

# 光子晶体平面波导与脊波导高效耦合技术的研究

柏宁丰 刘旭 肖金标 张明德 孙小菡<sup>†</sup>

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

(2005 年 2 月 2 日收到, 2005 年 3 月 22 日收到修改稿)

利用一维变周期谐振腔阵列和非线性缓变边界, 可以实现光波从脊波导到光子晶体平面波导(PCW)的高效耦合. 基于平面波展开法(PWE)和时域有限差分法(FDTD), 深入分析和讨论了普通脊波导、2D-PCW 结构和本征模以及工作模式、缓变边界形状等对耦合效率的影响, 从而得出光波从脊波导到 2D-PCW、再返回脊波导的统一图景. 指出考虑模式转换和采用缓变边界条件可以极大提高 PCW 与脊波导间的耦合效率. 对 PC-PW 边界采用线性和非线性缓变结构进行了仿真, 讨论了边界缓变程度对耦合效率的影响. 结果表明, 采用模式耦合和 PC-PW 余弦缓变边界时的耦合效率在较宽的带宽内超过了 95%.

关键词: 光子晶体波导, 脊波导, PWE, FDTD, 耦合边界

PACC: 7820P, 4282, 4280L

## 1. 引言

光子晶体自 1987 年被提出以来<sup>[1]</sup>, 已经取得了很大的发展<sup>[2-4]</sup>. 由于具有在波长量级上控制光路的特性, 使得实现紧凑型光子集成芯片(PICs)成为可能. 此外, 光子晶体还具有“可设计色散特性”和滤波等功能. 尽管光波的完全约束只能通过 3D-PC 结构来实现, 但到目前为止, 三维光子晶体制作工艺尚未突破<sup>[5]</sup>. 而二维光子晶体(2D-PC)制作相对容易, 可在平面内约束光波, 同时由于折射率差较高, 其中导波模的损耗极低<sup>[5]</sup>. 因此, 从中、短期实现应用的角度出发, 2D-PC 波导是目前构成 PICs 的可行方案. 但如果不能高效地将光耦合到 2D-PC 波导中, 其实际应用将受到很大的限制. 因此, 利用光子晶体实现光集成器件并使之实用化的关键技术之一是实现光子晶体平面波导与脊波导的有效耦合<sup>[5]</sup>.

至今已有多种提高光子晶体波导到脊波导耦合效率的方案. 主要有: 干涉共振耦合<sup>[6]</sup>、J 型耦合<sup>[7]</sup>、锥形耦合<sup>[8-10]</sup>等. 干涉共振耦合模型的共振模带宽很窄, 无法充分利用光子晶体波导的带宽; J 型结构要求入射和出射的脊形波导方向必须改变 90° 才能与光子晶体波导耦合; 锥形耦合是目前最经常用到

的耦合方式, 但没有考虑到模式转换问题. 文献[11]提出了利用耦合谐振腔可减少光子晶体波导与脊波导间的模式差异, 尚未深入探究模式耦合机理以及高效耦合结构.

本文深入分析和讨论了普通脊波导、2D-PCW 结构和本征模以及工作模式、缓变边界形状等对耦合效率的影响, 分析了线形边界和非线性边界缓变条件 PC-PW 与脊波导的耦合问题. 光子晶体理论分析方法已经较为成熟, 主要有: 平面波展开法<sup>[12,13]</sup>, FDTD 法<sup>[14-16]</sup>和转移矩阵法<sup>[17,18]</sup>等. 本文利用平面波展开法分析了光子晶体的带隙, 同时基于二维 FDTD<sup>[19]</sup>对具有耦合谐振腔和边界缓变的 PC-PW 与脊波导耦合开展分析, 对不同边界形状进行数值仿真, 对比了线性和非线性边界, 并对非线性边界的开口大小做了对比分析, 确定了最佳开口大小.

## 2. 耦合结构仿真和结果分析

### 2.1. 波导结构

本研究基于 GaAs 基底材料制作的光子晶体波导结构. GaAs 材料折射率为  $n = 3.37$ , 空气折射率为  $n = 1.0$ , 光子晶体晶格常数为  $a$ , 晶格直径为  $d$ ,

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: xhsun@seu.edu.cn

缺陷晶格直径为  $d'$  ,频率  $f$  单位为  $c/a$  , $c$  为真空中光速.求解带隙时采用归一化频率  $\omega a/2\pi c = f(a/c)$  ,对光子晶体带隙求解.本文利用 matlab 编程采用 PWE 法实现.

要实现最大的光子带隙,就要求在二维光子晶体中尽可能使晶格的 WS 原胞或第一布里渊区接近圆形.在尽可能多的方向上具有对称性.所以二维光子晶体研究的主要晶格结构是四方格子和六角格子.同时光子晶体还有柱子(晶格点为高折射率材料)和空气孔(晶格点为空气孔)两种结构.

采用六角晶格空气孔结构可以获得很好的 TM 波禁带;采用六角晶格和正方晶格柱子光子晶体的禁带相差不大.从便于工艺实现的角度出发,本文选定 2D 正方晶格柱子光子晶体.通过进一步讨论发

现光子晶体晶格直径  $d = 0.6a$  时,在线缺陷情况下可以保证有较宽的通带.因此,本文讨论的光子晶体晶格直径为  $d = 0.6a$ .

光子晶体波导传输的光波频率必须满足两个要求:1)在无缺陷的光子晶体带隙内,2)光波频率在线缺陷光子晶体带隙外.因此,为保证足够的传播带宽,本文选取线缺陷直径为  $d' = 0.4a$ .此时, TM 波可通过 2DPC 传输,基于此,本文以下选取 TM 波为入射波.在此条件下,二维正方晶格光子晶体带隙为  $(a/\lambda) \in (0.24, 0.30)$ ,当加入线缺陷构成光子晶体直波导时,其带隙为  $(a/\lambda) \in (0.27, 0.31)$ ,因此光子晶体直波导的通带为  $(a/\lambda) \in (0.24, 0.27)$ ,图 1 给出了光子晶体波导结构图和带隙图.

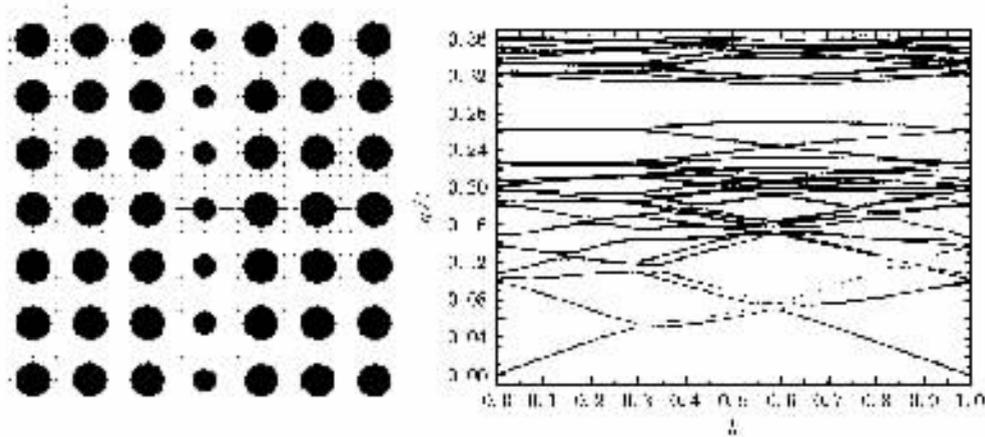


图 1 二维光子晶体正方晶格柱子结构  $d/a = 0.6$  ,中间线缺陷  $d'/a = 0.4$  , $k$  为布里渊区波矢

图 2 为本文所研究的正方晶格光子晶体平面直波导与脊形波导耦合结构.两端脊波导的宽度为  $2\mu\text{m}$  缓变后其宽度与线缺陷柱直径相同.图 2 中,圆形部分为 GaAs 柱;其余部分采用上文给定的参数.为了使光子晶体波导适用频段为光波导通信频段,选取其晶格常数为  $a = 0.39\mu\text{m}$ .

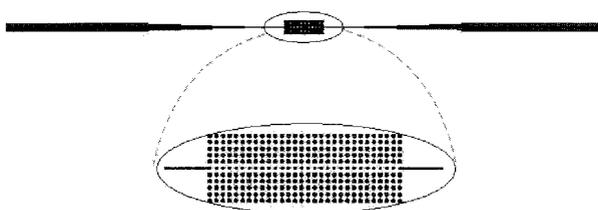


图 2 二维光子晶体波导与脊波导结构图(下方为上方光子晶体部分的放大图)

### 2.2. 模式变换

众所周知,介质脊波导利用全内反射原理(TIR)导引和传播光.二维平面波导(波导在  $y$  方向无穷)芯层的折射率高于包层的折射率时,传导模才可能在波导中传输.所以介质脊波导一定只能在折射率高的区域有效的传输光波.介质柱子型光子晶体波导(多为线缺陷型)中,传输部分发生在线缺陷处,而缺陷处介质的直径比周围介质的直径小,即传输发生在有效折射率低的部分,这就有必要考虑他们各自传输光波的机理.

全内反射原理决定了光波传输时一定是前向传输波.而光子晶体中传播的光则是前向 Bloch 波,虽然其能量方向是前向的,但是由于在光子晶体内部存在强烈的散射,使得前向 Bloch 波由前向传播的场分量和后向传播的场分量共同组成.这两种波导

中光波的场形状不同. 因此, 为了增加耦合效率, 就必须考虑到光子晶体波导与介质脊波导在传播模式和传播机理上的不同.

采用距离缓变的耦合谐振腔可以有效地在脊波导与光子晶体波导之间进行模式转换. 耦合谐振腔波导的距离依次缓变 0.1 个周期. 从最初的相距(圆柱中心处距离) 0.4 个周期变化到 1 个周期, 此时距离不再变化, 出口处距离变化相反. 每处共采用 7 个介质柱子进行缓变, 仿真结果如图 3 所示, 此时传输效果明显优于文献 [11] 采用结构. 由此可见, 采用这种结构可以很好地将脊波导传输模式转换为 Bloch 波. 图中  $T$  表示传输率.

在耦合谐振腔波导的两边加上光子晶体就可以构成介质脊波导与光子晶体波导的耦合. 但直接应用这种结构虽然解决了模式转换问题却不能提高光子晶体波导与脊波导的耦合效率. 图 4 给出了采用距离缓变的耦合谐振腔波导进行耦合的光子晶体波导与脊波导耦合的传输谱.

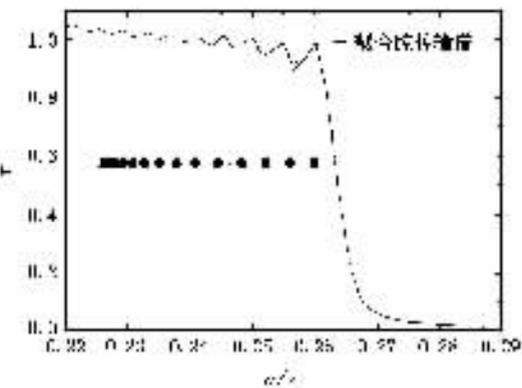


图 3 通过缓变距离耦合谐振腔波导(7 个柱子)实现耦合谐振腔波导(10 周期)与脊波导耦合的传输谱

### 2.3. 边界缓变

为了提高经过模式转换以后的光子晶体波导与脊波导的耦合效率, 可以考虑采用边界缓变的光子晶体波导, 更好地实现从高折射率传播到低折射率传播的转变. 文献 [11] 采用频域矢量本征模展开法进行数值模拟和仿真, 给出了线性边界的耦合效率. 没有讨论对耦合效率有重要影响的缓变边界形状, 本文考虑了非线性边界条件的情况, 并采用精度更高的 FDTD 法进行计算获得器件的耦合效率. 采用线性边界条件和余弦边界条件两种边界作了仿真分析. 其变化函数如表 1 所示. 参量定义如图 5 所示.

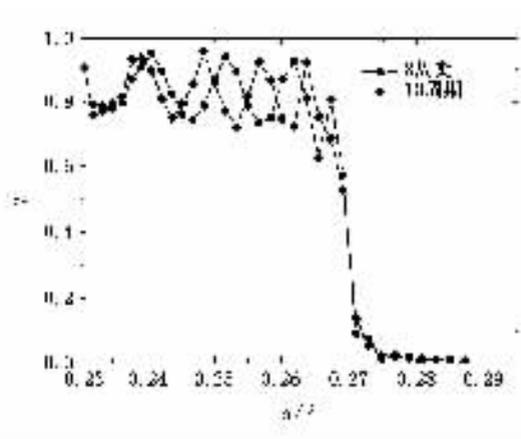


图 4 光子晶体波导与脊波导通过距离缓变的耦合谐振腔实现耦合的传输谱

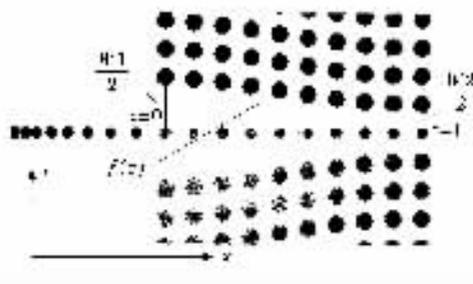


图 5 参量定义示意图

缓变边界光子晶体开口最大处距离为  $W1$ ,  $z = 0$ , 而无缓变的光子晶体间距为  $W2$ ,  $z = l$ , 边界变化的函数为  $f(z)$  及  $-f(z)$ . 从光子晶体波导到脊波导的缓变参量定义相同. 这里, 统一给定  $W1 = 4a$ ,  $W2 = 2a$ . 变化长度均为 10 个周期.

表 1 边界函数

边界条件	边界函数
线性边界	$f(z) = W1/2 + (W2 - W1)z/l$
余弦边界	$f(z) = \frac{W1 + W2}{4} + \frac{W1 - W2}{4} \cos \frac{\pi}{l} z$

表中  $f(z)$  为边界变化函数, 由此函数可以确定  $z$  处 GaAs 柱子圆心距离缺陷柱子圆心的距离.

图 6 给出了采用线性边界条件和距离缓变耦合腔波导实现耦合的光子晶体波导与脊形波导传输谱与没有线性边界条件或没有耦合谐振腔耦合的情况所作的对比. 这充分说明了只有同时采用距离缓变耦合谐振腔波导和缓变边界才能够很好地实现耦合.

图 7 给出了采用线性边界条件和余弦型边界条件进行光子晶体波导与脊形波导耦合传输谱的对比结果. 从图中可以看出采用余弦型边界条件其传输

率较线性边界条件有所提高.这是因为余弦型边界条件比线性边界条件更加满足缓变的要求.

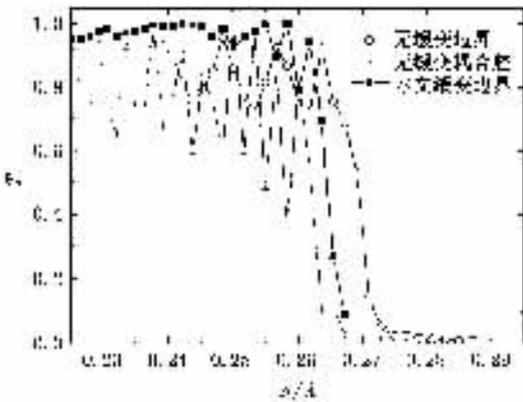


图 6 几种缓变方式传输谱对比

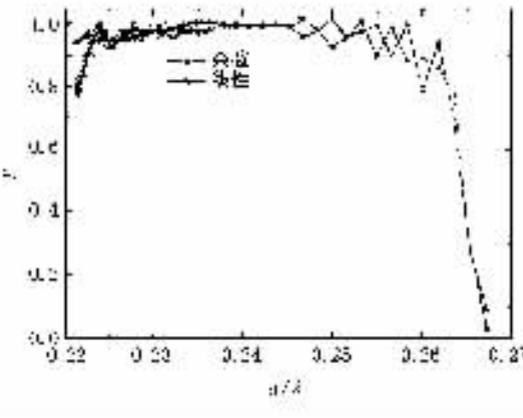


图 7 线性边界条件和余弦型边界条件传输谱对比

## 2.4. 开口距离分析

以上选取边界时给定  $W1 = 4a$ , 那么改变这个取值, 能不能得到更好的传输谱, 就是本文关心的另

一个问题. 选取  $W1 = 3a$  和  $W1 = 5a$  与  $W1 = 4a$  一起进行仿真, 图 8 给出了它们的对比图. 从图中可以看到, 如果开口过小, 将会影响耦合效率; 开口过大也会破坏缓变性, 降低耦合效率. 因此, 在耦合 10 个周期的长度上, 开口  $W1 = 4a$ , 即开口最大处的光子晶体波导后退 1 个周期时, 耦合效率最高.

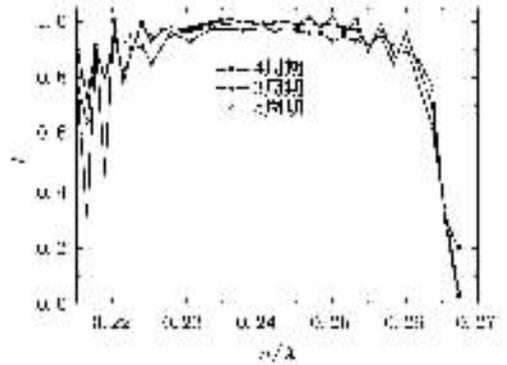


图 8 开口距离耦合传输谱比较

## 3. 结 论

本文基于平面波展开法和有限差分法分析了脊波导到光子晶体波导耦合问题. 仿真结果表明, 利用距离缓变的耦合谐振腔波导和缓变光子晶体边界可以获得较高的耦合效率. 对于线性边界的光子晶体波导, 使用距离缓变的耦合谐振腔波导后在较宽的频带内其耦合效率超过 95%. 进一步改进边界形状, 采用余弦设计, 可以提高耦合效率, 并且超过 95% 耦合效率的频带有所增加. 同时, 边界开口必须满足缓变条件, 在长度为 10 个周期时, 光子晶体后退 1 个周期的耦合效果最佳.

[1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059  
 [2] Philip R 2001 *IEE Review* **47** 1  
 [3] Benisty H, Weisbuch C, Labilloy D *et al* 1999 *J. LightWave Technology* **17** 2063  
 [4] Li Y, Zheng R S, Feng Y C *et al* *Acta Phys. Sin.* **53** 3205 (in Chinese) [李岩, 郑瑞生, 冯玉春等 2004 *物理学报* **53** 3205]  
 [5] Steven G J, Pierre R V, Shanhui F *et al* 2000 *Phys. Rev. B* **62** 8212  
 [6] Wan K, Cheolwoo K and Andrew St 2002 *Optical Letters* **27** 1604  
 [7] Dennis W P, Janusz M, Shouyuan S *et al* 2002 *Optical Letters* **27** 1601

[8] Michael E P and Richard W Z 2002 *Optical Express* **10** 691  
 [9] Talneau A, Lalanne P H, Agio M *et al* 2002 *Optical Letters* **27** 1522  
 [10] Sanchis P, Marti J, Blasco J *et al* 2002 *Optical Express* **10** 1391  
 [11] Peter B, Solomon A and Joannopoulos D 2003 *J. Opt. Soc. Am. B.* **20** 1817  
 [12] Sakoda K 2001 *Optical Properties of Photonic Crystals* (New York: Springer-Verlag)  
 [13] Shen L F, He S L and Wu L 2002 *Acta. Phys. Sin.* **51** 1133 (in Chinese) [沈林放, 何赛灵, 吴良 2002 *物理学报* **51** 1133]  
 [14] Chan C T, Yu Q L and Ho K M 1995 *Phys. Rev. B* **51** 16635  
 [15] Qiu M and He S 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 8268

- [ 16 ] Zhuang F , Xiao S S , He J P *et al* 2002 *Acta . Phys . Sin .* **51** 2167  
( in Chinese ) [ 庄 飞、肖三水、何江平等 2002 物理学报 **51**  
2167 ]
- [ 17 ] Pendry J B and Mackinnon A 1992 *Phys . Rev . Lett .* **69** 2772
- [ 18 ] Wang H and Li Y P 2001 *Acta . Phys . Sin .* **50** 2172 ( in Chinese )  
[ 王 辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172 ]
- [ 19 ] Yee K S 1966 *IEEE trans . Antennas Propagate , AP-14* ( 3 ) 302

## Efficient coupling from dielectric rib waveguide to two-dimensional photonic crystal waveguide

Bai Ning-Feng<sup>†</sup> Liu Xu Xiao Jin-Biao Zhang Ming-De Sun Xiao-Han<sup>†</sup>

( *Laboratory of Photonics and Optical Communications Department of Electronic Engineering ,  
Southeast University , Nanjing 210096 , China* )

( Received 2 February 2005 ; revised manuscript received 22 March 2005 )

### Abstract

An efficient adiabatic coupling is presented in this paper for coupling light between rib dielectric waveguide and 2D photonic crystal waveguide ( PCW ). Using planar wave expand ( PWE ) method and FDTD method , the linear and nonlinear taper profiles are compared . Following with these , some widths of the entrance of the taper are compared and the best width is given . Simulation result have proved that transmission ratio above 95% can be obtained in a wider frequency range by using a cosine taper profile than line taper profile .

**Keywords** : photonic crystal , dielectric rib waveguide , planar wave expand , FDTD , coupling boundary

**PACC** : 7820P , 4282 , 4280L

<sup>†</sup> Corresponding author . E-mail : xhsun@seu.edu.cn