

# 光子晶体多路选择器的设计和仿真

娄 莺, 黄晓琴

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

**[摘要]** 以时域有限差分法 (FDTD 法) 和介质波导定向耦合理论为基础, 模拟了光在光子晶体耦合器中的传输情况: 当耦合器长度为拍长的整数倍时, 光经过耦合沿输入波导输出; 当耦合器长度为半拍长的奇数倍时, 光经过耦合后从另一波导输出. 我们设计了一个四端口的光子晶体多路选择器, 实现了将 3 种不同波长的光进行分离. 同时还提出了通过光子晶体耦合器的耦合长度来计算光波传输的群速度的方法.

**[关键词]** 光子晶体, 多路选择器, 群速度

**[中图分类号]** TN252 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2007)04-0041-05

## Design and Simulation of Photonic Crystal Multiplexer

Lou Ying, Huang Xiaoqin

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** The method of Finite Difference Time Domain (FDTD) and directional coupling theory of the medium waveguides are used as the basic theory. A field comes out through the input waveguide when the coupler length is an integer multiple of the beat length. In the contrast, the field injected into one waveguide switches entirely to the other one if the coupler length is an odd multiple of half the beat length. A three-wavelength photonic crystal multiplexer is designed. And a method to compute the group velocity by the coupler length is presented also.

**Key words:** photonic crystal, multiplexer, group velocity

## 0 引言

光子晶体是介电常数 (或折射率) 周期性变化排布的材料<sup>[1]</sup>, 光子晶体的许多特性, 如近带边大的光学色散、全方向的反射、光子局域化、光波导、光学双稳态等<sup>[2,3]</sup>使光子晶体成为实现全光通讯的极佳载体. 光子晶体最根本的特征是具有光子禁带, 频率处于禁带中的光是被禁止传播的. 在光子晶体中引入线缺陷后, 处于禁带中的光可以沿着线缺陷传播, 这就形成了光子晶体波导. 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<sup>[4]</sup>. 将具有不同耦合长度的光子晶体定向耦合器集成在一起, 可以实现多通道耦合. 基于光子晶体波导定向耦合器的多通道耦合器与传统光的耦合器相比有一些特有的优势: 容易集成, 拐弯角度大, 损耗小等.

本文主要研究了光子晶体波导耦合器. 我们运用时域有限差分法 (FDTD 法)<sup>[5]</sup>模拟了一种光子晶体耦合器, 并且通过合理的设计将 3 个不同耦合长度的光子晶体定向耦合器集成在一起, 实现了让 3 种不同频率的光波在通过这个集成器件后分别从 3 个端口输出, 即实现了波分复用. 并且提出了通过光子晶体耦

收稿日期: 2007-05-22 修回日期: 2007-10-05.

基金项目: 江苏省高校自然科学基金 (06KJB140057) 资助项目.

作者简介: 娄 莺 (1982—), 女, 硕士研究生, 主要从事光子晶体的学习与研究. E-mail: louyingbuying@163.com

通讯联系人: 黄晓琴 (1963—), 女, 教授, 主要从事光子晶体的理论及其应用、非线性光学的教学与研究. E-mail: huangxiaqin@pine.njnu.edu.cn

合器的耦合长度来计算光波传输的群速度的方法.

1 介质波导定向耦合原理<sup>[6]</sup>

根据耦合波的一般理论,可以写出耦合波方程:

$$\frac{da_1(z)}{dz} = -j\beta_1 a_1(z) + jK_{21} a_2(z),$$

(1)

$$\frac{da_2(z)}{dz} = -j\beta_2 a_2(z) + jK_{12} a_1(z),$$

(2)

式中

$$a_1(z) = A_1(z) e^{-j\beta_1 z},$$

(3)

$$a_2(z) = A_2(z) e^{-j\beta_2 z},$$

(4)

$A_1(z)$ 、 $A_2(z)$  是模式场  $E_1$  和  $E_2$  的幅度,  $a_1(z)$ 、 $a_2(z)$  是波导的模式振幅瞬时值,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为波导的固有相移系数,  $K_{21}$  和  $K_{12}$  称为耦合系数. 由上式可以看出,耦合系数直接决定了波导之间相互影响的大小. 一般来说,耦合系数满足如下互易性

$$K_{12} = K_{21}^*.$$

(5)

如果两根波导结构及介质参数都一样,则有

$$K_{12} = K_{21},$$

(6)

此时,波导 1 和波导 2 中传播的功率分别为:

$$P_1(z) = a_1(z) a_1^*(z) = a_1^2 \cos^2 kz,$$

(7)

$$P_2(z) = a_2(z) a_2^*(z) = a_1^2 \sin^2 kz,$$

(8)

说明光功率在波导 1 和波导 2 之间周期性交换. 如果  $\sin^2 kz = 1$ , 则光功率完全耦合到波导 2 中.

光子晶体耦合器的耦合长度为<sup>[7]</sup>:

$$L = 0.5 \frac{V_g - \omega_0}{c},$$

(9)

其中,  $\omega_0$  由光子晶体的能带计算可以得到,  $\omega$  为工作频率,  $V_g$  为群速度,  $\omega_0$  为中心波长,  $c$  为光速.

2 光子晶体耦合器的设计与模拟

对于图 1 所示的二维光子晶体耦合器,晶格常数为  $a$ , 基质为空气, 介质柱半径为  $r$ , 介电常数为  $\epsilon_r$ , 取介质柱的半径  $r = 0.25a$ , 并且取折射率为  $n = 2.7$ .

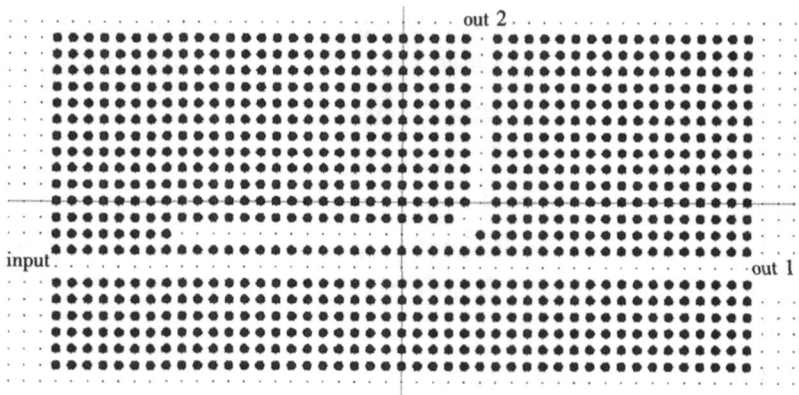


图 1 二维光子晶体耦合器  
Fig.1 Two-dimensional photonic crystal coupler

首先我们用平面波展开法<sup>[8]</sup> 计算了完整二维光子晶体的能带结构. 由其能带结构 (图 2) 我们可以看  
到, 该光子晶体的禁带范围大致在  $\omega = 0.32 \sim 0.41$  之间. 只有在禁带范围内的光才能沿着缺陷传播, 因  
此我们取满足禁带范围的光波长  $\lambda = 2.5a$

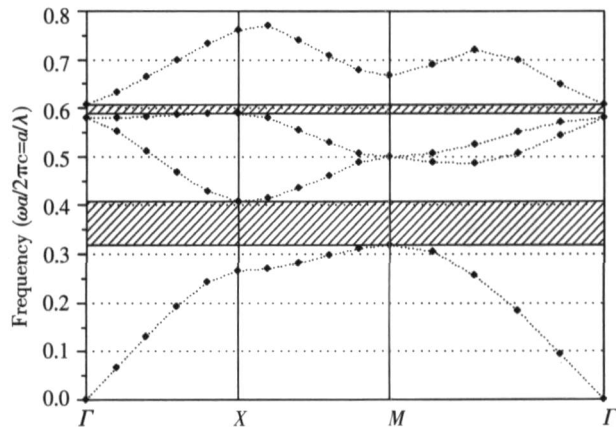


图 2 能带结构

Fig.2 Band structure

其次,我们用 FDTD 法模拟光在光子晶体中的传输.激励源设置为高斯脉冲,

$$f(x,y,z_0)=\exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right)\exp\left(-\frac{y^2}{b^2}\right),$$

其中  $a=\frac{w}{2}$ ,  $b=\frac{h}{2}$ ,  $w$ 、 $h$  分别为此高斯脉冲宽度和高度的  $\frac{1}{e}$ . 时间步长的选择要求满足稳定性条件:  $c \cdot t$

$0.0442\text{ }\mu\text{m}$ , 我们取  $c \cdot t=\frac{\text{grid\_size}}{2}$ .

归一化频率  $f=0.4$  的光波单独入射, 拍长  $L_B=20a$  当耦合器的长度  $L=20a$  (半拍长的偶数倍) 时, 光经过耦合后仍沿输入波导输出 (端口 out 2 输出), 如图 3 (a) 所示; 同样频率的光波输入, 耦合器的长度  $L=30a$  (半拍长的奇数倍) 时, 光经过耦合后从另一波导输出 (端口 out 1 输出), 如图 3 (b) 所示. 同时我们还可以看到能量从一个波导到另一波导的周期性交换, 这也验证了基本理论中的式 (7) 及式 (8), 即光功率在波导之间周期性交换.

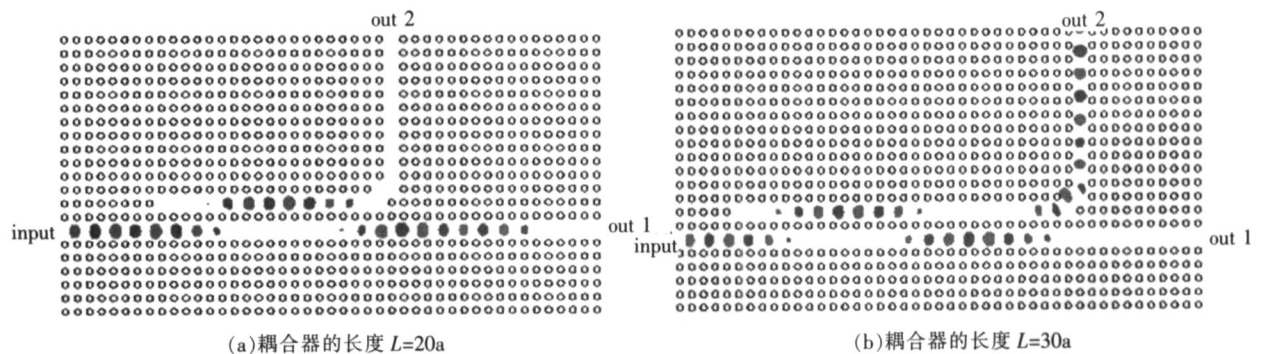


图 3 归一化频率  $f=0.4$  的光波在该光子晶体耦合器中的传输情况

Fig.3 Light transmits inside the coupler with different coupler lengths for the normalized frequency of 0.4

结果表明:耦合器长度为拍长的整数倍时,光经过耦合后沿输入波导输出 (端口 out 1 输出);输入光频率相同,耦合器的长度为半拍长的奇数倍时,光经过耦合后从另一波导输出 (端口 out 2 输出).

在前面的基础上我们设计一个多通道耦合器.某一固定频率的光波对应的拍长是一定的,根据上面的方法确定能将某一频率的光分离出去的耦合器的长度,然后再将这些耦合器级联在一起就构成了一个多路选择器.这里我们设计了一个能将 3 种不同频率的光波进行分离的多路选择器.结构如图 4 所示,基本参数设定与图 1 中一致.当处于禁带频率范围的光在直线缺陷中传播时,能量没有损失,从模拟结果可以看出:在 90 拐弯线缺陷中传播,光能量的损耗很小,因此这样的设计实现了能量的低损耗.

取格矢  $a=380\text{ nm}$  波长  $\lambda_1=950\text{ nm}$ ,  $\lambda_2=987\text{ nm}$ ,  $\lambda_3=1044\text{ nm}$  的光对应的归一化频率分别为  $\frac{a}{2c}$

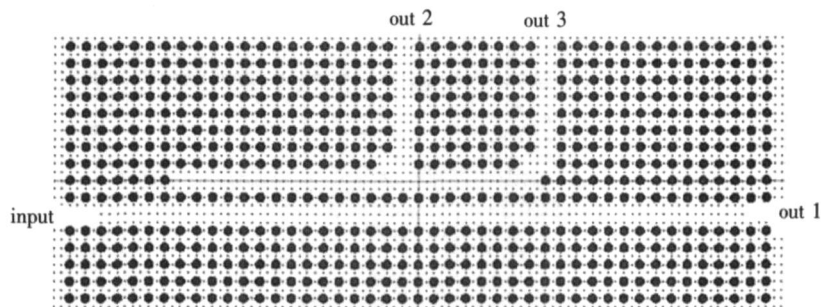


图 4 多路选择器

Fig.4 Photonic crystal multiplexer

$= 0.4, \frac{\omega a}{2\pi c} = 0.385, \frac{\omega a}{2\pi c} = 0.364$  显然这 3 个频率处于该光子晶体的禁带范围内. 这 3 种频率的光波从输入端口 input 入射后的传输情况如图 5 所示:  $\omega_1 = 950\text{ nm}$  的光波经过耦合几乎全部从端口 out 2 输出 (图 5(a));  $\omega_2 = 987\text{ nm}$  的光波经过耦合几乎全部从端口 out 3 输出 (图 5(b)); 而  $\omega_3 = 1044\text{ nm}$  的光波经过耦合几乎全部从端口 out 1 输出 (图 5(c)).

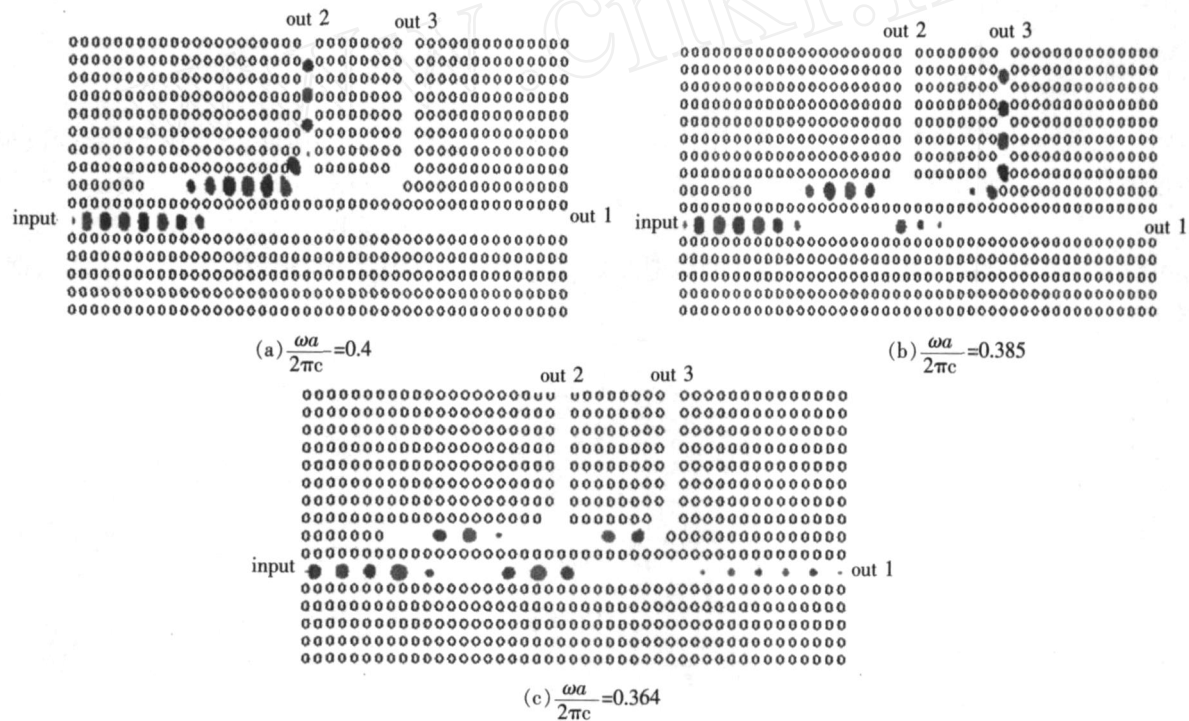


图 5 3 种不同波长的光在多路选择器中的传输

Fig.5 Light transmits separately inside the photonic crystal multiplexer with different normalized frequencies

要求波长为  $\lambda_1$  的光波从 out 2 透出, 则  $L_1 = \frac{L_{B1}}{2} (2n + 1)$ , 且  $L_1 = \frac{L_{B2}}{2} (2n + 1)$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  同理, 波长为  $\lambda_2$  的光波从 out 3 透出, 则  $L_2 = \frac{L_{B2}}{2} (2n + 1)$ , 且  $L_2 = \frac{L_{B1}}{2} (2n + 1)$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  设 out 2 与 out 3 之间的距离为  $d = L_2 - L_1$ ,  $d$  还与介质层数  $N$  有关, 从文献 [9] 耦合器散射曲线知对于固定的  $a$ , 当两波导之间的介质层数增加时, 会导致  $L_B$  变大, 耦合长度也需要增大, 这在实际设计时控制输出波导的长度就很容易避免光波在两输出波导之间的耦合.

在色散介质中, 群速度存在“极慢”<sup>[10]</sup>和超光速<sup>[11,12]</sup>等现象. 20 世纪 90 年代以来, 群速度在不同介质中的超光速和“慢波”现象, 引起了人们广泛的兴趣. 本文中我们提出利用通过光子晶体耦合器的耦合

长度来计算光波传输的群速度的方法.

将式 (9)变形,群速度计算如下:

$$V_g = 2L - \frac{c}{0} \quad (10)$$

若  $L = 20a$ ,  $\epsilon = 0.4$ ,  $\mu = 0.09$ ,  $\epsilon_0 = 2.5a$ , 从而  $V_g = 2.13 \text{ Gm/s}$

可见,在二维光子晶体中也存在群速度超光速现象.

### 3 结论

本文介绍了基于 FDTD 法模拟的光子晶体耦合器,模拟了光波在其中的传输情况.我们通过合理的设计实现了光子晶体分频器——将 3 种不同频率的光在通过光子晶体后分别从 3 个端口输出,并且能量损耗很小.同时还提出了利用耦合长度来计算群速度的方法,有助于研究光子晶体光纤的材料色散.

未来的光电子器件将朝着全光器件的集成发展.如果我们将各种光学器件用光子晶体来制造,并将光子晶体波导集成在一块芯片上,无疑大大提高光学器件的集成度,这种飞跃,就像电子电路从单一元件组合迈进集成电路时代一样.

### [参考文献]

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58: 2 059-2 062
- [2] Krauss T F, Richard M. Photonic crystals in the optical regime past, present and future[J]. Progress in Quantum Electronics, 1999, 23 (2): 51-96
- [3] Chutinan A, Noda S. Waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs[J]. Phys Rev B, 2000, 62(7): 4 488-4 492
- [4] 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): 1 237-1 240
- [5] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1966, 17(5): 302-307.
- [6] 李玉权,崔敏. 光波导理论与技术 [M]. 北京:人民邮电出版社, 2002
- [7] Kuchinsky S, Golyatin V Y, Kutikov A Y, et al. Coupling Between Photonic Crystal Waveguides[J]. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(10): 1 349-1 352
- [8] Plihal M, Shambrook A, Maradudin A A. Two-dimensional photonic band structures[J]. Optics Communications, 1991, 80: 199-120
- [9] Boscolo S, Midrio M, Someda C G. Coupling and decoupling of electromagnetic waves in parallel 2 - D photonic crystal waveguides[J]. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(1): 47-53
- [10] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, et al. Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas[J]. Nature, 1999, 397: 594-598
- [11] Wang L J, Kuznich A, Dogariu A. Gain assisted superluminal light propagation[J]. Nature, 2000, 406(6793): 277-279.
- [12] Steinberg A M, Kwiat P G, Chiao R T. Measurement of the single-photon tunneling time[J]. Phys Rev Lett, 1993, 71(5): 708 - 711.

[责任编辑:顾晓天]