

文章编号: 0253-2239(2004)03-319-5

等效折射率模型研究光子晶体光纤的色散特性*

任国斌 娄淑琴 王 智 简水生
(北京交通大学光波所, 北京 100044)

摘要: 应用等效折射率模型对折射率导模光子晶体光纤的群速度色散特性进行了详细的讨论。由于光子晶体光纤由单一材料(SiO_2)制成, 光纤的波导色散决定了总色散, 因此讨论中将群速度色散分解为波导色散和材料色散, 研究了波导色散与光子晶体光纤的结构参量孔距 Λ 、相对孔径 f 的关系。分析表明, 在 f 一定的情况下, 光子晶体光纤的波导色散与孔距 Λ 的关系符合麦克斯韦方程的比例性质; 而在孔距 Λ 确定的情况下, 光子晶体光纤的波导色散的零点、极小值点位置与 f 在所讨论的波长范围内存在线性关系。最后举例说明了通过调整光子晶体光纤的结构参量, 可以灵活地设计其色散特性。

关键词: 光子晶体光纤; 色散; 等效折射率模型; 结构参量
中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Study on Dispersion Properties of Photonic Crystal Fiber by Equivalent-Index Model

Ren Guobin Lou Shuqin Wang Zhi Jian Shuisheng
(*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044*)
(Received 17 December 2002; revised 28 March 2003)

Abstract: The group-velocity-dispersion properties of photonic crystal fiber (PCF) were investigated in detail by equivalent-index model. The PCF discussed here is made of single material (SiO_2), the total dispersion is determined by waveguide dispersion, so the total dispersion has been divided into waveguide dispersion and material dispersion. The dependence of waveguide dispersion on structure parameters is investigated. It shows that when the relative hole size f is fixed, the relationship between waveguide dispersion and the pitch Λ accords with the scaling properties of Maxwell equations; when the pitch Λ is fixed, the zero and the extremum positions of the waveguide dispersion are linear with f in prefer wavelength range. As examples, how to design the structure parameters for engineering the chromatic dispersion of PCF is demonstrated.

Key words: photonic crystal fiber; chromatic dispersion; equivalent-index model; structure parameter

1 引 言

光子晶体光纤(Photonic crystal fiber, PCF)又称为微结构光纤(Micro-structured fiber)或多孔光纤(Hole fiber), 它由未掺杂的 SiO_2 和空气孔构成, 其横截面是周期性排列的沿轴向均匀的圆空气孔, 在芯子的位置, 其周期性被破坏形成缺陷, 光就可以

沿缺陷传播。光子晶体光纤可以分为两类^[1]: 折射率导模光子晶体光纤, 其导模机制为全反射^[2]; 另一类是光子带隙导模光子晶体光纤^[3,4], 其导模机制为光子带隙效应。

自从 Birks 等^[5]1995 年提出了二维全光子带隙的光子晶体光纤的设想以来, 光子晶体光纤的发展非常迅速, 目前, 光子晶体光纤的损耗已经降到了 0.58 dB/km ^[6], 已接近实用化。与传统光纤比较, 光子晶体光纤有许多独特的性质: 无尽的单模特性^[7], 特定结构的光子晶体光纤可以在极宽的波长范围内只支持单模运行。光子晶体光纤的无尽单模

* 北京交通大学论文基金(NJTUPD235)资助课题。

E-mail: guobin_ren@yahoo.com.cn

收稿日期: 2002-12-17; 收到修改稿日期: 2003-03-28

特性还与绝对尺寸无关,这表明可以根据需要来设计光纤模场面积,目前已有芯径为 $15 \mu\text{m}$ 的大有效面积光子晶体光纤的报道^[8]。应用光子晶体光纤还可以得到模式双折射高达 10^{-3} 量级的保偏光纤^[9]。另外光子晶体光纤的非线性特性,可以应用于全光开关^[10]。由于光子晶体光纤独特的色散特性,光子晶体光纤具有在色散管理方面的优势。其中利用光子晶体光纤的色散特性用作色散补偿^[11],光孤子传输和产生^[12],有源器件^[13]等正成为研究热点。

对于光子晶体光纤的色散特性的分析^[14~17],大都不详尽。本文利用等效折射率模型系统地研究了折射率导模光子晶体光纤的色散特性,着重研究了波导色散与光子晶体光纤的结构参量孔距 Λ 、相对孔径 f 的关系。最后通过对光子晶体光纤进行设计实现双零色散的例子,显示了光子晶体光纤在色散管理方面的优势。

2 等效折射率模型

图 1 为折射率导模光子晶体光纤的横截面示意图,截面可以分为包层区和芯区。在包层区,均匀圆空气柱在石英衬底上按三角排列形成周期性结构;芯层由一个石英圆柱代替一个圆空气柱形成。光子晶体光纤的结构参量可以由孔距 Λ ,孔径 d 来表征。习惯做法是用 Λ 和相对孔径(孔径孔距比) $f=d/\Lambda$ 来定义。图中的中心区域为等效折射率模型中的等效光纤芯子,定义其芯径为 R 。由于包层区由周期性排列的圆空气柱组成,而芯层由纯石英构成,包层区的平均折射率较芯区较低。和传统光纤一样,光子晶体光纤就可以通过全内反射导光。等效折射率模型由 Birks 等^[7]提出。具体的思路是考虑在包层区,可以计算得到基空间填充模(fundamental space-filling mode)即包层基模的传输常量 β_{FSM} 。由 β_{FSM} 可以得到包层区的有效折射率 $n_{\text{eff}}=\beta_{\text{FSM}}/k_0$, k_0 为自由空间波矢量。

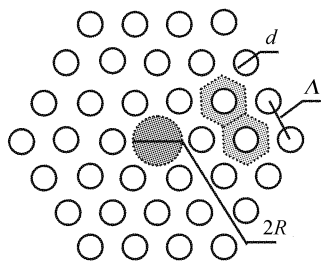


Fig. 1 Schematic diagram of TIR-PCF. TIR: total internal reflection

将 β_{FSM} 近似为无限大周期性结构的基模传输常量。图 2 中左侧是包层区中的一个周期性单元,在空气孔的直径 d 不是很大的情况下,可以将其外围正六边形区域近似为右侧的半径为 b 的圆。圆的半径可以由面积换算。

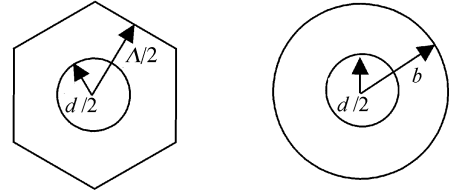


Fig. 2 Actual unit cell and its approximation

在图 2 右侧所示的一个周期性单元中,采用标量近似,标量场可以写成 $\Psi \exp[i(\omega t - \beta z + m\varphi)]$ 的形式, Ψ 满足

$$[\nabla_t^2 + (k^2 n^2 - \beta^2)]\Psi = 0, \quad (1)$$

边界条件为:在 $r=b$ 时,由于周期性边界条件要求 $d\Psi/dr=0$;在 $r=a$ 时, $\Psi, d\Psi/dr$ 保持连续。应用边界条件,并利用贝塞尔函数的递推公式,在考虑基模传输的情况下可以得到特征方程:

$$\begin{aligned} UI_0(W) \left[J_1(U) N_1 \left(\frac{b}{a} U \right) - J_1 \left(\frac{b}{a} U \right) N_1(U) \right] = \\ WI_1(W) \left[J_1 \left(\frac{b}{a} U \right) N_0(U) - J_0(U) N_1 \left(\frac{b}{a} U \right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad d/2 = a, \\ W^2 = a^2(\beta^2 - k_0^2 n_1^2)^2, \\ U^2 = a^2(k_0^2 n_2^2 - \beta^2)^2, \end{aligned}$$

n_1 为空气的折射率, $n_1=1$, n_2 为石英的折射率,函数 J, I, N 分别为贝塞尔函数、第一类变形贝塞尔函数和诺埃曼函数。

上述特征方程可以利用数值方法求解,方程的第一个根就对应基空间填充模的 β_{FSM} ,再由 $n_{\text{eff}}=\beta_{\text{FSM}}/k_0$,得到包层区等效折射率 n_{eff} 。有了包层区的等效折射率 n_{eff} ,我们就可以利用阶跃光纤的理论来研究光子晶体光纤的导模特性,如单模条件、色散等传输特性。这里有一点需要注意,对于等效芯径的选取,不同的文献选择了不同的值^[7,14,18],这里我们考虑到芯层是由包层区的一个周期性单元被替代而形成的,从包层区的周期性出发,我们选取芯径为 $R=\Lambda/2$,如图 1 中心的圆。

3 光子晶体光纤色散特性分析

光纤中的色散系数 D 可以表示为

$$D = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_e}{d\lambda^2}, \quad (3)$$

其中 c 为真空中的光速, λ 为波长. n_e 为光纤中模式的有效折射率, 它又可以写作

$$n_e = \beta[\lambda, n_m(\lambda)]/k_0.$$

β 为光纤中模式的传播常量, k_0 为自由空间波矢量, $n_m(\lambda)$ 指的是材料折射率对波长的依赖关系. 这样, 光纤色散就起源于两个因素: 一是模式的传播常量 β 对波长的依赖, 即使没有材料色散 $n_m(\lambda)$ 的影响, 总色散 D 也不会为零, 称之为波导色散. 另一个因素是模式的传播常量 β 通过 $n_m(\lambda)$ 对波长的隐性依赖, 称之为材料色散. 这样总色散 D 就可以近似表达为

$$D(\lambda) \approx D_w(\lambda) + D_m(\lambda), \quad (4)$$

$D_w = D|_{n_m(\lambda)=\text{const}}$ 为波导色散; D_m 为材料色散, 可以应用塞耳迈耶尔公式计算得到. 对于不同结构参量的光子晶体光纤来说, 由于是纯石英材料, 材料色散是相同的, 我们只需要讨论波导色散 D_w . 考虑到麦克斯韦方程的比例性质, 应用(3)式, 若光子晶体光纤截面的大小缩放一个因子 M , 由(3)式可得^[17]

$$D_w(\lambda; M\Lambda, f) = \frac{1}{M} D_w\left(\frac{\lambda}{M}; \Lambda, f\right), \quad (5)$$

(5)式说明, 当保持 f 不变, Λ 放大为 $M\Lambda$ 时, 波导色散的值减小到原来的 $1/M$, 同时对应波长也变为 λ/M . 这一性质使分析光子晶体光纤的色散过程得以简化.

4 光子晶体光纤的波导色散

图3为光子晶体光纤的波导色散 D_w 特性与孔距 Λ 关系的曲线. 计算时选取的 $f = 0.3$, 光子晶体光纤的孔距 Λ 从 $1 \mu\text{m}$ 到 $3 \mu\text{m}$ 变化, 在波长 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 范围内, Λ 越大 D_w 曲线在波长方向上拉得越开, 同时其幅度相应地减小. 对于每一个 Λ 其色散曲线都有一个极小值, 曲线的线性部分(下降部分)的斜率随 Λ 的变化而变化. 通过计算曲线零点及极小值点的位置, 得到图4, 图4显示对于确定的 f , 不同 Λ 的曲线, 其零点及极小值点的位置(用 $D_w = 0$ 和 D_w^{\min} 表示)与 Λ 呈正比关系. 这种关系可以通过(5)式来解释, 对于确定的 f , 波导色散曲线为 $y = D_w(\lambda; \Lambda, f)$, 假设其零点与极小值点对应的波长分别为 λ_1 和 λ_2 , 当 Λ 变为 $M\Lambda$ 时, 由(5)式, 曲线形式变为 $y = \frac{1}{M} D_w\left(\frac{\lambda}{M}; \Lambda, f\right)$. 曲线零点与极小值点对应

的波长与比例因子 M 的关系即为: $\lambda = \lambda_1 M$ 和 $\lambda = \lambda_2 M$ 两条直线, 式中的 M 可以这样理解, 若选取参考点为 $\Lambda = 1$, M 就是孔距 Λ 的大小. 两条直线的斜率分别为 λ_1 和 λ_2 , 且都过原点, 如图4中虚线所示.

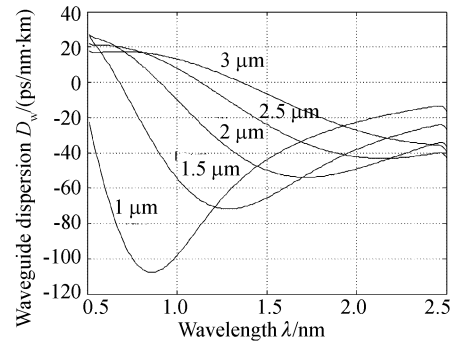


Fig. 3 Waveguide dispersion for $f=0.3$ and different Λ

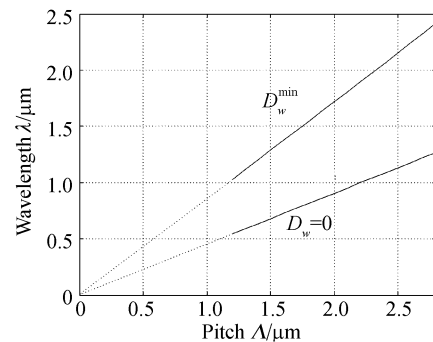


Fig. 4 Relationship between $D_w = 0$, D_w^{\min} wavelength and Λ

图5是光子晶体光纤的波导色散特性与 f 关系的曲线, 计算中取 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, f 的取值从 0.1 到 0.5 . 对于确定的 Λ , 在波长 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 范围内, 不同 f 所对应的曲线都有一个极小值. f 越大, 光子晶体光纤的波导色散也就越明显, 曲线变化越剧烈. 我们注意到, 对应不同 f 值的曲线的斜率为负的部分(下降部分), 曲线近似是平行的, 并随 f 的增大, 下降部分延长, 并向右平移, 同时得到更大的负色散,

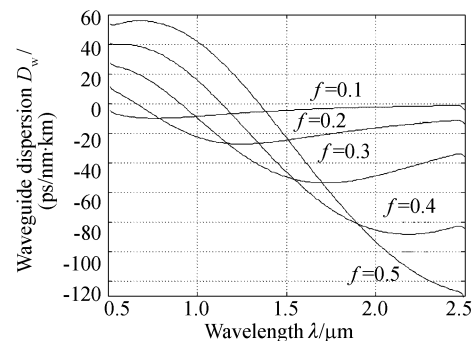


Fig. 5 Waveguide dispersion for $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ and different f

这种规律有利于对光子晶体光纤的色散进行设计。同样,经计算可得图 5 中曲线的零点和极小值位置与 f 的关系,如图 6 所示。不同 f 的曲线的零点和极小值位置与 f 在这段波长范围内近似呈线性关系,即随 f 的增大,零点和极小值位置线性增大,只是极小值位置曲线 D_w^{\min} 的斜率大于零点位置曲线 $D_w=0$ 。这两条曲线可以部分地说明图 5 中曲线的特征。图 6 和图 4 有些相似,但我们目前无法从理论上解释其原因。

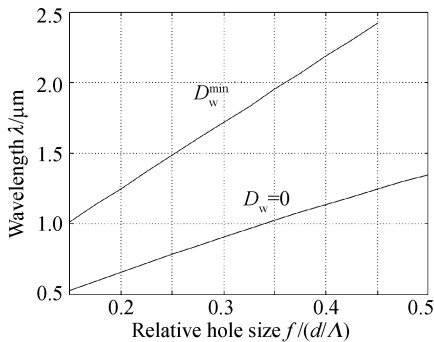


Fig. 6 Relationship between $D_w=0$, D_w^{\min} wavelength and relative hole size f

5 应用光子晶体光纤设计特殊色散特性光纤

有了光子晶体光纤结构参量和波导色散的关系,下面我们举例说明通过选择适当的光子晶体光纤结构参量,可以灵活调节光子晶体光纤色散特性。

由(4)式, $D = D_w - (D_m)$, 如果得到波导色散 D_w 曲线与材料色散曲线 $-D_m$, 总色散就等于两条曲线的差。图 7 是双零色散光子晶体光纤的色散曲线,选取的参量为: $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $f = 0.5$ 。图中 D_w 曲线、 $-D_m$ 曲线有两个交点,意味着总色散将有两个零点。图中 D 是总色散的曲线,两个零色散点分别位于 $0.99 \mu\text{m}$, $1.43 \mu\text{m}$ 。通过调整图 7 中的波导色散就可以调整光子晶体光纤零色散点的位置,如利用(5)式,减小孔距 Λ 波导色散曲线 D_w 会向短波长收缩,同时幅度加大,这就会导致零色散波长的移动,图 8 是 $f = 0.5$, Λ 从 $1.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 变化的色散曲线,我们注意到随着 Λ 的增大,第一个零色散波长的位置变化很小,在 $1 \mu\text{m}$ 附近。而第二个零色散波长的位置变化较大,向长波长方向移动,从 $1.43 \mu\text{m}$ 到 $2.1 \mu\text{m}$ 。两个零色散点之间的色散为反常色散,幅度随 Λ 的增大而增大。

另外,通过对结构参量的适当选择还可以实现色

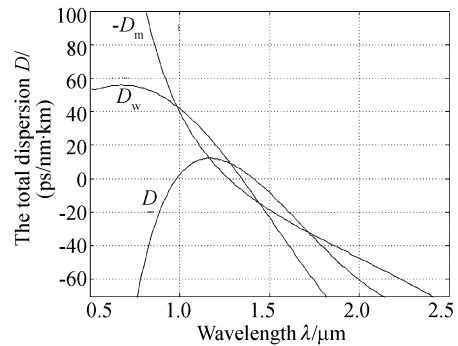


Fig. 7 Dispersion of double-zero dispersion PCF

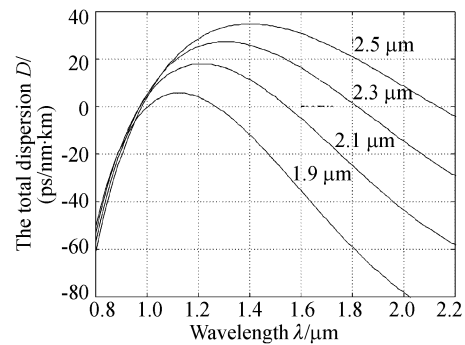


Fig. 8 Dispersion for $f=0.5$ and different Λ

散平坦,或大的负色散。如选择 $\Lambda = 2.62 \mu\text{m}$, $f = 0.317$, 色散曲线的色散平坦窗口非常宽,在 $1.38 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 窗口内,色散变化小于 $0.35 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 而传统光纤不可能做到这一点。选取 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, $f = 0.5$ 时,极小值色散点移到 $1.55 \mu\text{m}$, 约为 $-210 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 在较宽的波长范围内,色散比较平坦,可用于波分复用系统的宽带色散补偿。

由于光子晶体光纤包层区的有效折射率与波长有很强的依赖关系,使我们设计光子晶体光纤的色散特性时有了较大的选择余地,可以设计具有更为复杂色散特性的光子晶体光纤。

结论 应用等效折射率模型对折射率导模光子晶体光纤的群速度色散特性进行了详细的分析和讨论。由于本文讨论的光子晶体光纤由纯 SiO_2 制成,对于不同结构参量的光纤,其材料色散相同,因此波导色散决定了光纤的总色散。讨论中将群速度色散分解为波导色散和材料色散,着重研究了波导色散与光子晶体光纤的结构参量孔距 Λ 、相对孔径 f 的关系。分析表明,在 f 一定的情况下,光子晶体光纤的波导色散与 Λ 的关系符合麦克斯韦方程的比例性质;而在 Λ 确定的情况下,光子晶体光纤的波导色散的零点、极小值点位置与 f 存在线性关系。最后应用

上述结论, 举例说明了通过对光子晶体光纤结构的设计可以实现特殊色散特性, 如色散补偿、色散位移、色散平坦等色散特性, 显示了光子晶体光纤在色散管理方面的优势。

参 考 文 献

- 1 Night J C, Russell P S. New way to guide light. *Science*, 2002, **296**(5566):276~277
- 2 Night J C, Birk T A, Russell P St J *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19):1547~1549
- 3 Night J C, Broeng J, Birks T A *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fibers. *Science*, 1998, **282**(5393):1476~1478
- 4 Cregan R F, Mangan B J, Knight J C *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air. *Science*, 1999, **285**(5433):1537~1539
- 5 Birk T A, Robert P J, Russell P St J *et al.*. Full 2-D photonic bandgaps in silica/air structure. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(22):1941~1943
- 6 Farr L, Night J C, Mangan B J *et al.*. Low loss photonic crystal fiber. *ECOC '2002*, PD1.3
- 7 Birk T A, Night J C, Russell P St J *et al.*. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13):961~963
- 8 Nielsen M D, Petersson A, Jacobsen C *et al.*. All-silica photonic crystal fiber with large mode area. *ECOC '2002*, 3.4.2
- 9 Suzuki K, Kubota H, Kavarishi S *et al.*. High-speed bidirectional polarization division multiplexed optical transmission in ultra low-loss (1.3 dB/km) polarization-maintaining photonic crystal fibre. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(23):1399~1401
- 10 Petropoulos P, Monro T M, Belardi W *et al.*. 2R-regenerative all-optical switch based on a highly nonlinear holey fiber. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16):1233~1235
- 11 Birk T A, Mogilevtsev D, Night J C *et al.*. Single material fibers for dispersion compensation. *OFC '1999*, FG2-1~FG2-3
- 12 Wadsworth W J, Night J C, Ortigosa-Blanch A *et al.*. Soliton effects in photonic crystal fibers at 800 nm. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(1):53~55
- 13 Champert P A, Popov S V, Taylor J K *et al.*. Generation of multiwatt, broadband continua in holey fibers. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(2):122~124
- 14 Bjarklev A, Broeng J, Dridi K *et al.*. Dispersion properties of photonic crystal fiber. *ECOC '98*, 135~136
- 15 Mogilevtsev D, Birk T A, Russell P St J. Group-velocity dispersion in photonic crystal fiber. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21):1662~1664
- 16 Night J C, Arriaga J, Birks T A *et al.*. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber. *Photon Technol. Lett.*, 2000, **12**(7):807~809
- 17 Ferrando A, Silvestre E, Miret J J *et al.*. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(12):790~792
- 18 Birk T A, Mogilevtsev D, Night J C *et al.*. The analogy between photonic crystal fibers and step index fibers. *OFC '1999*, FG4-1~FG4-3