构的光子晶体波导,两平行 PCW (P-PCW) 中间间隔两列柱子.图中阴影所示部分为平面波展开法的计算区域.绝大多数的 PCW 中,在 PBG 区域内传输的缺陷模都存在几个模式.本文采用的 $W1 \times PCW$ 为单模传输,缺陷模式如图 3(a) 所示,如此构成的 P-PCW 中传输模式如图 3(b)

所示.可以看出在 P-PCW 中,传输模式分裂为偶模和奇模两种模式,图 3(b) 中实线所示为偶模,点线所示为奇模.

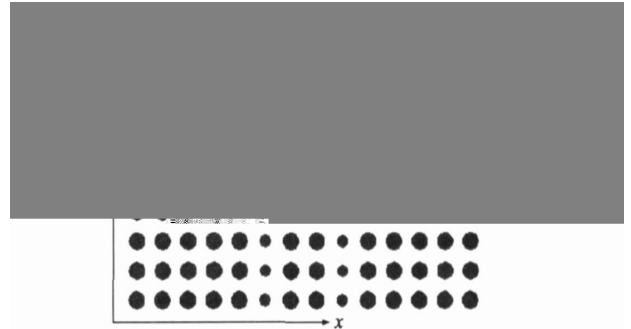


图 2 P-PCW 原理图.阴影部分为 PWE 法计算区域

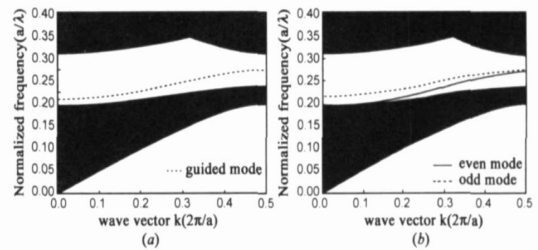


图 3 (a) 光子晶体波导中的缺陷模式如虚线所示; (b) P-PCW 中缺陷模式,虚线为奇模,实线为偶模.图中阴影部分为 PBG 以外区域

P-PCW 的拍长可由文献^[12]给出的公式 $L_B = 2\pi / |K_{even} - K_{odd}|$ 决定.一旦确定入射波长,偶模和奇模相应的传播常数 K_{even} 及 K_{odd} 就可由图 3 计算出.本文选取入射波长为 $a/\lambda = 0.25$.则可以计算出 $|K_{even} - K_{odd}| a = 0.0212 (2\pi)$.由此可以确定拍长 $L_B = a / 0.0212 \approx 48a$.选取入射波长为 $1.55 \mu m$,则可以确定光子晶体晶格周期为 $0.3875 \mu m$.如果耦合长度为半拍长的偶数倍,则可以实现直通态;如果耦合长度为半拍长的奇数倍,则可以实现交叉态;如果耦合长度为四分之一拍长的奇数倍,则可以实现 3dB 分配.

3 定向耦合器分析和设计

3.1 PCW DC 的性能定义

PCW 的性能参数一般有如下指标要求:

(1) 耦合比: 表示由输入信道 i ($i = 1$) 耦合到指定输出信道 j ($j = 2, 4$) 的功率大小,定义为输出信道功率 P_j 与输入功率 P_i 之比: $T_{ij} = P_j / P_i$.

(2) 信道插入损耗: 表示由输入信道 i 至指定信道 j 的损耗,定义为: $\gamma_{ij} = -10 \lg [P_j / P_i] = -10 \lg (T_{ij})$ (dB).

(3) 隔离比: 表示透射式耦合器中同侧端口之间的隔离程度,定义为由非指定输出信道 k 测得的功率 P_k 与输入信道 i 功率 P_i 之比,以分贝表示为: $\gamma_{ik} = -10 \lg [P_k / P_i]$ (dB).

(4) 回波损耗: 表示由输入信道返回功率的大小,定义为信道返回功率 P'_i 与输入功率 P_i 之比: $\gamma'_i = -10 \lg [P'_i / P_i]$ (dB).

3.2 具有缓变边界的 90 转弯光路单元

传统介质脊波导实现转弯功能时弯曲半径必须很大,通常是在毫米量级;而光子晶体则可以在微米量级上实现光波

转弯的功能,并且损耗极小.如图4(a)所示,本文设计了具有缓变边界的90°转弯光子晶体光路单元.图4(b)给出了仿真结果,计算表明其耦合效率在较宽频谱内($0.238 \leq a/\lambda \leq 0.254$)超过了95%.

3.3 PCW-DC 的结构和参数定义

在实际 WDM 系统中实现 PCW-DC 功能,必须解决好从光纤或者脊波导到 PCW-DC 的耦合问题.本文第二节已利用 PWE 法对如图 2 所示 P-PCW 的直通态、交叉态和功分态各状态确定了耦合长度.利用以上分析结合文献[17]提出的非线性耦合边界条件提出如图 5 所示四端口平面 PCW-DC 器件.该四端口器件宽 $125\mu\text{m}$,这样可以保证与两根标准单模光纤对接.因为光纤到脊波导可以使用成熟的 SSC 技术,所以本文不再讨论光纤到脊波导的耦合.利用线性缓变可以将较宽的脊波导宽度逐渐缩小到 $0.4a$ 后可以利用图 4 所示转弯单元将入射光耦合至 PCW-DC 中.经 PCW-DC 进行耦合后,再次通过转弯单元与脊波导输出到光纤中.从而可以实现光纤之间的直通态、交叉态以及功分态.上文已经证明在 $1.55\mu\text{m}$ 处,该 PCW-DC 中核心的 P-PCW 拍长为 $48a$,大约为 $20\mu\text{m}$.由此可见,定向耦合器的长度大为降低,十分有利于紧凑型光子器件的制作.

3.4 定向耦合器设计

利用 FDTD 程序可以验证上文讨论的三种状态耦合长度.取 P-PCW 的耦合长度分别拍长、半拍长、四分之三拍长,对应的耦合状态为直通态、交叉态和功分态.实际计算时采用耦合长度为 $48a$ 、 $25a$ 、 $35a$. FDTD 计算区域如图 5 中放大部分所示.计算是采用 PML^[19]边界条件,入射源放置在 Port1 的脊波导中.若入射源为连续波入射,则可以得到场分布图和各项指标;若入射源选取为脉冲,则可以经过 FFT 变换得到器件的传输谱. FDTD 计算参数选取如下:空间步长为 $\Delta x = \Delta z = a/32$,时间步长为 $\Delta t = 1/(c \cdot (\Delta x^{-2} + \Delta z^{-2})^{1/2})$,时间步为 50000 步,其中 Δx 、 Δz 为 x 、 z 方向的步长.图 6 给出了利用 FDTD 计算 50000 时间步后得到的 E_y 场分布图.图 7 给出了脉冲入射条件下计算得到的传输谱,脉冲中心波长为 $1.55\mu\text{m}$.

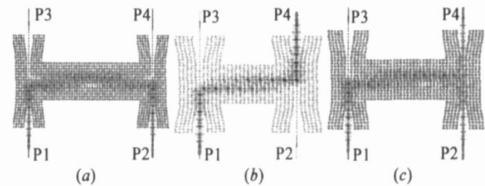


图 6 E_y 场分布图 (a)直通态; (b)交叉态; (c)功分态

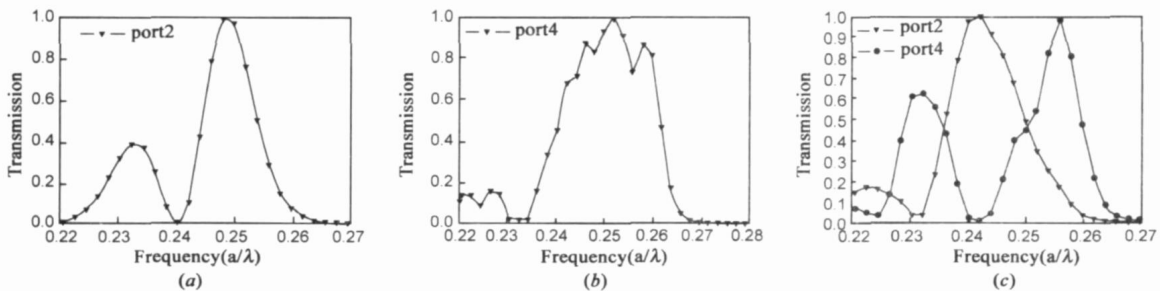


图 7 传输谱图 (a)耦合长度为 $48a$; (b)耦合长度为 $25a$; (c)耦合长度为 $35a$

由图 6 和图 7 可知该长度很好的符合了预期的耦合状态.从图中可以看出,尽管设计参数的长度是由 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 计算得出的,但仿真结果表明最佳指标略微偏离 $1.55\mu\text{m}$.这是因为拍长不是晶格周期的整数倍,因此耦合长度不能完全符合拍长要求,故出现偏差.计算结果表明在直通态时,入射频率为 $a/\lambda = 0.248$ 时可以获得最佳通过率,相应参数可计算得出: $T_{12} = 96.35\%$, $\gamma_{12} = -0.162(\text{dB})$, $\gamma_{14} = -23.098(\text{dB})$, $\gamma'_{11} = -14.067(\text{dB})$;在交叉态时,入射频率为 $a/\lambda = 0.25195$, $T_{14} = 96.13\%$, $\gamma_{14} = -0.1714(\text{dB})$, $\gamma_{12} = -21.487(\text{dB})$, $\gamma'_{11} = -13.98(\text{dB})$;在功分态时,实现 3dB 功率分配的入射波长为

$a/\lambda = 0.2502$,相应参数为: $T_{12} = 47.43\%$, $T_{14} = 47.32\%$, P_2 与 P_1 的功率比为: $T_{24} = P_2/P_4 = 1.0024$, $\gamma'_{11} = -15.607(\text{dB})$.

4 结论

本文利用 PWE 法确定了双线型并列平行光子晶体波导的缺陷模色散曲线和耦合拍长,基于 PWE 法和 FDTD 法设计了具有缓变边界的光子晶体定向耦合器.利用 FDTD 法对直角拐弯光子晶体模块和 PCW-DC 器件的直通态、交叉态与功分态进行了仿真分析和设计.结果表明采用边界缓变条件的光子晶体定向耦合器可以和脊波导充分耦合,在特定波长处

获得了很高的传输效率, 并获得了理想的 PCW-DC 器件各个状态设计参数. 利用具有缓变边界条件的光子晶体波导定向耦合器实现了相距 125 微米的脊形波导光波的直通态、交叉态与功分态, 耦合长度较传统定向耦合器大为减少. 以上结果充分表明, 本文所提出的双线性并列平行光子晶体 PWE 模型是一种便于直接分析光子晶体波导的简化模型, 所提出的紧凑型光子晶体定向耦合器优化设计模型为实现大规模 PLC 集成模块奠定了基础.

参考文献:

- [1] Molina Fernández, et al. Planar lightwave circuit six port technique for optical measurements and characterizations [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2148–2157.
- [2] A W Snyder, et al. Optical Waveguide Theory [M]. London: Chapman and Hall, 1995.
- [3] Min Qiu, et al. Optical add/drop filters using two dimensional photonic crystals [A]. Proceedings of SPIE [C]. WuHan: 2004, 5279: 286–295.
- [4] R C Alferness, et al. Characteristics of Ti diffusion LiNbO₃ optical directional couplers [J]. Applied Optics, 1979, 18(12): 4012.
- [5] 肖金标, 等. 基于 GaAs/GaAlAs 条形光波导的定向耦合器分析 [J]. 电子学报, 2002, 30(5): 705–707.
Xiao Jinbiao, et al. Analysis of the directional coupler based on the GaAs/GaAlAs optical strip waveguide [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(5): 705–707. (in Chinese)
- [6] E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronic [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059–2062.
- [7] S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486–2489.
- [8] Chi O Cho, et al. Towards nanowaveguides [J]. Current Applied Physics, 2004, 4(3): 245–249.
- [9] Steven G. Johnson, et al. Designing synthetic optical media: photonic crystals [J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5823–5835.
- [10] Tao Liu, et al. Applications of photonic crystals in optical data storage [A]. Proceedings of SPIE [C]. Bellingham: 2004, 5380: 430–438.
- [11] Thomas F, et al. Photonic crystals in the optical regime past, present and future [J]. Progress in Quantum Electronics, 1999, 23(2): 51–96.
- [12] Koshida M. Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers [J]. Journal of

Lightwave Technology, 2001, 19(12): 1970–1975.

- [13] 林旭彬, 等. 硅基二维光子晶体耦合器理论研究 [J]. 光学学报, 2005, 25(9): 1157–1160.
Lin Xubin, et al. Theoretical study of silicon based two dimensional photonic crystal coupler [J]. Acta Optical Science, 2005, 25(9): 1157–1160. (in Chinese)
- [14] Stefano, et al. Coupling and decoupling of electromagnetic waves in parallel 2D photonic crystal waveguides [J]. Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(1): 47–53.
- [15] K Sakoda. Optical Properties of Photonic Crystals [M]. Berlin: Springer Verlag, 2001.
- [16] Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1966, 14(3): 302–307.
- [17] 柏宁丰, 等. 光子晶体平面波导与脊波导高效耦合技术的研究 [J]. 物理学报, 2005, 54(10): 4933–4937.
Ningfeng Bai, et al. Efficient coupling from dielectric rib waveguide to two dimensional photonic crystal waveguide [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(10): 4833–4937. (in Chinese)
- [18] Shangping Guo, et al. Simple plane wave implementation for photonic crystal calculations [J]. Optics Express, 2003, 11(2): 167–175.
- [19] J P Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(2): 185–200.

作者简介:



柏宁丰 男, 1978 年 10 月出生于江苏, 2000 年获东南大学物理电子学学士学位, 2004 年获东南大学物理电子学硕士学位, 现正攻读工学博士学位. 目前主要从事光子晶体方面的研究.



孙小菡 女, 1955 年 6 月出生于安徽, 东南大学教授、博士生导师, 1982 年毕业于南京工学院电子工程系, 获工学硕士学位, 2002 年 2004 年任美国 MIT 电子学研究所访问教授, 长期从事光子学与光通信技术以及物理电子学领域的科研和教学工作. E-mail: xhsun@seu.edu.cn