

内包层为负折射率介质双包层光纤的传输特性的研究

侯尚林¹ 张书军¹ 黎锁平¹ 刘延君¹ 徐永钊²

(¹ 兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050
² 东莞理工学院电子工程学院, 广东 东莞 523808)

摘要 采用全矢量的方法,数值求解了内包层为左手材料,纤芯和外包层为常规材料的 W 型弱导双包层光纤的特征方程,分析了其模式分布、色散和时延特性。结果表明内包层为左手材料的双包层光纤具有许多不同于常规光纤的反常特性:单模传输模式只存在于特定的频率范围内;随着内包层负折射率材料厚度的增加,同一模式同一频率下出现不同的传播常数;内包层厚度对单模的色散和群时延影响巨大,通过增大内包层厚度,可以达到 -158000 ps/(nm·km) 大负色散及极大的群时延。这些结果为设计新型色散补偿光纤及新型光纤器件提供了理论基础。

关键词 光纤光学;左手材料;光纤;波导色散;群时延

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0506004

Investigation on Transmission Characteristics of Doubly Cladding Fiber with an Inner Cladding Made of Negative Refractive-Index Material

Hou Shanglin¹ Zhang Shujun¹ Li Suoping¹ Liu Yanjun¹ Xu Yongzhao²

(¹ School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China
² Institute of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology,
Dongguan, Guangdong 523808, China)

Abstract The characteristic equation of a doubly cladding fiber with an inner cladding made of negative refractive index material is presented by full vectorial mode method. Its mode distribution, dispersion and time delay are demonstrated. The results indicate that this kind of fiber has some abnormal properties, such as the single mode existing in certain normal frequency. Along with increasing diameter of inner cladding, different propagation constants exist in the same mode and normalized frequency. The diameter of inner cladding has great influence on the dispersion and group time delay. The dispersion can reach -158000 ps/(nm·km) and group time delay can become very large by increasing the diameter of the inner cladding. These results provide theoretical basis for designing novel dispersion compensating fiber and photonic devices.

Key words fiber optics; left-handed material (LHM); fiber; waveguide dispersion; group time delay

OCIS codes 060.2310; 060.2430; 160.3918

1 引 言

负折射率介质材料作为一种新型的人工电磁材料,近几年来引起了人们极大的兴趣。由于电磁波在这种材料中传播时,电场,磁场和波矢遵循左手定则,所以负折射率材料又被称为左手材料(LHM)^[1]。左手材料的反常电磁特性^[1],如负折

射、反常多普勒效应和反常切伦柯夫辐射等,展现了它在光与电磁波领域潜在的重要应用价值,如高分辨率透镜成像^[2,3]、新型共振腔^[4]以及反常光子隧道^[5,6]等。

目前对左手材料光纤传输特性研究主要集中在平板波导及单包层光纤传输模式上,如蒋美萍等^[7]

收稿日期: 2010-11-03; **收到修改稿日期**: 2011-01-26

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1010RJZA036)、兰州理工大学博士启动基金和广东省自然科学基金(10451170003004948)资助课题。

作者简介: 侯尚林(1970—),男,博士,教授,主要从事新型光纤与光传感技术、光子晶体光纤技术和光纤光栅技术等方面的研究。E-mail: houshanglin@gmail.com(中国光学学会会员号: S040111677)

研究了无色散左手材料作为芯层的对称三层平板波导中 TE 波的传输特性;张静等^[8]研究了一个芯子层是左手材料,其他三层由传统材料构成的四层平板光波导系统;何金龙^[9]提出了左手材料单包层光纤的单模传输区域;沈陆发等^[10]分析了左手材料单包层光纤的功率分布及在考虑特定模型的材料色散情况下有效折射率随频率变化的色散曲线特性;Cory 等^[11]研究了左手材料光纤的表面波特性和

双包层光纤的参数较多,可以更加灵活地调整参数来获得更好的传输特性,所以多包层光纤是近年来的一个研究热点,如对 W 型双包层群速度及截止频率的研究^[12],对双包层光纤激光器的研究^[13,14]等。在单包层左手材料光纤研究的基础上,Novitskiĭ 等^[15]在考虑特定模型的材料色散情况下分析了三包层光纤随着结构参数变化低阶模式色散特性;沈陆发等^[16,17]对左手材料双包层光纤的个别低阶传输模式通过与常规材料双包层光纤比较得到了一些相反的色散特性,但这些研究均没指出单模传输区域,而单模传输在实际光纤通信中更具有实际意义。

本文采用全矢量的方法推导出内包层为左手材料,纤芯和外包层为常规材料的双包层 W 型弱导光纤的特征方程,利用数值解法模拟了在一定归一化频率范围内所有模式的归一化有效折射率相对归一化频率的曲线,不同模式的截止频率随内包层厚度变化曲线,并指出了单模存在的区域及该模式在不同内包层厚度情况下归一化有效折射率与归一化频率曲线,且进一步对单模色散,群时延进行了分析,模拟结果显示可以得到大负色散及极大的群时延。研究结果为设计新型色散补偿光纤及新型光纤器件提供了理论基础。

2 理论分析

2.1 特征方程的推导

内包层为左手材料,纤芯和外包层均为常规材

料构成的光纤 W 型结构光纤的横截面折射率分布如图 1 所示。设内包层介电常数 ϵ_2 ,磁导率 μ_2 和折射率 n_2 均小于零。纤芯和外包层均为常规材料组成,它们的介电常数 ϵ_1, ϵ_3 ,磁导率 μ_1, μ_3 和折射率 n_1, n_3 均大于零,其下标“1”,“2”,“3”分别对应纤芯、内包层、外包层。基于问题的方便分析,假设 $\mu_1 = -\mu_2 = \mu_3 = \mu_0$;纤芯的半径和内包层的外半径分别为 a 和 b ,外包层延伸至无穷远。

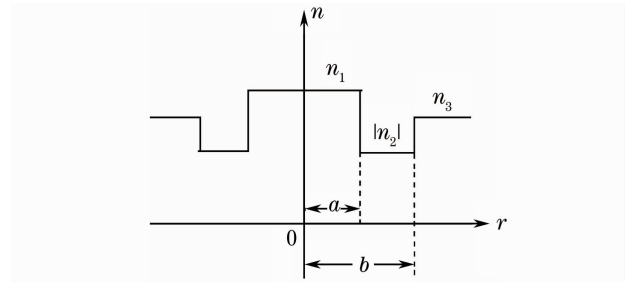


图 1 内包层为左手材料的双包层光纤横截面折射率分布

Fig. 1 Refractive index profile of double-clad fiber with LHM inner cladding

柱坐标系中模式场的纵向分量(沿柱轴方向设为 Z 轴方向)满足

$$\nabla_t^2 \begin{Bmatrix} E_z(r, \theta) \\ H_z(r, \theta) \end{Bmatrix} + [\omega^2 \epsilon(r) \mu(r) - \beta^2] \begin{Bmatrix} E_z(r, \theta) \\ H_z(r, \theta) \end{Bmatrix} = 0, \quad (1)$$

式中 $\nabla_t^2 = \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{r^2 \partial \theta^2} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} + \frac{\partial^2}{r^2 \partial \theta^2}$, ω 为圆频率, β 为光纤模式的传播常数。介电常数

$$\epsilon(r) = \begin{cases} \epsilon_1 & r < a \\ \epsilon_2 & a < r < b, \\ \epsilon_3 & r > b \end{cases}$$

磁导率

$$\mu(r) = \begin{cases} \mu_1 & r < a \\ \mu_2 & a < r < b, \\ \mu_3 & r > b \end{cases}$$

分离变量解(1)式,可得光纤内不同区域内场分量为

$$E_z = \begin{cases} A J_m \left(\frac{U}{a} r \right) \cos m \theta & r < a \\ \left[B I_m \left(\frac{W_1}{a} r \right) + C K_m \left(\frac{W_1}{a} r \right) \right] \cos m \theta, & a < r < b \\ D K_m \left(\frac{W}{a} r \right) \cos m \theta & r > b \end{cases} \quad (2)$$

$$H_z = \begin{cases} A_1 J_m \left(\frac{U}{a} r \right) \sin m \theta & r < a \\ \left[B_1 I_m \left(\frac{W_1}{a} r \right) + C_1 K_m \left(\frac{W_1}{a} r \right) \right] \sin m \theta, & a < r < b \\ D_1 K_m \left(\frac{W}{a} r \right) \sin m \theta & r > b \end{cases} \quad (3)$$

式中 $A, B, C, D, A_1, B_1, C_1, D_1$ 为待定系数, J_m 为第一类整数 m 阶贝塞尔函数, K_m 为变型第二类整数 m 阶贝塞尔函数, I_m 为修正 m 阶贝塞尔函数, 横向归一化相位常数 $U^2 = (\omega^2 \mu_1 \epsilon_1 - \beta^2) a^2$, 横向归一化衰减常数 $W_1^2 = (\beta^2 - \omega^2 \mu_2 \epsilon_2) a^2$ 和 $W^2 = (\beta^2 - \omega^2 \mu_3 \epsilon_3) a^2$ 。

定义光学参数纤芯与内包层和纤芯与外包层相对折射率分别为

$$\Delta_1 = \frac{n_1 - |n_2|}{n_1}, \quad \Delta_2 = \frac{n_1 - n_3}{n_1}. \quad (4)$$

归一化有效折射率为

$$B = \frac{n_{\text{eff}}^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_3^2} = 1 - \frac{U^2}{V^2}, \quad (5)$$

式中有有效折射率

$$n_{\text{eff}} = \beta / k_0,$$

归一化频率

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_3^2}.$$

根据切向场分量在 $r=a$ 和 $r=b$ 的边界上的连续性要求, 且考虑到弱导情况下 $n_1 \approx |n_2| \approx n_3$, 可以得到特征方程

$$\begin{vmatrix} QI_{1m} & QK_{1m} & I_{1m}(F-M) & K_{1m}(F+N) \\ RI_{2m} & RK_{2m} & I_{2m}(-G-T) & K_{2m}(-X-T) \\ I_{1m}(F-M) & K_{1m}(F-N) & QI_{1m} & QK_{1m} \\ I_{2m}(-G-T) & K_{2m}(-X-T) & RI_{2m} & RK_{2m} \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

$$\text{式中 } F = \frac{J'_m(U)}{UJ_m(U)}, \quad M = \frac{I'_m(W_1)}{W_1 I_m(W_1)}, \quad N = \frac{K'_m(W_1)}{W_1 K_m(W_1)}, \quad X = \frac{K'_m(W_1 s)}{W_1 K_m(W_1 s)}, \quad Q = m \left(\frac{1}{U^2} + \frac{1}{W_1^2} \right),$$

$$R = \left(\frac{1}{W_1^2} - \frac{1}{W^2} \right) \frac{m}{s}, \quad G = \frac{I'_m(W_1 s)}{W_1 I_m(W_1 s)}, \quad T = \frac{K'_m(W_s)}{W K_m(W_s)}, \quad I_{1m} = I_m(W_1), \quad K_{1m} = K_m(W_1),$$

$$I_{2m} = I_m(W_1 s), \quad K_{2m} = K_m(W_1 s), \quad s = \frac{b}{a}.$$

2.2 色散和群时延

色散和群时延的表达式可以表示为^[18]

$$D \approx -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_3}{d\lambda^2} \left[1 + \Delta \frac{d(BV)}{dV} \right] - \frac{N_3}{c} \left(\frac{\Delta}{\lambda} \right) V \frac{d^2(BV)}{dV^2}, \quad (7)$$

$$\tau = \frac{N_3}{c} \left[1 + \Delta \frac{d(BV)}{dV} \right]. \quad (8)$$

在弱导情况下 $\Delta \approx \frac{n_1 - n_3}{n_3}$, N_3 为外包层的群折射率, 通常 $N_3 = n_3$ 。(7)式中第一项表示材料色散, 第二项表示波导色散。

简单起见忽略材料色散的影响, 只求波导色散。欲求色散和群时延, 必须求得 $d(BV)/dV$ 和 $V d^2(BV)/dV^2$ 。由(5)式可得

$$\frac{d(BV)}{dV} = 1 + \left(\frac{U}{V} \right)^2 \left(1 - 2 \frac{V}{U} \frac{dU}{dV} \right), \quad (9)$$

$$V \frac{d^2(BV)}{dV^2} = -2 \left(\frac{dU}{dV} - \frac{U}{V} \right)^2 - 2U \frac{d^2 U}{dV^2}. \quad (10)$$

而特征(2)式可转化为关于 U, V 的方程 $F(U, V) = 0$, 其中 U 是 V 的函数。这样可以采用隐函数的求导方法进行求得 dU/dV 和 $d^2 U/dV^2$, 即

$$\frac{dU}{dV} = -\frac{F_V}{F_U}, \quad (11)$$

$$\frac{d^2 U}{dV^2} = \left[- \left(F_{UU} \frac{dU}{dV} + F_{UV} - F_{VU} \right) \frac{dU}{dV} - F_{VV} \right] / F_U, \quad (12)$$

式中 $F_V, F_U, F_{UU}, F_{VV}, F_{UV}$ 分别为 $F(U, V)$ 对 U, V 的一阶和二阶导数 $\partial F/\partial V, \partial F/\partial U, \partial^2 F/\partial U^2, \partial^2 F/\partial V^2, \partial^2 F/\partial U \partial V$ 。

3 数值分析

3.1 模式分析

在负折射光纤中仍采用普通光纤的分类方法。 $m=0$ 时, 存在 TE($E_z=0$)模和 TM($H_z=0$), $m>0$ 时则存在 HE模和 EH模, 这两个模式主要区别在

于 E_z/H_z 的符号不同^[19]。图 2 模拟了各个导模归一化有效折射率在包层厚度不同的情况下随归一化频率变化的 $B-V$ 色散曲线,可以看出众多不同于常规光纤之处。在折射率不变的情况下,图 2(a)~(d)中 s 分别取 1.0, 1.4, 1.6, 1.8。可以观察到当 s 取 1.0 时所得 $B-V$ 曲线和单包层常规材料光纤完全相同^[18],即等价于常规材料单包层光纤;当内包层厚度较小值时,几个低阶模式的 $B-V$ 曲线类似于常规光纤,但随着内包层厚度的增加,各个导模色散曲线逐渐变陡,而且截止频率变小,也就是截止频率左移(HE_{11} 模式的下截止频率仍为零除外);另外,重点考察在两条虚线及其之间分布的众多高阶模式

HE_{n1} 模(n 的取值大小及模式分布的多少取决于内包层厚度),低频的虚线可以看成接近零,高频的虚线接近 HE_{n1} 曲线。出于图形清晰简洁考虑,虚线间的一些高阶模式 $B-V$ 曲线并未画出。每个导模存在于较窄的频段内,这种导模色散特性与普通光栅波导^[20] 特性相似,尽管 HE_{11} 模式的截止频率仍然为零,但是由于这些高阶模式 $B-V$ 曲线斜率较大,从而导致和 HE_{11} , HE_{21} 交叉分布,破坏了 HE_{11} 模式如同常规材料光纤那样单模传输条件,随着 s 增大,可传导的高阶模式 HE_{n1} 逐渐减少,而且分布区域变窄向左靠近。当 s 达到 1.8 时,更高阶的 HE_{n1} 模式消失,仅有 HE_{11} , HE_{21} 模式存在。

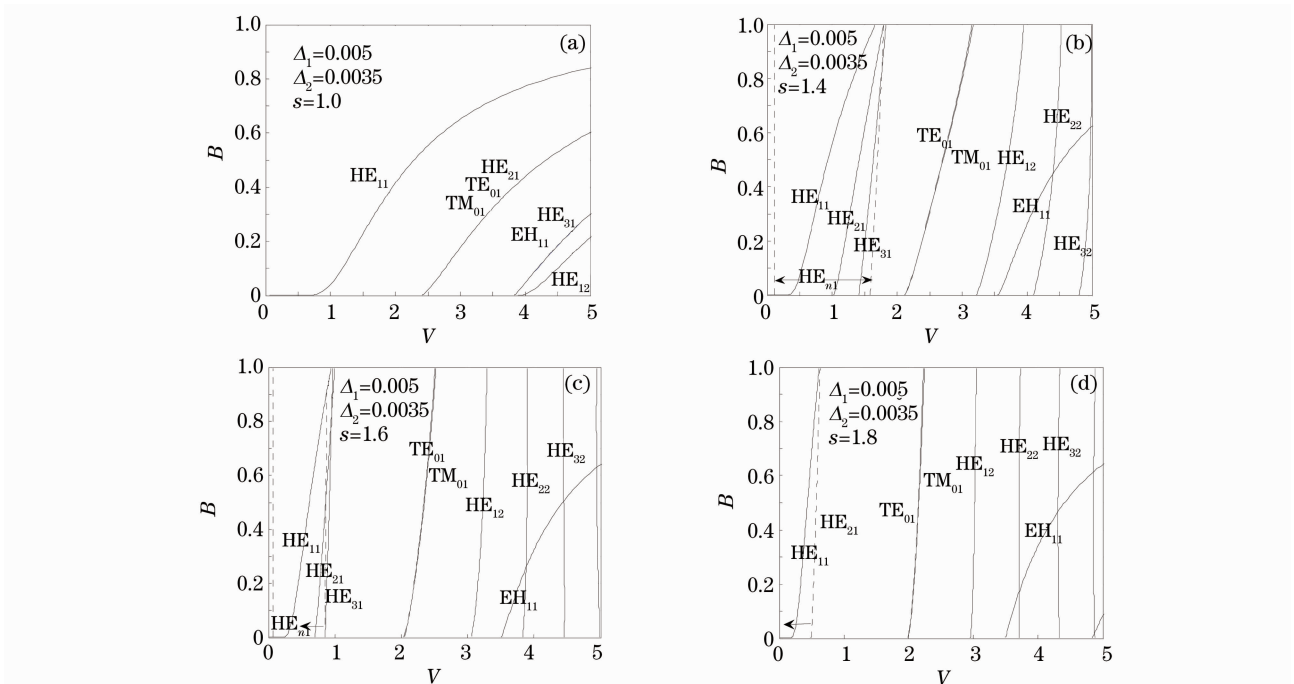


图 2 s 不同时 LHM 光纤导模的 $B-V$ 色散曲线

Fig. 2 $B-V$ dispersion curves of the guide modes in LHM fiber for various s

由于传统单模传输条件的破坏,有必要探索新的单模传输区域。当 s 取 1.4 时可以看到 HE_{12} 模式接近截止处出现了单模传输区域;当 $s=1.6$ 时开始出现整个模式的单模传输,并且 $B-V$ 色散曲线斜率很大,由此可知,当 $s > 1.6$ 时, HE_{12} 模式不仅能够实现单模传输,而且它们的传播常数对 V 值变化很敏感。

几个较低阶模式截止频率 V_c 随内包层厚度变化曲线如图 3 所示,可知每个模式的截止频率随 s 的增大而逐渐减小,当内包层厚度取值较小时对其影响较大,当 s 大于某一值(不同模式其值不同)时,包层厚度的变化对截止频率影响很小,甚至截止频

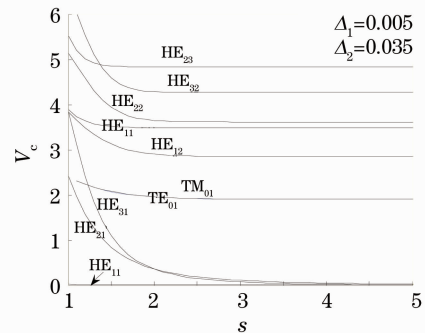


图 3 几个低阶模式的截止频率随 s 的变化

Fig. 3 Cutoff frequency for several lower modes versus various s

率趋近于某一常数, HE_{m1} ($n \geq 2$) 模式截止频率随内包层厚度增加逐渐趋近于零, 而 HE_{11} 模式的截止频率仍然为零, 其截止频率随内包层厚度变化曲线与横轴重合。

由于 HE_{12} 单模传输区域较大因而具有很大的实际意义, 因此有必要对 HE_{12} 模式进行更加深入的分析。从图 4 可以看到, 负折射率材料厚度增加量与曲线的间隔不成线性关系, 随着负折射率材料厚度的增加, $B-V$ 色散曲线的间隔逐渐减小, 并且当 $s=2.2$ 时, 在接近截止状态处出现了两个传播常数同一个模式的不利特性, 可见要实现左手材料光纤类似于普通光纤在传统光纤通讯领域内应用, 可以限定内包层厚度在一定范围即可。另外, 同一频率下同一模式的两个传播常数特性为将来新型光纤及光纤器件的设计打下了理论基础。

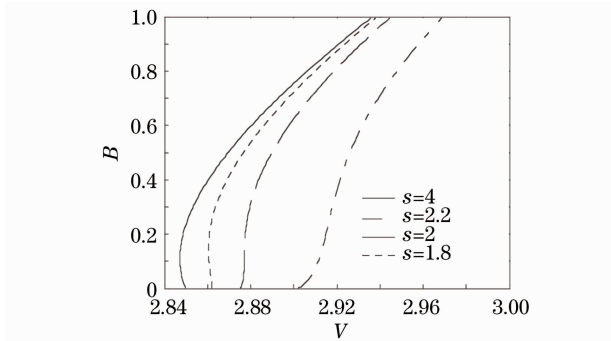


图 4 内包层厚度 s 取不同值时, HE_{12} 模归一化有效折射率随归一化频率变化曲线

Fig. 4 $B-V$ dispersion curves of guided modes HE_{12} for various s

3.2 群时延和色散

群时延曲线如图 5 所示, 在 $\Delta_1 = 0.005$, $\Delta_2 = 0.0035$ 弱导情况下, 随着内包层厚度增加, 在纤芯半径相应减小的情况下, 可以在 $1.55 \mu\text{m}$ 传输窗口及附近波长范围内获得更大的群时延, 即较小的群速度, 但在其它波长范围内却相反, 并且随着内包层厚度的增加, 群时延对波长的变化更加敏锐, 在群时延峰值右侧随着波长增加群时延减小更快, 而在群时延峰值左侧随着波长减小群时延减小更快。通过调节光纤结构可以在光纤传输窗口获得较小的群速度, 可见左手材料光纤是一种慢波结构。

如图 6 所示, 在 $\Delta_1 = 0.005$, $\Delta_2 = 0.0035$ 弱导情况下, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处, 当 $s=1.7$, $a=6.20 \mu\text{m}$ 时, 波导色散 $D = -24000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$; $s=1.8$, $a=6.00 \mu\text{m}$ 时 $D = -58000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$; $s=1.9$, $a=5.88 \mu\text{m}$ 时, 色散甚至可以达到 $-158000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 几乎达到目前所

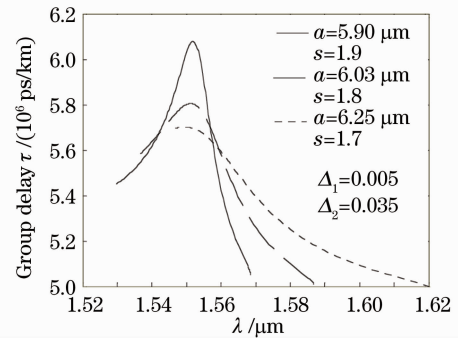


图 5 内包层厚度 s 取不同值时, HE_{12} 模式群时延随波长的变化曲线

Fig. 5 Group time delay versus λ of guided mode HE_{12} with various s

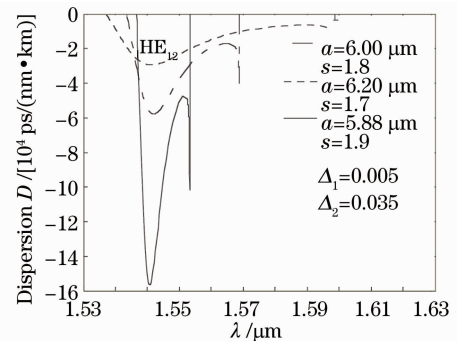


图 6 内包层厚度 s 取不同值时, HE_{12} 模式波导色散随波长的变化曲线

Fig. 6 $D-\lambda$ curves of guided mode HE_{12} with various s

报道的大负色散光纤的数十倍。色散随着厚度的增加峰值急剧增大, 但传输带宽也相应减小。同时, 并非所有波长范围内随着内包层厚度增加波导色散都增大, 在传输波长较短时, 随着内包层厚度增加, 波导色散却减小。要想色散峰值出现在 $1.55 \mu\text{m}$ 传输窗口, 纤芯半径也相应减小。模拟结果显示可以在保证较大的纤芯半径情况下, 实现满足不同带宽需求的大负色散, 从而降低了制作工艺的难度, 为研发性能更好的新型色散补偿光纤提供了理论基础。

4 结 论

根据麦克斯韦方程组, 采用全矢量分析方法, 对内包层为 LHM, 纤芯和外包层都为右手材料的 W 型双层弱导光纤进行了研究, 得到精确的震荡模式的特征方程。分析表明 LHM 光纤具有许多不同于常规光纤的反常特性。较低阶模式 $B-V$ 曲线随着内包层厚度增加逐渐变陡, 各个模式截止频率逐渐变小, 所占带宽也相应减小; 单模传输模式并不是常规光纤的 HE_{11} 模式; 并对单模传输条件进行分析, 发现单模传输模式只存在于特定的参数取值范

围内;单模 HE_{12} 模式随着内包层厚度的增加出现同一模式同一频率下两个不同的传播常数的特性,并且传播常数对频率变化很敏感;进一步对单模模式的色散和群时延进行比较深入的分析,发现内包层厚度对其影响巨大,通过增大内包层厚度,可以达到 $-158000 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 大负色散及极大的群时延,为设计新型色散补偿光纤和新型光器件提供了理论基础。

参 考 文 献

- 1 V. G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4): 509~514
- 2 J. B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966~3969
- 3 Yan Ligong, Gu Peifu, Huang Biqin. Study of finite aperture effect on lens made of LHM by geometrical optics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1396~1398
杨立功, 顾培夫, 黄弼勤. 从几何光学研究负折射透镜的有限尺寸效应[J]. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1396~1398
- 4 N. Engheta. An idea for thin, subwavelength cavity resonators using metamaterials with negative permittivity and permeability [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation*, 2002, **1**(1): 10~13
- 5 Z. M. Zhang, C. J. Fu. Unusual photon tunneling in the presence of a layer with a negative refractive index [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(6): 1097~1099
- 6 Yang Ligong, Gu Peifu, Huang Biqin. Optical properties of a Bragg mirror containing dielectric layers with negative refractive index [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 200~203
杨立功, 顾培夫, 黄弼勤. 含有负折射介质层的布拉格镜的光学特性研究 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 200~203
- 7 Jiang Meiping, Chen Xianfeng, Ni Chongwen *et al.*. Propagation properties of a left-handed material slab waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 193~197
蒋美萍, 陈宪峰, 倪重文等. 左手材料平板波导的传输特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 193~197
- 8 Zhang Jing, He Ying, Li Chunfang *et al.*. Guided modes in a four-layer slab waveguide with the LHM core [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2673~2680
张 静, 何 英, 李春芳等. 包含左手材料的四层平板波导中的光导模[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2673~2680
- 9 He Jinlong, Shen Linfang, He Sailin *et al.*. Abnormal characteristics of guided modes in a fiber formed by a medium with negative-refractive index [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1327~1329
何金龙, 沈林放, 何赛灵等. 负折射率介质光纤的导模异常特性分析 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1327~1329
- 10 F. S. Lu, H. W. Zi. Guide modes in fiber with left-handed materials [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009, **26**(4): 754~759
- 11 H. Cory, T. Blum. Surface-wave propagation along a metamaterial cylinder guide [J]. *Microwave & Opt. Technol. Lett.*, 2005, **44**(1): 31~35
- 12 S. Kawakami, S. Nishida. Perturbation theory of a doubly clad optical fiber with a low-index inner cladding [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **11**(4): 130~138
- 13 Wang Xiaochao, Fan Wei, Chang Liping *et al.*. 100 ps pulse amplification in ytterbium-doped double-clad fiber amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1379~1384
汪小超, 范 薇, 常丽萍等. 百皮秒脉冲在掺镱双包层光纤放大器中的放大[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1379~1384
- 14 Fan Yuanyuan, Ye Chenchun, Cai Zhiping *et al.*. Broad-band tunable Yb^{3+} -doped double-clad fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 96~99
范元媛, 叶陈春, 蔡志平等. 宽带可调谐掺镱双包层光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 96~99
- 15 A. V. Novitskii, L. M. Barkovskii. Modes in three-layer fibers with negative refractive index [J]. *J. Opt. Technol.*, 2006, **73**(11): 749~753
- 16 L. F. Shen, Z. H. Wang. The propagation characteristics in a doubly clad optical fiber including left-handed materials [J]. *J. Electromagn. Wave and Appl.*, 2008, **22**(7): 895~904
- 17 L. F. Shen, Z. H. Wang. Approximate solution in doubly clad optical fiber including left-handed material [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1847~1852.
- 18 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
- 19 E. Snitzer. Cylindrical dielectric waveguide modes [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1961, **51**(5): 491~498
- 20 A. Sharon, D. Rosenblatt, A. A. Friesem. Narrow spectral bandwidths with grating-waveguide structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(27): 4154~4157