

三平行光子晶体单模波导的耦合 特性及其应用*

于天宝^{1)†} 王明华¹⁾ 江晓清¹⁾ 杨建义¹⁾

1) 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

2) 南昌大学物理系, 南昌 330047)

(2005 年 7 月 16 日收到, 2005 年 11 月 28 日收到修改稿)

将三光子晶体单模波导的相互耦合看成是一个多模干涉系统. 本征模的色散曲线相交或近于相交并出现简并模, 简并模之间存在强烈耦合并导致模式的分布方式发生转变. 多模干涉系统中, 不同波长的光波能量在传输过程中由于相干而具有不同的空间输出行为, 在近简并点多模之间的相干解除, 能流限制在原输入方向, 不发生转移. 三光子晶体单模光波导的这种特性可用于制作波分复用或解复用器件.

关键词: 光子晶体波导, 简并模, 多模干涉, 波分复用或解复用

PACC: 4270Q, 4225K, 4280S

1. 引言

光子晶体是按晶体的对称性制备的周期性介电结构^[1,2]. 光子晶体最基本的特征是具有光子带隙, 频率落在带隙内的光不能通过. 像晶体中的杂质或缺陷会在禁带中形成杂质能级一样, 在完整的光子晶体中引入缺陷, 光子禁带中会出现缺陷模^[3,4]. 若缺陷连续分布将形成线性缺陷, 处于原来对完整光子晶体不透明的禁带中的光可以沿着线缺陷传播, 光子晶体光波导(PCW)就是这样形成的. 光脉冲通过光子晶体可以获得极慢的群速度^[5], 光波能在 PCW 弯曲处实现零损耗传输^[6].

基于光子晶体的光电器件已经得到了广泛的研究. 这种器件相比于传统结构的光电器件, 具有体积小、易于集成, 系统不受外界电磁场干扰等优点^[7-20], 为光电子器件向高集成化的发展带来了崭新的应用前景.

光耦合器是光通信领域中重要的光学元件, 基于光子晶体的耦合器用来制作光功分器、光开关、波分复用或解复用器^[12-18]等, 这些大都是建立在两个邻近的线性 PCWs 中的两个传播模式直接耦合而形成的. 通过结构的设计可以使得相互耦合的两个模

式色散曲线相交, 从而形成解耦合^[17,18]. 当光波导支持多个传播模式时, 形成多模干涉(MMI)型器件. MMI 原理是建立于自映像原理^[19]基础之上的. 近年来, 基于光子晶体的 MMI 器件得到了研究^[19,20]. 研究表明, 自映像原理依然成立^[21]. 这种 MMI 器件可用作光功分器、波分复用或解复用器等.

对三个或三个以上 PCWs 之间的相互耦合研究很少. 本文中我们考虑三个 PCWs 的相互耦合. 把三个 PCWs 系统看作一个多模干涉系统, 被激发的多个本征模式相互干涉. 文献^[19,20]中的多模干涉 PCWs, 多个模式的色散曲线不可能相交, 因而被激发的模式必定在空间发生相干. 在我们设计的结构中, 多模之间的相干近于解除, 可望推广到四个及四个以上的多 PCWs 之间的耦合.

2. 相互耦合的两平行单模 PCWs

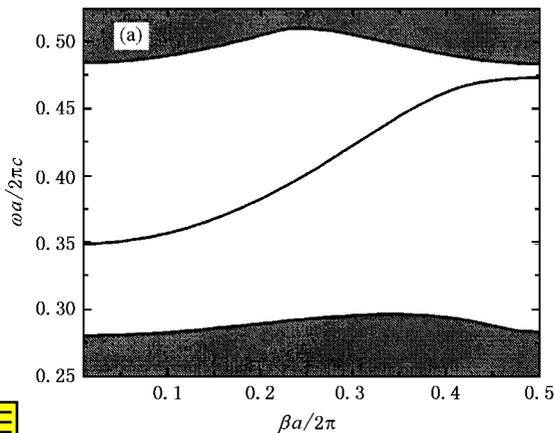
在晶格常数为 a 、基质为空气的完整二维三角晶格光子晶体中, 介电柱为 GaAs, 介电常数为 $\epsilon = 11.56$, 介电柱半径为 r , 并取 $r = 0.18a$. 取去一排介电柱形成单模 PCW. 选取合适的超原胞, 采用平面波展开(PWE)法^[22]. 图 1(a)给出了该单模 PCW 的色散关系曲线. 横电场模式, 电场平行于介电柱, 下

* 国家自然科学基金(批准号: 60477018)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 60436020)资助的课题.

† E-mail: tbyu@zju.edu.cn

同) 阴影部分为允许带, 光子带隙分布在归一化频率 $a/\lambda = \omega a/2\pi c$ 从 0.296 到 0.48 之间, 其中 λ 为真空中的波长. 从图 1(a) 中还可以看到, 由 $\omega a/2\pi c = 0.35$ 延伸到 $\omega a/2\pi c = 0.47$ 只存在一种传播模式.

将两个这样一致的 PCWs 靠近, 中间隔一排介电柱, 色散关系如图 1(b) 所示. 由于相邻 PCWs 缺陷



模之间的耦合作用, 单一缺陷模分裂成两个本征模式. 传播常数越大分裂程度就越小, 直至在某处两本征模简并(如图 1(b) 中的交点, 内插图为其交点附近的放大图) 然后两本征模解简并, 重新分裂成两传输模式. 若光波以简并点处的频率入射, 能量将沿原来的波导传播, 不会发生能量的明显转移^[18].

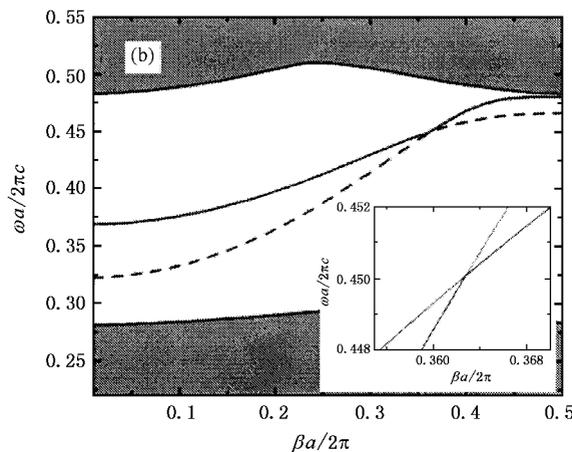


图 1 PCWs 色散关系曲线 (a) 单模 PCW, (b) 两平行 PCWs, 内插图为其相交点附近的放大图

3. 相互耦合的三平行单模 PCWs

下面我们考虑三个邻近且平行 PCWs 的相互耦合. 设计如图 2 所示的结构, 整个波导系统由三部分构成: 单模输入 PCW、三个平行相邻的 PCWs 及两单

模输出 PCWs. 本文将中间部分的三个 PCWs 作为一个整体, 称之为多模干涉型光子晶体波导 (MMIPCWs) 相邻 PCW 间距为晶格常数 a . 输出部分由两个相间为 $3a$ 的 PCWs 组成, 两输出端分别为 A, B , 光波沿 z 方向进入单模 PCW, 其中各 PCW 的参数与上述单模 PCW 完全一致.

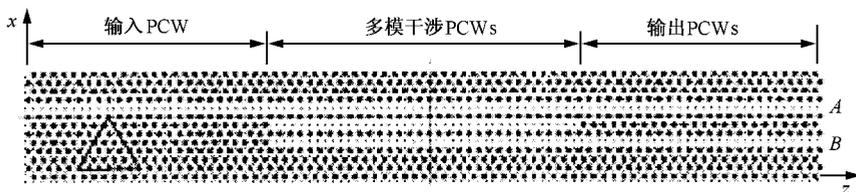


图 2 三角晶格 PCWs 系统结构(由单模输入 PCW、三平行相邻的 PCWs 及两单模输出 PCWs 三部分构成)

首先讨论 MMIPCWs 的色散关系. 由于组成 MMIPCWs 的各 PCW 的缺陷模之间相互耦合, 一个缺陷模分裂成三个本征传播模式, 分裂程度比两 PCWs 耦合时大. 从图 3 可以看到, 随着传播常数的增大, 分裂程度亦减弱, 直至图中出现一个交点 A . 但实际上相交点处各本征模的色散曲线并不完全相交. 图 3 的内插图给出了相交点附近的放大图, 发现真正发生简并的是两高阶模, 两低阶模有一个趋于简并的点, 但并不会完全简并, 而且两高阶模在传播常数变化很小的范围内进行了两次简并. 两高阶模第一次简并在 $\beta = 0.36\chi(2\pi/a)$, $\omega a/2\pi c = 0.4504$;

第二次简并在 $\beta = 0.366\chi(2\pi/a)$, $\omega a/2\pi c = 0.452$, 两低阶模在 $\beta = 0.36\chi(2\pi/a)$, $\omega a/2\pi c = 0.4507$ 趋于简并. 实际上, 这些变化发生在很小的频率范围内 ($\Delta\omega a/2\pi c = 0.0018$).

采用 PWE 法, 图 4(a) 给出了两高阶模在第一简并点两端的电场强度 $|E_y|^2$ 的空间分布. 从图 4(a) 可以看到, 一阶模(左)和二阶模(右)越过简并点后, 对称方式发生了完全的交换. 一阶模场的分布由奇对称变为偶对称, 二阶模则反之. 在第二简并点, 发生了同样的模场方式的完全交换, 此时一阶模由偶对称变为奇对称(图 4(b)左), 而二阶模则反之(图 4

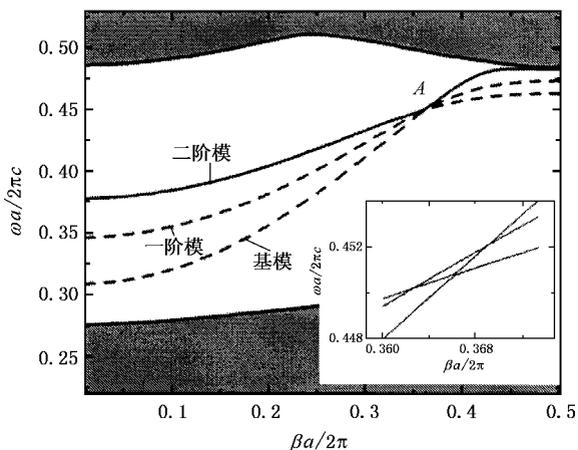


图3 MMIPCWs 色散关系图 内插图为相交点附近的放大图

(b 右). 可见简并模之间发生了强烈耦合, 并导致模场对称方式的交换. 经过两次耦合, 一阶模变回原来的奇对称, 二阶模变回原来的偶对称.

4. MMIPCWs 理论分析及波分复用或解复用设计

入射光波从 $z = 0$ 处进入 MMIPCWs 以后, 将激发 MMIPCWs 的多个本征模式, 从而多个模式间发生干涉. 采用导模传输法, 将输入场表示成多模区所有导模的叠加,

$$\psi(z, x) = \sum_{i=0}^{s-1} c_i \varphi_i(x) e^{-i\beta_i z}, \quad (1)$$

式中 c_i 为场激励系数, $\varphi_i(x) e^{-i\beta_i z}$ 为传播常数为 β_i 的模场, s 为模式数, i 为模式的阶数. 在输出端 $z = L$ 处, 由于各本征模产生不同相移, 叠加场分布改变为

$$\psi(L, x) = \sum_{i=0}^s c_i \varphi_i(x) e^{-i\beta_i L}. \quad (2)$$

(2) 式决定了光场在 $z = L$ 处的分布. 可见由于多个模式间发生干涉, 光场将形成新的分布. 能量在空间的分布情况随相干长度而发生变化. 要使光波在 A 端输出, 必须成输入场的对称像, 应满足

$$\psi(L, x) = \psi(0, x). \quad (3)$$

在 B 端输出(镜像)满足的条件为

$$\psi(L, x) = \psi(0, -x). \quad (4)$$

根据本征模式的奇偶性, 有下列关系式:

$$\varphi_i(-x) = \begin{cases} \varphi_i(x) & (i \text{ 为偶数}), \\ -\varphi_i(x) & (i \text{ 为奇数}). \end{cases} \quad (5)$$

结合(2)(3)(5)式, 得到在 A 端输出时应满足

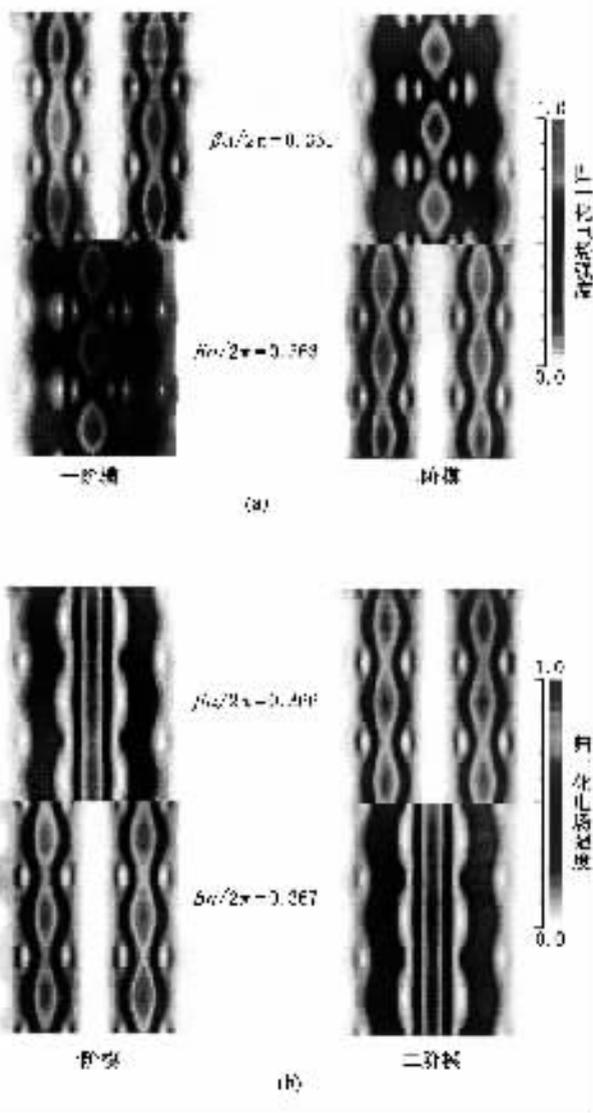


图4 两高阶模在简并点的两端电场强度 $|E_y|^2$ 的空间分布

(a) 第一简并点两端 $\beta = 0.361(2\pi/a)$ 和 $\beta = 0.363(2\pi/a)$ (b) 第二简并点两端 $\beta = 0.366(2\pi/a)$ 和 $\beta = 0.367(2\pi/a)$

$$\beta_i L = 2k_i \pi \quad (k_i = 1, 2, 3, \dots). \quad (6)$$

由(2)(4)(5)式得到 B 端输出的满足条件为

$$\beta_i L = \begin{cases} 2k_i \pi & (i \text{ 为偶数}, k_i = 1, 2, 3, \dots), \\ \chi(k_i - 1)\pi & (i \text{ 为奇数}, k_i = 1, 2, 3, \dots). \end{cases} \quad (7)$$

从(6)(7)式可知, 由于同一频率入射的光波对应着多个具有不同传播常数的模式, 各模式之间相互干涉, 所以通过选择不同的相干长度 L 可以决定该光波的输出位置.

对于一个确定的相干长度 L , 在 A 端输出时, 第 i, j 个模式有下列关系:

$$\Delta\beta_{ij} L = (\beta_j - \beta_i) L = \chi(k_j - k_i)\pi$$

$$(k_i, k_j = 1, 2, 3, \dots). \quad (8)$$

由(8)式可知,如果以某种频率入射的光波多个传输模式重合将导致 $\Delta\beta_{ji} = 0$,则相应的相干长度 $L = \infty$,即相干长度为无穷长,或者相互之间的干涉将会消失.这样就解除了多模之间的相互耦合,光场将始终在 A 端输出.

图 2 中输入 PCW 的光场相对于 MMPCWs 是反对称入射,将激发多模区的所有本征模.在多模色散曲线的交点处,我们选取工作频率 $\omega a/2\pi c = 0.4504$.此时三本征模传播常数的 $\Delta\beta_{10} = 0.0011$, $\Delta\beta_{21} = 0$.采用时域有限差分法^[23],图 5(a)给出了在

相干长度 $L = 32a$ 处达到稳定输出状态时光波的电场幅度分布图.入射光波在整个传输过程中都沿着原输入方向,能量局域在单模输入 PCW 方向,不会随着传播距离的改变被耦合而导致能量明显向其他 PCWs 转移,也就是原本应出现的多个模式相干干涉现象由于三传输模近于简并而出现了解干涉的行为.当然,相干的解除并不意味着没有相干.此时各模式依然相干,只是对于近于简并和简并的本征模而言,由于传播常数相差非常小甚至为零,从而导致它们之间的拍长相对波导结构无限长,干涉近于消失,能量几乎不能被转移.

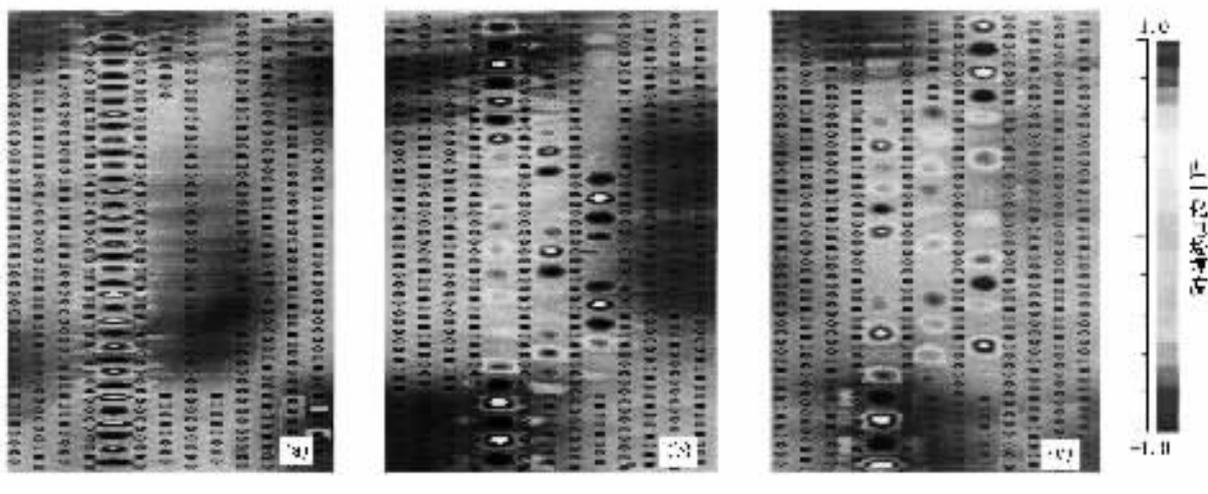


图 5 $L = 32a$ 处稳定输出状态时不同频率光波的电场幅度分布图 (a) $\omega a/2\pi c = 0.4504$ (b) $\omega a/2\pi c = 0.401$ (c) $\omega a/2\pi c = 0.382$

在 $L = 32a$ 处我们选取另两个工作点 $\omega a/2\pi c = 0.401$ 和 $\omega a/2\pi c = 0.382$,图 5(b)(c)分别给出了两者稳态光场的电场幅度分布图.频率为 $\omega a/2\pi c = 0.401$ 的光波和 $\omega a/2\pi c = 0.4504$ 的光波同样在端口 A 输出,但是前者是经过多个模式之间相互干涉,然后在端口 A 重新形成输入场的对称像而输出的,从而光波在传输过程中能量将不断在三个 PCWs 中进行转换.频率为 $\omega a/2\pi c = 0.382$ 的光波在输出端 B 输出,这是多模干涉在端口 B 成输入场的镜像而形成的,能量在传输中也在不断转移.定义 E_A 和 E_B 分别为输出端口 A 和输出端口 B 的输出能量.表 1 给出了达到稳定输出状态时两输出端能量的比值.

若选取晶格常数 $a = 0.592 \mu\text{m}$,则 $\omega a/2\pi c = 0.382$ 对应的工作波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\omega a/2\pi c = 0.401$ 对应波长 $\lambda = 1.476 \mu\text{m}$, $\omega a/2\pi c = 0.4504$ 对应波长 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$,则对应于 $\omega a/2\pi c = 0.4504$ 和 $\omega a/2\pi c = 0.382$ 两频率可用来设计 1310 和 1550 nm 的粗波分解复用器.自然,如果反方向入射,亦可用

作波分解复用器.

表 1 稳定输出状态时两输出端能量的比值

归一化频率 $\omega a/2\pi c$	$\frac{E_B}{E_A}/\%$
0.4504	1
0.4010	0.89
0.3820	8266

5. 结 论

把三个 PCWs 之间的相互耦合看成一个 MMPCWs,其色散曲线相交,多模区出现简并模.简并模之间发生强烈耦合作用,并导致模式的对称方式发生改变.根据导模传输法,得到不同波长的光波能量在传输过程中由于相干而具有不同的空间分布,并且多模波导的简并或近简并点处多模之间解除相干,能流被限制在原输入方向.通过选取合适的相干长度,可以将不同波长的光波在不同的端口输

出,因此可以用来设计波分复用或解复用器.基于相干近于解除现象,设计了一种 1310 和 1550 nm 的粗波分复用器.

将这种情况推广到四个或四个以上波导之间的

耦合,在 MMIPCWs 的色散关系图中,在很窄传播常数和频率变化范围内,依然有四个或四个以上的本征模式简并或近于简并,我们将对其传播行为作进一步讨论.

-
- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Yablonovitch E, Gmitter T J 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 3380
- [4] Liu N H 1997 *Phys. Rev. B* **55** 4097
- [5] Yu T B, Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3049 (in Chinese) 于天宝、刘念华 2004 *物理学报* **53** 3049]
- [6] Mekis A, Chen J C, Kurland I *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3787
- [7] Zhao D, Shi B, Jiang Z *et al* 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 409
- [8] Zhou P, You H Y, Wang S Y *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2276 (in Chinese) 周鹏、游海洋、王松有等 2002 *物理学报* **51** 2276]
- [9] Hosomi K, Katsuyama T 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 825
- [10] Li L M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3400
- [11] Solli D R, McCormich C F, Chiao R Y *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1036
- [12] Park I, Lee H S, Kim H J *et al* 2004 *Opt. Express* **12** 3599
- [13] Sharkawy A, Shi S, Prather D W 2002 *Opt. Express* **10** 1048
- [14] Martinez A, Cuesta F, Marti J 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 694
- [15] Koshiha M 2001 *IEEE J. Lightwave Technol.* **19** 1970
- [16] Zimmermann J, Kamp M, Forchel A *et al* 2004 *Opt. Commun.* **230** 387
- [17] Boscolo S, Midrio M, Someda C G 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 47
- [18] Chien F S S, Hsu Y J, Hsieh W F *et al* 2004 *Opt. Express* **12** 1119
- [19] Liu T, Zakharian A R, Fallahi M 2004 *IEEE J. Lightwave Technol.* **22** 2842
- [20] Kim H J, Park I, O B H *et al* 2004 *Opt. Express* **12** 5625
- [21] Soldano L B, Pennings E C M 1995 *IEEE J. Lightwave Technol.* **13** 615
- [22] Johnson S G, Joannopoulos J D 2001 *Opt. Express* **8** 173
- [23] Taflove A 2000 *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* (Boston: Artech House)

Coupling characteristics of electromagnetic waves in parallel three photonic crystal waveguides and its application *

Yu Tian-Bao^{1,2)} Wang Ming-Hua¹⁾ Jiang Xiao-Qing¹⁾ Yang Jian-Yi¹⁾

¹⁾ *Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

²⁾ *Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330047, China*

(Received 16 July 2005; revised manuscript received 28 November 2005)

Abstract

We consider the coupling between three photonic crystal waveguides as a multimode interference system and show that the dispersion curves of the eigenmodes intersect or almost intersect. Degenerate modes appear in the system. Due to the strong coupling between the degenerate modes, the modal patterns of the guided modes are changed obviously. We find that the power distribution of output light waves of different frequencies is different by selecting the coherence length. At the crossing point, the multimode interference is deprived and power is confined to its input direction without observable transferring to other photonic crystal waveguides. On the basis of these, a wavelength de-multiplexer or multiplexer is designed.

Keywords : photonic crystal waveguide, degenerate mode, multimode interference, wavelength de-multiplexer or multiplexer

PACC : 4270Q, 4225K, 4280S

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60477018) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60436020).