

文章编号 : 0258-7025(2002)08-0711-03

光子晶体光波导传输特性研究

宋俊峰^{1,2}, 常玉春¹, 王海嵩¹, 许 武², 王立军², 杜国同¹

(¹ 吉林大学电子工程系集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林长春 130023)
(² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130022)

提要 用全空间的矢量波散射理论, 研究了有限长二维光子晶体直波导的传输特性, 计算了传输效率与波导长度的关系, 并研究了蝶形光波导的耦合问题。

关键词 光子晶体, 直波导, 蝶形光波导

中图分类号 TN 12 ; O 734 **文献标识码** A

Transmission Characteristic of Photonic Crystal Waveguide

SONG Jun-feng^{1,2}, CHANG Yu-chun¹, WANG Hai-song¹,
WU Xu², WANG Li-jun², DU Guo-tong¹

(¹ State Key Lab on Integrated Optoelectronics, Department of
Electronic Engineering, Jilin University, Changchun 130023 ;
² Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics & Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract The straight waveguide transmission characteristics of two dimensional photonic crystal are investigated based on the overall space theory of vector scattering. The relationship between transmission efficiency and waveguide length is calculated. The coupling of butterfly waveguide is discussed.

Key words photonic crystal, straight waveguide, butterfly waveguide

1 引 言

光子晶体是近十几年来出现的新型材料, 它所涉及的范围十分广泛, 包括电磁学、固体能带理论、量子光学等等, 以光子晶体为基础, 提出了光子晶体微腔^[1]、光子晶体微波天线^[2]、光子晶体光纤^[3]、光子晶体光波导^[4,5]等。我们用 D. Felbacq 等的全空间散射理论^[6], 研究有限长直二维光子晶体光波导在窄光束光(缝光源)照射下的传输特性, 和二维蝶形光子晶体光波导的耦合问题。为了使讨论问题简单明了, 我们只研究二维 E 偏振(电场方向平行二维介质柱)的电磁波情况。

2 数值分析

对于一个 E 偏振的电磁波, 电场部分可以写成

$$E(P) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \{a_{lm} J_m[kr(P)] + b_{lm} H_m^{(1)}[kr(P)]\} \times \exp[im\theta(P)] \quad (1)$$

其中 $E(P)$ 为空间 P 点的电场, $J_m(x)$ 为 m 阶贝塞尔函数, $H_m(x)$ 为 m 阶汉克尔函数, a_{lm}, b_{lm} 为 \hat{a}_l 和 \hat{b}_l 的矩阵元, 是待定系数。对于圆柱形散射介质, D. Felbacq 等的全空间散射理论有^[6]

$$\hat{a}_l = \hat{Q}_l + \sum_{j \neq l} T_{l,j} \hat{b}_j \quad (2)$$

$$T_{l,j,m,q} = \exp[i(q-m)\theta_l^j] H_{m-q}^{(1)}(kr_l^j) \quad (3)$$

收稿日期 2001-06-17; 收到修改稿日期 2001-08-13

基金项目 国家自然科学基金(项目号 68696260, 60077021, G2000036605)资助项目。

作者简介 宋俊峰(1971—), 男, 副教授, 博士, 主要从事半导体激光器、光子晶体、光子晶体光纤方面的研究工作。E-mail:

$$\hat{b}_l = S_l \hat{a}_l \quad (4)$$

S_l 为散射矩阵, \hat{Q}_l 为与入射平面波有关的量

$$Q_{l,m} = \exp[ikr^l \cos(\alpha - \theta^l)] i^m \exp(-im\alpha) \quad (5)$$

将(4)代入(2)得

$$(I - \sum_{j \neq l} T_{lj} S_j) \hat{a}_j = \hat{Q}_l \quad (6)$$

2.1 二维准 Gauss 光束

我们首先给出一个二维准 Gauss 光束的表达式

$$E^i(P) = \int_{-k_0}^{k_0} e^{-\frac{\alpha^2 w^2}{4}} e^{i(\alpha x + \beta y)} d\alpha \quad (7)$$

其中 w 为光束的腰, $\beta = -\sqrt{k_0^2 - \alpha^2}$, 它可以看做不同方向的平面波的叠加, 并且是沿 $-y$ 方向传播的, 对于其他方向入射, 可以通过坐标旋转的办法获得。一个典型的二维 Gauss 光束如图 1 所示, 可以看到它是一个窄光束。由于很难把光束聚焦在波长以内, 在以后的计算中取 w 为光波长。

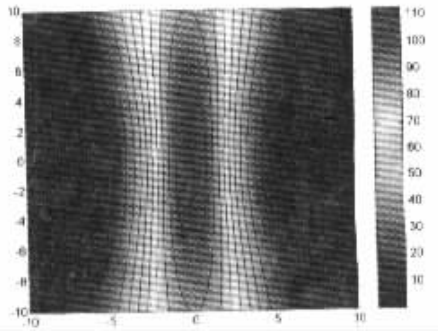


图 1 二维 Gauss 光束的电场分布

Fig.1 Electric field distribution of 2D Gaussian beam

2.2 直波导

图 2(a) 是一个典型的光波导结构, 周围光子晶体的各参数为: 晶格长度 1.27 mm, 圆柱的半径 0.254 mm, 介电常数 8.9, 它的低频禁带在 2.82 ~ 3.845 mm 之间。我们假设光束从上面入射, 并且入口平面为焦平面, 即在波导的入口处光束最窄, 计算结果表明, 波导的长度对光的传输效率影响很大(传输效率的定义为出射光 y 方向的波印亭矢量的积分与入射光积分的比)。如图 2(b) 所示, 横坐标为波导在传播方向上晶格的周期数, 图 2(a) 就是晶格周期数为 12 的情况, 在计算中取波长为 3.3 mm。波导长度与透射率呈现出“拍”的现象, 这是因为每增加一个周期, 使波导内的相位改变很大, 光在波导输出端干涉的结果所致。总的透射率并不高, 一个原因是波导太窄, 入口处光不能有效地射入。如果把入口处做成漏斗形状(如图 3(a)), 传输效率将有很大的改善(如图 3(b)), 对于 3.3 mm 这一波长来

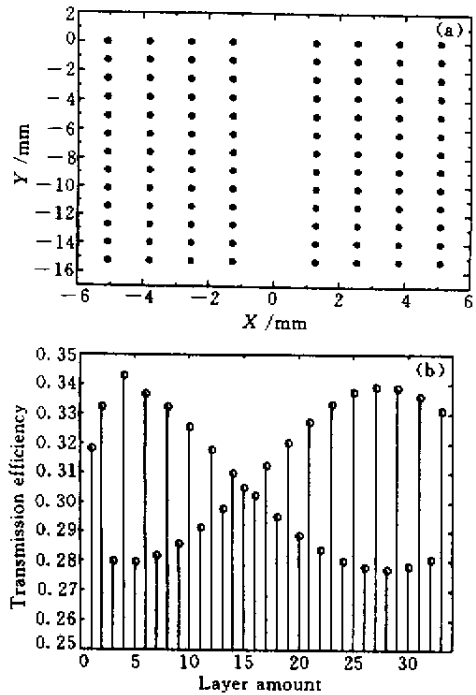


图 2 (a) 二维光子晶体直波导的结构示意图; (b) 光子晶体直波导的传输效率与长度的关系

Fig.2 (a) Schematic map of 2D photonic crystal waveguide; (b) Transmission efficiency of a photonic crystal waveguide versus length

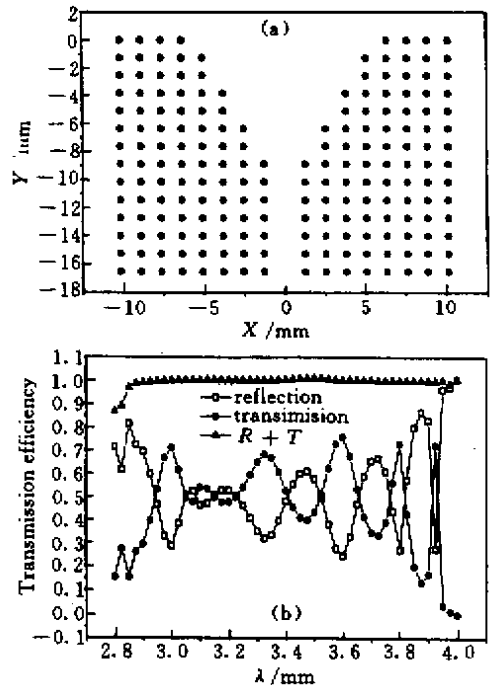


图 3 (a) 漏斗形的光子晶体波导; (b) 漏斗形光子晶体波导的传输效率

Fig.3 (a) Funnel shape photonic waveguide; (b) Transmission efficiency of funnel shape photonic waveguide

说, 由原来的 33.7% 提高到 65%。

2.3 蝶形光子晶体波导耦合器

与一般波导的蝶形耦合器相似,二维光子晶体蝶形光波导的结构如图4(a)所示,晶格参数与前面

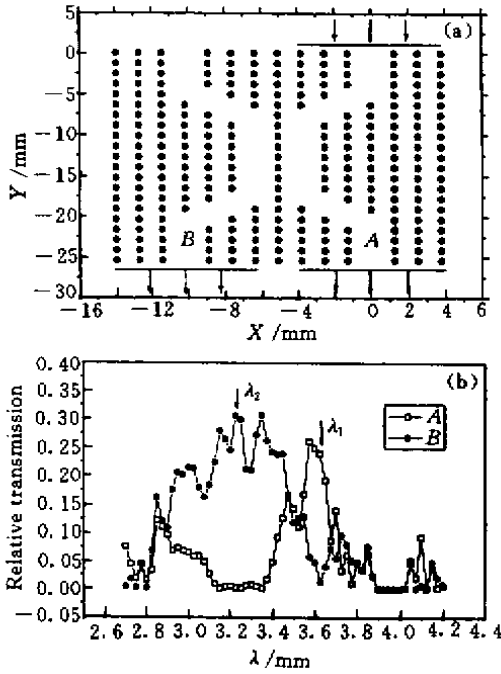


图4 (a) 蝶形光波导示意图;

(b) A, B 两端的平均能流密度

Fig.4 (a) Schematic map of butterfly waveguide;

(b) Average power of A and B port

相同,在 A, B 端的输出情况如图4(b)所示。假如入射波含有图中用箭头标出的两个波长(λ_1, λ_2),在 A 端只有 λ_1 输出(它的平均能流密度是 λ_2 的 18.56 倍),B 端只有 λ_2 输出(它的平均能流密度是 λ_1 的 166.5 倍),从而对入射波有分频的作用。另外的计算表明,波导之间耦合区的长短对传输情况的影响很大。我们这里使用的波长范围是 3 ~ 4

mm,器件的尺寸小于 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,由于这里应用的光学方程是线性的,把所有的长度缩短相同的倍数,所得到的结论应该是相同的,如果波长是 $1.55 \mu\text{m}$ 左右,相应的器件尺寸小于 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$,这是十分小的,它也具有分频作用。

3 结论

使用一个二维准 Gauss 光束作为入射光,研究了二维光子晶体光波导的传输特性。计算结果表明,波导的长度和入射光的宽度对传输效率影响很大。分析了蝶形耦合波导,证明它具有分频作用,并且体积十分小。计算结果对今后的光子晶体光波导的设计非常有益。

参 考 文 献

- 1 O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer *et al.*. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. *Science*, 1999, **284** (5421):1819 ~ 1821
- 2 E. R. Brown, C. D. Parker, E. Yablonovitch. Radiation properties of a planar antenna on a photonic-crystal substrate [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(2):404 ~ 407
- 3 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. Properties of photonic crystal fiber and the effective index model [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(3):748 ~ 752
- 4 A. 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
- 5 Shawn-Yu Lin, Edmund Chow, Vince Hietala *et al.*. Experimental demonstration of guiding and bending of electromagnetic waves in a photonic crystal [J]. *Science*, 1998, **282**(5387):274 ~ 276
- 6 D. Felbacq, G. Tayeb, D. Maystre. Scattering by a random set of parallel cylinders [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11** (9):2526 ~ 2538