

文章编号: 0258-7025(2004)11-1343-04

## 布拉格光纤色散特性的研究

梁伟军, 王 智, 任国斌, 娄淑琴, 江中澳

(北京交通大学光波所, 北京 100044)

**摘要** 布拉格光纤是由在径向折射率呈周期分布的多层介质圆环构成的一种光纤。由于多层的几何结构特征, 布拉格光纤表现出与普通光纤不同的色散特性。引入等效折射率法(EIM)结合多层光波导理论来分析布拉格光纤, 对于布拉格光纤的色散特性进行了深入的分析, 得到了布拉格光纤色散的比例性质(scaling properties), 并举例说明利用波导色散与结构参数的关系, 通过调整布拉格光纤的结构参数, 灵活地设计其色散特性。

**关键词** 光电子学; 布拉格光纤; 色散; 等效折射率法; 光子晶体光纤

**中图分类号** TN 253 **文献标识码** A

### Study on Dispersion Properties of Bragg Fibers

LIANG Wei-jun, WANG Zhi, REN Guo-bin, LOU Shu-qin, JIANG Zhong-ao

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** Bragg fibers are a kind of fiber formed by multilayer concentric cylinders with period index distribution in the radial. Since Bragg fibers have multilayer geometric characteristics, their dispersion properties are special. The effective index method (EIM) combined with multilayer waveguide theory is introduced to analyze the dispersion properties in detail, and also the scaling properties for Bragg fiber's waveguide dispersion are gotten here. Examples are shown at last to illustrate how to design the chromatic dispersion through adjusting the Bragg fibers' structure parameters based on the relations between the waveguide dispersion and the structure parameters.

**Key words** optoelectronics; Bragg fiber; chromatic dispersion; effective index method; photonic crystal fiber

布拉格光纤最早是由 P. Yeh 和 A. Yariv 等在 1978 年提出来的<sup>[1]</sup>, 这种光纤的径向折射率呈周期性分布。布拉格光纤通常为空心结构, 高折射率芯的布拉格光纤是最近才提出的新型结构<sup>[2]</sup>。

由于径向存在周期性的折射率分布, 布拉格光纤可以近似看作一维光子晶体光纤<sup>[3,4]</sup>。普通光纤仅利用全反射原理来传播光, 布拉格光纤中存在两种导光机制: 布拉格反射(即: 光子带隙)和全反射。通常空气芯的布拉格光纤利用布拉格反射将光限制在空气区域传输, 从而大大地减少了材料的非线性效应和吸收损耗; 而且在弯曲半径很小的情况下, 可以实现低损耗传输。另外, 布拉格光纤具有多层介质结构, 这使得它具有不同于普通单模光纤的色散特性, 利用波导色散和结构参数的关系可以灵活地

设计布拉格光纤的色散特性。

现代光通信系统对于色散提出了各种要求, 而布拉格光纤可以灵活地设计多种色散特性。本文将着重分析高折射率芯布拉格光纤的色散与结构参数的关系, 以及如何设计布拉格光纤的色散特性。利用布拉格光纤的色散具有比例性质<sup>[4~7]</sup>, 可以方便地通过调整结构参数得到所需的色散特性。

### 1 理论分析

布拉格光纤本身为一种多层介质结构, 它可以用多层光波导理论<sup>[8]</sup>分析, 然而随着层数的增多, 计算起来很复杂。利用等效折射率法(EIM)来分析布拉格光纤, 通过合理的等效, 可以减少计算的层数, 从而进行快速、准确的计算。

收稿日期: 2003-07-07; 收到修改稿日期: 2003-10-22

作者简介: 梁伟军(1978—), 男, 湖南省耒阳人, 北京交通大学光波所硕士研究生, 主要从事特种光纤和光电子器件方面的研究。E-mail: lwj@sohu.com

当一种材料的折射率几何分布特征可以和光的波长相比拟或小于光的波长时,可以用一个等效(平均)的均匀介质替代这一介质。考虑一种具有折射率( $n_1, n_2$ )分布的介质材料,其中  $n_1$  介质的几何填充率为  $f$ ,则等效的折射率  $n_e$  通常满足下列关系<sup>[9]</sup>

$$\frac{1}{\sqrt{f/n_1^2 + (1-f)/n_2^2}} \leq n_e \leq \sqrt{f \cdot n_1^2 + (1-f) \cdot n_2^2} \quad (1)$$

计算时,一般取<sup>[8]</sup>

$$n_e = f \cdot n_1 + (1-f) \cdot n_2 \quad (2)$$

对于文中讨论的问题,为了保证计算的精度,只在径向  $r$  较大以后,才作折射率的等效。对于基模,在  $r > 4\Lambda - a$  的区域将周期变化的折射率等效为  $n_e$ ,就可以得到较好的结果。应用等效折射率法处理后得到图 1 所示折射率分布的波导结构,再利用多层光波导理论就可以求解相应的问题了。

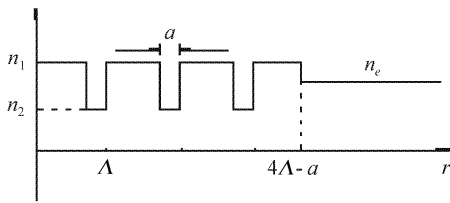


图 1 应用等效折射率法后的折射率分布  
Fig. 1 Distribution of the radial refractive index after using EIM

光纤的色散通常定义为<sup>[8]</sup>

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_{\text{eff}}[\lambda, n_m(\lambda)]}{d\lambda^2} \quad (3)$$

其中  $n_{\text{eff}}$  为导模的模式折射率,即

$$n_{\text{eff}} = \beta[\lambda, n_m(\lambda)]/k_0 \quad (4)$$

$\beta$  为模式的传播常数,  $k_0$  为自由空间的波数,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $n_m$  为材料的折射率,它是波长的函数,在这里为石英的折射率(另一种低折射率的介质为空气),通过 Sellmeier 公式可以求得。从上面的式子可以看到,  $n_{\text{eff}}$  依赖于  $\lambda$  和  $n_m(\lambda)$ , 不考虑材料色散时,即  $n_m(\lambda) = \text{const}$ , 就可以得到光纤的波导色散;把(3)式中的  $n_{\text{eff}}[\lambda, n_m(\lambda)]$  换为  $n_m(\lambda)$ , 就得到了光波导的材料色散  $D_m$  的计算公式。在实际应用中,为了便于色散设计,通常将总的色散  $D(\lambda)$  写成材料色散  $D_m(\lambda)$  与波导色散  $D_w(\lambda)$  的代数和

$$D(\lambda) \approx D_m(\lambda) + D_w(\lambda) \quad (5)$$

选定介质之后,材料色散就不再变化,因此,布拉格光纤色散的设计主要在于波导色散的调节。

在光子晶体光纤的研究中,其波导色散满足下

面的关系<sup>[6,7]</sup>

$$D_w(\lambda; M\Lambda, f) = \frac{1}{M} D_w\left(\frac{\lambda}{M}; \Lambda, f\right) \quad (6)$$

这是色散的比例性质,其中  $\Lambda$  为光子晶体光纤的特征周期。(6)式表明,在填充率保持不变的情况下,  $\Lambda$  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  $\lambda/M$ 。这一性质是由 Maxwell 方程的比例性质 (scaling properties) 得到的<sup>[6]</sup>, 因此,布拉格光纤也应该具有这个性质,根据这个性质,便可以简化布拉格光纤的分析和设计过程。

## 2 布拉格光纤的波导色散

在应用(3)式研究色散时,令  $n_m(\lambda)$  为常数,这样计算出来的就是布拉格光纤的波导色散。图 2(a)是在  $f = 5\%$  时,不同周期  $\Lambda$  的波导色散曲线。

对于各色散曲线的零色散点和色散极小点与周期  $\Lambda$  之间的关系,采用最小二乘法作曲线拟合,由于这些点具有很好的线性关系,因此选用直线拟合。各色散曲线中的零色散点波长位置与周期  $\Lambda$  的拟合曲线为:  $\lambda = 0.0211 + 0.3734\Lambda$ , 如图 2(b) 所示。再分析一下图 2(a) 中各色散曲线中的色散极小点的情况,经过拟合色散极小点的波长与周期  $\Lambda$  满足:  $\lambda = 0.0430 + 0.4447\Lambda$ , 而极小点的色散值与周期  $\Lambda$  满足:  $D = -92.2265 + 12.2509\Lambda$ , 如图 2(c), (d) 所示。从上面的数值分析来看,布拉格光纤的零色散点和色散极小点处的波长和色散值与周期  $\Lambda$  满足很好的线性关系。这是(6)式的必然结果,也从另一方面说明了布拉格光纤是满足色散比例性质的。根据色散的比例性质,结合上面的拟合结果,可以方便地通过调节布拉格光纤的结构参数  $\Lambda$  来调整总的色散曲线。

图 3 给出了在周期  $\Lambda$  取值一定的情况下,不同填充率  $f$  的布拉格光纤的波导色散曲线(由于  $f \propto a/\Lambda$ , 为方便起见,图中以  $a$  标示)。

随着填充率的增大,波导色散曲线向长波长方向移动,并且曲线极小点的色散值更小。值得注意的是:不同填充率  $f$  的波导色散曲线基本平行,这对于设计布拉格光纤的色散特性有着重要意义。

## 3 布拉格光纤色散的数值设计

下面以在 1300 nm 附近设计平坦的色散特性为例,讨论布拉格光纤色散特性设计的一般原理。为说明方便将(5)式写成下面形式

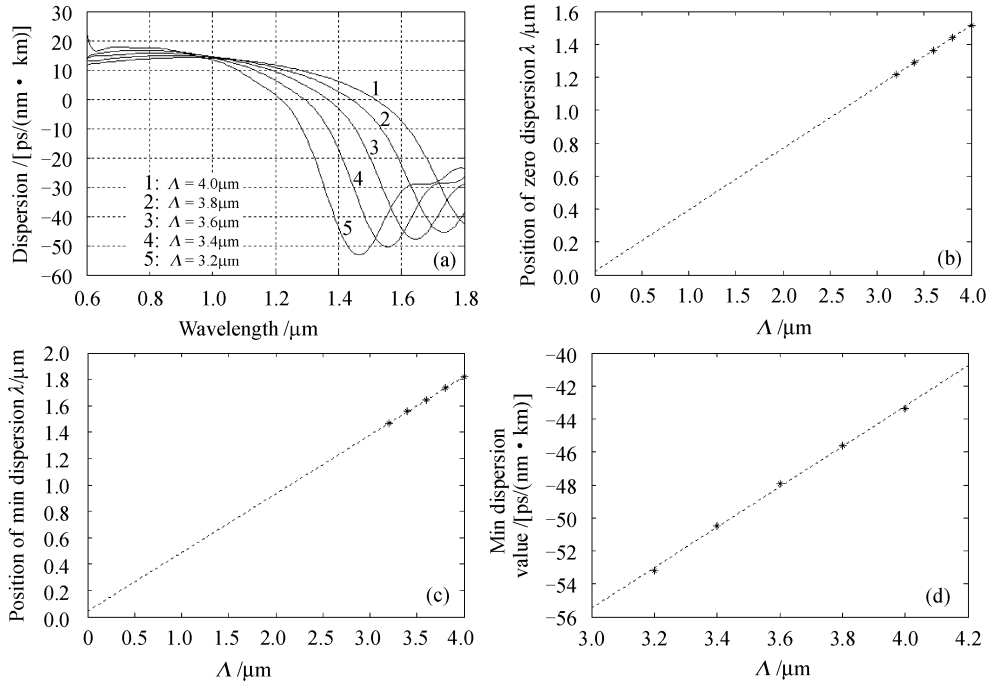


图 2 (a) 填充率  $f = 5\%$  时不同周期  $\Lambda$  情况下的波导色散; (b) 色散零点波长与周期的关系及其拟合曲线; (c) 色散极小点波长与周期的关系及其拟合曲线; (d) 色散极小值与周期的关系及其拟合曲线

Fig. 2 (a) Waveguide dispersion with fixed filling fraction ( $f = 5\%$ ) but different period ( $\Lambda$ ) in radial; (b) The position of zero dispersion versus period ( $\Lambda$ ) and their fitting curve; (c) Position of min dispersion versus period ( $\Lambda$ ) and their fitting curve; (d) The value of min dispersion versus period ( $\Lambda$ ) and their fitting curve

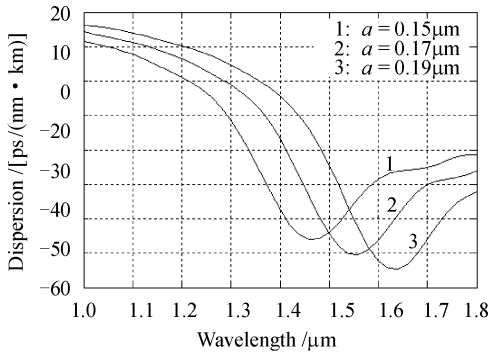


图 3 周期固定 ( $\Lambda = 3.4 \mu\text{m}$ ), 不同介质填充率情况下的波导色散

Fig. 3 Waveguide dispersion curves with fixed period ( $\Lambda = 3.4 \mu\text{m}$ ) but different filling fraction

$$D(\lambda) \approx D_w(\lambda) - [-D_m(\lambda)] \quad (7)$$

在图 4(a)中,计算了几条不同周期  $\Lambda$  的布拉格光纤的波导色散曲线,虚线为负的材料色散曲线。从(7)式可以看出,在  $\Lambda = 3.4 \mu\text{m}$  和  $3.6 \mu\text{m}$  时,总色散在  $1300 \text{ nm}$  两侧均有一色散零点,而  $\Lambda = 3.2 \mu\text{m}$  时却没有;  $\Lambda = 3.4 \mu\text{m}$  时,总的色散在  $1300 \text{ nm}$  附近会比较平坦,而且色散值也不大,如图 4(b)所

示,这里  $f = 5\%$  ( $a = 0.17 \mu\text{m}$ )。为了将  $1300 \text{ nm}$  的色散降低到 0,可以固定周期 ( $\Lambda = 3.4 \mu\text{m}$ ),而根据波导色散随填充率的变化规律对波导色散进行调整。在图 4(c)中,当  $f = 4.88\%$  ( $a = 0.166 \mu\text{m}$ ) 时,由(7)式可以判断这时总的色散在  $1300 \text{ nm}$  处已经很小,于是可以认为在  $\Lambda = 3.4 \mu\text{m}$ ,  $f = 4.88\%$  ( $a = 0.166 \mu\text{m}$ ) 时已经达到了设计要求,总的色散曲线如图 4(d)所示。

在图 4(a)中,当  $\Lambda = 3.6 \mu\text{m}$  时,可以在  $1500 \text{ nm}$  处得到零色散点,从而实现零色散位移,根据布拉格光纤波导色散的比例性质,可以通过改变  $\Lambda$  的取值将零色散点移到  $1300 \sim 1600 \text{ nm}$  间的任何位置上。由上面的例子有:利用波导色散与结构参数间的关系,通过调节结构参数 ( $\Lambda, f$ ) 可以很灵活地设计所需的布拉格光纤的色散特性。

这里总结一下布拉格光纤色散特性设计的一般原理:为了在一定波长范围内设计所需的色散特性,首先,改变布拉格光纤的周期  $\Lambda$  得到该波长范围内的波导色散曲线,利用式(7)对照光纤的材料色散以确定该波导色散曲线是否可能得到相应的色散特性。此过程中利用波导色散的比例性质可以大体预

测  $\Delta$  的取值;当确认某一周期  $\Delta$  下的波导色散曲线通过式(7)可以得到所需的色散特性,固定  $\Delta$ , 调整

填充率对其进行更优化的设计以满足要求。

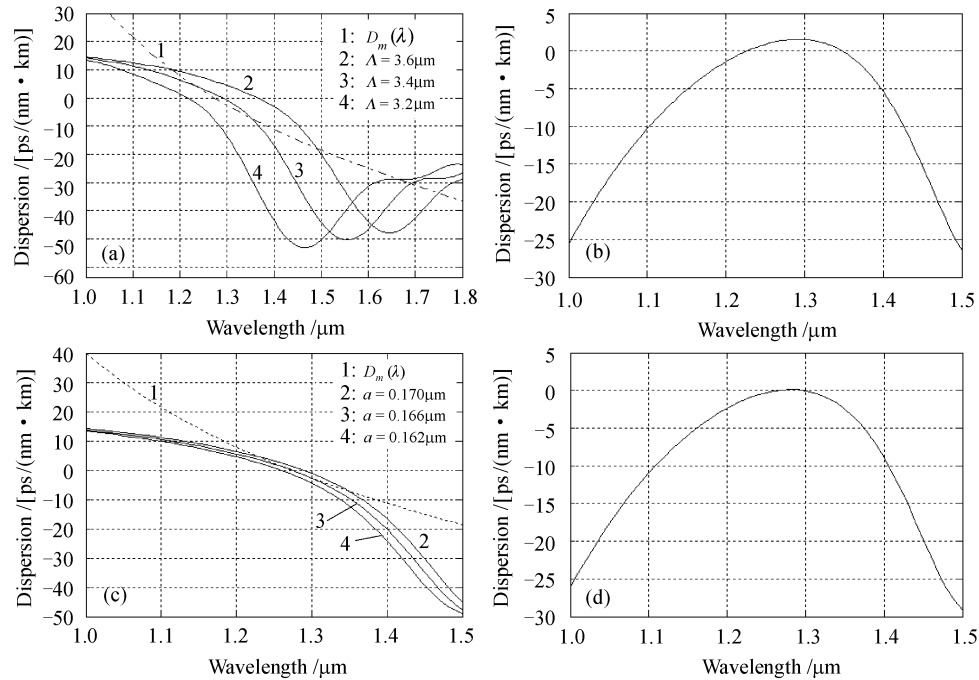


图 4 (a) 负的材料色散曲线与固定填充率 ( $f=5\%$ ) 不同周期下波导色散曲线; (b) 周期  $\Lambda=3.4 \mu\text{m}$ , 填充率  $f=5\%$  ( $a=0.17 \mu\text{m}$ ) 时的总色散曲线; (c) 负的材料色散曲线与固定周期 ( $\Lambda=3.4 \mu\text{m}$ ) 不同填充率下的波导色散; (d) 周期  $\Lambda=3.4 \mu\text{m}$ , 填充率  $f=4.88\%$  ( $a=0.166 \mu\text{m}$ ) 时的总色散

Fig. 4 (a) Negative material dispersion and waveguide dispersion with fixed filling fraction ( $f=5\%$ ) and different period; (b) Total dispersion with  $\Lambda=3.4 \mu\text{m}$ ,  $f=5\%$  ( $a=0.17 \mu\text{m}$ ); (c) Negative material dispersion and waveguide dispersion with fixed period ( $\Lambda=3.4 \mu\text{m}$ ) and different filling fraction; (d) Total dispersion with  $\Lambda=3.4 \mu\text{m}$ ,  $f=4.88\%$  ( $a=0.166 \mu\text{m}$ )

## 4 结 论

引入等效折射率法结合多层光波导理论,对一种新型布拉格光纤——高折射率芯布拉格光纤的色散特性进行了分析。等效折射率法减少了计算时间和复杂性,同时保证了一定的计算精度。布拉格光纤在径向具有周期性的几何结构,具有特殊的波导色散特性,从而为设计布拉格光纤的色散特性提供了可能性。布拉格光纤的波导色散满足比例性质,讨论了色散与结构参数间的关系,通过改变结构参数 ( $\Delta, f$ ) 可以灵活设计出所需的色散特性。

### 参 考 文 献

- 1 P. Yeh, A. Yariv, E. Marom. Theory of Bragg fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**:1196~1201
- 2 Juan A. Monsoriu, Enrique Silvestre, Albert Ferrando *et al.*. High-index-core Bragg fibers: dispersion properties [J]. *Opt. Express*, 2003, **16**(12):1400~1405
- 3 Philip Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **266**: 358~362
- 4 Song Jun-feng, Chang! Yu-chun, Wang Hai-hao *et al.*. Transmission characteristic of photonic crystal waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):711~713  
宋俊峰,常玉春,王海嵩等. 光子晶体光波导传输特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):711~713
- 5 John D. Joannopoulos, Robert D. Meade, Joshua N. Winn. *Photonic Crystals Molding the Flow of Light* [M]. Princeton New Jersey, USA, 1995. 3~21
- 6 Albert Ferrando, Enrique Silvestre, Pedro Andres *et al.*. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13):687~697
- 7 Ren Guobin, Lou Shuqin, Wang Zhi *et al.*. Study on dispersion properties of photonic crystal fiber by effective-index model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):319~323  
任国斌,娄淑琴,王智等. 等效折射率模型研究光子晶体光纤的色散特性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3):319~323
- 8 Wu Chongqing. *Optical Waveguide Theory* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000  
吴重庆. 光波导理论[M]. 北京:清华大学出版社,2000
- 9 Alexander Argyros, Ian M. Bassett, Martijn A. Eijkelenberg *et al.*. Ring structures in microstructured polymer optical fibres [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13):813~820