

各向异性左手材料光纤的传输特性

沈陆发¹ 江丽萍¹ 王子华²

(¹湖州师范学院理学院, 浙江 湖州 313000
²上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

摘要 对纤芯为各向异性左手材料,包层为普通材料的光纤进行了相关研究。首先,从 Maxwell 方程组出发,得到了各向异性左手材料光纤振荡模的色散方程。根据这些色散方程及其当前左手材料实际结构,同时考虑实际左手材料的频率色散特性,画出了 TE、TM、HE 和 EH 振荡模的色散曲线。通过对这些色散曲线的比较、分析,得到了一些振荡模的色散特性。比如:随着频率的增加,有效折射率也单调增加;TM 振荡模有一定的群速,而 EH 振荡模有 2 个不同的群速,其突变频率约为 4.46 GHz。此外,随着模阶数的增加,色散曲线向左上方移动;随着纤芯半径的增加,色散曲线向右下方移动,HE₁₁ 振荡模的工作频域随着纤芯半径的增加而变宽。总之,这些都是有趣的色散特性,为进一步设计高性能光纤指明了方向。

关键词 光纤光学;左手材料;振荡模;频率色散

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0905007

Propagation Properties of Guided Modes in an Optical Fiber with Anisotropy Metamaterials

Shen Lufa¹ Jiang Liping¹ Wang Zihua

(¹Science College, Huzhou Teachers College, Huzhou, Zhejiang 313000, China
²Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract An optical fiber with anisotropy metamaterials in the core and a common medium in the cladding is investigated. Firstly, four dispersion equations for the oscillating guided modes based on Maxwell's equations are obtained. From the dispersion equations, and considering frequency dispersion of practical metamaterials, some dispersion curves for TE, TM, HE and EH modes are plotted. Some new dispersion properties of the oscillating guided modes are gotten by analyzing and comparing these curves, such as: the effective-refractive index increases individual with the frequency; as frequency adds, TM oscillating guided modes have a fixed velocity and EH modes always have two different group velocities and mutation frequency is 4.46 GHz. Besides, as mode number increases, the dispersive curves move along up and left direction; however, as the core radius increases, the curves turn along down and right direction and the bandwidth of HE₁₁ oscillating guided mode becomes widely. In all words, these are interesting dispersion properties and may make a direction to design high quality fiber.

Key words fiber optics; metamaterial; oscillating guided modes; frequency dispersion

OCIS codes 230.2285; 230.7400; 230.7370; 230.7390

1 引言

2000 年,Smith 等^[1]在微波波段成功地观察到负折射现象,从此,关于 Veselago 负折射率的预

言^[2],由于其奇异的电磁特性,使学者们产生了极大的兴趣。随即对左手材料在各领域的应用展开了相关研究,当然也包括波导及其相关器件。Xiao

收稿日期: 2011-03-21; **收到修改稿日期**: 2011-06-14

基金项目: 上海市科委重点实验室项目(08DZ2231100)和湖州师范学院理学院项目(GJC10006)资助课题。

作者简介: 沈陆发(1963—),男,博士后,副教授,主要从事左手材料光波导方面的研究。

E-mail: shenlufa0410@sina.com(中国光学学会会员号:S040111676)

等^[3~11]对含左手材料平面波导进行了相关的研究,发现该类波导的一些模在截止频率附近出现双值兼并的色散特性及慢光、甚至零光速等现象。Kim等^[12~22]对含左手材料光纤进行了理论和实验方面的相关报道,并对含左手材料柱形光波导的表面模进行了研究,找到了某些表面模新的色散特性;Novitsky等^[18,19]对含左手材料的导模进行了相关研究,发现 TEM 模存在且它的总能流为零。Yan等^[14~16]对含左手材料光纤做了进一步研究,得到了相关的色散特性,初步设计了含左手材料空心光纤。此外,Shen等^[21,22]对含各向同性左手材料光纤进行了相关研究,发现导模色散曲线在截止点附近有双值性甚至三值性。然而他们都没有得到每个模详细的色散曲线和色散特性,而且缺乏较深入的实验研究。基于左手材料的实际情况和实际结构特点,考虑各向异性的左手材料,应对该类光纤进行较深入的研究。

含左手材料光纤可能导引振荡模或表面波模,本文主要讨论振荡模。首先,根据 Maxwell 方程推导各种模式的色散方程,然后,考虑实际左手材料的结构特点,对各种模式的存在条件及色散特性进行相关的讨论。

2 色散方程

含左手材料光纤的截面示意图如图 1 所示。考虑该光纤的纤芯为各向异性的左手材料,在直角坐标系中,其介电常数和磁导率分别为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \begin{pmatrix} \varepsilon_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{1z} \end{pmatrix} \text{ 和 } \boldsymbol{\mu}_1 = \begin{pmatrix} \mu_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{1z} \end{pmatrix}.$$

其中包层为普通材料,介电常数和磁导率分别为 ε_2 和 μ_2 且充满至无穷远处。当光纤中传输的电磁场为时谐电磁场且分别为 $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)]$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)]$ 。 ω 和 β 分别为角频率和纵向传播常数, $j = \sqrt{-1}$ 。根据 Maxwell 方程 $\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\boldsymbol{\mu}_1\mathbf{H}$, 可以得到

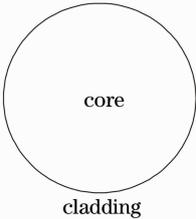


图 1 含左手材料光纤横截面图

Fig. 1 Geometry of the optical fiber

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_{1x}H_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} + j\beta E_x = -j\omega\mu_{1y}H_y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_{1z}H_z. \quad (3)$$

由 Maxwell 方程 $\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\boldsymbol{\varepsilon}_1\mathbf{E}$, 又可以得到

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\varepsilon_{1x}E_x, \quad (4)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} + j\beta H_x = -j\omega\varepsilon_{1y}E_y, \quad (5)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = -j\omega\varepsilon_{1z}E_z, \quad (6)$$

根据(1)~(6)式可以得到横向电磁场分量分别为

$$E_x = \frac{1}{j(\omega^2\varepsilon_{1x}\mu_{1y} - \beta^2)} \left(\omega\mu_{1y} \frac{\partial H_z}{\partial y} + \beta \frac{\partial E_z}{\partial x} \right), \quad (7)$$

$$E_y = \frac{1}{j(\omega^2\varepsilon_{1x}\mu_{1y} - \beta^2)} \left(-\omega\mu_{1x} \frac{\partial H_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial E_z}{\partial y} \right), \quad (8)$$

$$H_x = \frac{1}{j(\omega^2\varepsilon_{1x}\mu_{1y} - \beta^2)} \left(-\omega\varepsilon_{1y} \frac{\partial E_z}{\partial y} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right), \quad (9)$$

$$H_y = \frac{1}{j(\omega^2\varepsilon_{1x}\mu_{1y} - \beta^2)} \left(\omega\varepsilon_{1x} \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \right). \quad (10)$$

将(7)和(8)式代入(3)式,可得

$$\varepsilon_{1x} \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \varepsilon_{1y} \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \varepsilon_{1z}(\omega^2\varepsilon_{1x}\mu_{1y} - \beta^2)E_z = 0. \quad (11)$$

同理,把(9)和(10)式代入(6)式可得

$$\mu_{1x} \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \mu_{1y} \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \mu_{1z}(\omega^2\varepsilon_{1x}\mu_{1y} - \beta^2)H_z = 0. \quad (12)$$

(11)和(12)式就是各向异性光纤的纤芯中纵向电磁场分量所满足的 Helmholtz 方程。光纤一般为圆柱形,所以采用极坐标系。进一步考虑纤芯横向介电常数和磁导率分别为

$$\varepsilon_{1r} = \varepsilon_{1y} = \varepsilon_{1t}, \quad \mu_{1r} = \mu_{1y} = \mu_{1t},$$

且与纵向介电常数和磁导率的关系为

$$\varepsilon_{1t} \neq \varepsilon_{1z}, \mu_{1t} \neq \mu_{1z},$$

类似于普通材料光纤的数学处理方法^[23], 经过计算,含左手材料光纤中电磁场的纵向分量分别为

$$\begin{cases} E_z = A \frac{J_m(U_1 r/a)}{J_m(U_1)} \exp(-i\beta z) \sin m\theta \\ H_z = B \frac{J_m(U_2 r/a)}{J_m(U_2)} \exp(-i\beta z) \cos m\theta \end{cases}, (r \leq a) \quad (13)$$

$$\begin{cases} E_z = A \frac{K_m(Wr/a)}{K_m(W)} \exp(-i\beta z) \sin m\theta \\ H_z = B \frac{K_m(Wr/a)}{K_m(W)} \exp(-i\beta z) \cos m\theta \end{cases}, (r \geq a) \quad (14)$$

式中 $U_1^2 = \frac{\epsilon_{1z}}{\epsilon_{1t}}(\epsilon_{1t}\mu_{1t}k_0^2 - \beta^2)a^2$, $U_2^2 = \frac{\mu_{1z}}{\mu_{1t}}(\epsilon_{1t}\mu_{1t}k_0^2 - \beta^2)a^2$, $W^2 = (\beta^2 - \epsilon_2\mu_2k_0^2)a^2$, m 和 k_0 分别为整数和真空中波数, A 和 B 是 2 个待定常数, 而 $J_m(U_i)$ ($i=1,2$), $K_m(W)$ 分别为 Bessel 函数和修正的 Bessel 函数. 由于考虑各向异性的左手材料, 而且该材料的横向和纵向介电常数、磁导率有不同的符号, 即 $\frac{\epsilon_{1z}}{\epsilon_{1t}} < 0$ 和 $\frac{\mu_{1z}}{\mu_{1t}} < 0$. 当 $\beta > \max(\sqrt{\epsilon_{1t}\mu_{1t}k_0}, \sqrt{\epsilon_2\mu_2k_0})$ 时, 称之为振荡模; 当 $\sqrt{\epsilon_2\mu_2k_0} < \beta < \sqrt{\epsilon_{1t}\mu_{1t}k_0}$ 时, 又将其称为表面模. 本文主要讨论振荡模.

根据 Maxwell 方程组, 利用(13)和(14)式可以得到光纤其他电磁场分量. 根据切向电磁场连续的边界条件 $E_{z1} = E_{z2}$, $H_{z1} = H_{z2}$, $E_{\theta 1} = E_{\theta 2}$, $H_{\theta 1} = H_{\theta 2}$ (下标“1”表示纤芯, “2”则代表包层), 含左手材料光纤的振荡模色散方程为

$$\left[\frac{\epsilon_{1z} J'_m(U_1)}{U_1 J_m(U_1)} + \frac{\epsilon_2 K'_m(W)}{W K_m(W)} \right] \times \left[\frac{\mu_{1z} J'_m(U_2)}{U_2 J_m(U_2)} + \frac{\mu_2 K'_m(W)}{W K_m(W)} \right] = \frac{m^2 V^2 (\epsilon_2 \mu_2 U^2 + \epsilon_{1t} \mu_{1t} W^2)}{(UW)^4}, \quad (15)$$

式中 $U^2 = (\epsilon_{1t}\mu_{1t}k_0^2 - \beta^2)a^2$, $V^2 = U^2 + W^2$, “'”表示对相关变量的求导. 当电磁波在光纤中传输时, 因不同的极化方向而出现 TE 模、TM 模、HE 模及 EH 模 4 种模式. 当 $m=0$ 时, 可以得到 TE 振荡模的色散方程为

$$\frac{\mu_{1z} J_1(U_2)}{U_2 J_0(U_2)} + \frac{\mu_2 K_1(W)}{W K_0(W)} = 0, \quad (16)$$

TM 振荡模的色散方程为

$$\frac{\epsilon_{1z} J_1(U_1)}{U_1 J_0(U_1)} + \frac{\epsilon_2 K_1(W)}{W K_0(W)} = 0, \quad (17)$$

当 $m > 0$ 时, 根据(15)式可以得到

$$\frac{\epsilon_{1z}}{\epsilon_2} J^A + \frac{\mu_{1z}}{\mu_2} J^B + 2K = \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{1z}}{\epsilon_2} J^A - \frac{\mu_{1z}}{\mu_2} J^B \right)^2 + \frac{4m^2 V^2 \left(U^2 + \frac{\epsilon_{1t}\mu_{1t} W^2}{\epsilon_2 \mu_2} \right)}{(UW)^4}}, \quad (18)$$

式中 $J^A = \frac{J'_m(U_1)}{U_1 J_m(U_1)}$, $J^B = \frac{J'_m(U_2)}{U_2 J_m(U_2)}$ 和 $K = \frac{K'_m(W)}{W J_m(W)}$. 类似于普通光纤的混合模分类^[23], 取“+”号时对应于 EH 模的色散方程; 而取“-”号时,

则对应于 HE 模的色散方程.

3 数据和结果

进一步考虑纤芯为各向异性的左手材料, 其纵向用开口金属环和金属棒呈周期性结构而制备, 从横向看为普通材料, 即介电常数、磁导率大于零 ($\epsilon_{1t} = 2.0$, $\mu_{1t} = 1.0$). 由于左手材料具有较强的频率色散, 所以应考虑该材料介电常数、磁导率随频率的变化. 根据左手材料实验模型^[24], 当频率在 4.0~6.0 GHz 之间时, 介电常数和磁导率同时为负值, 即

$$\begin{aligned} \epsilon_{1z}(\omega) &= 1 - \frac{\omega_P^2}{\omega^2} < 0, \\ \mu_{1z}(\omega) &= 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2} < 0, \end{aligned} \quad (19)$$

式中 $F=0.56$, $\frac{\omega_0}{2\pi} = 4.0$ GHz, $\frac{\omega_P}{2\pi} = 10.0$ GHz. 但是该光纤的包层为常用材料, 其介电常数和磁导率分别为 $\epsilon_2 = 2.25$, $\mu_2 = 1.0$. 模阶数和纤芯半径对光纤导模会产生影响, 因此从这两方面进行分析.

3.1 模阶数对振荡模色散特性的影响

先将纤芯的半径设为定值, 来探索模阶数对光纤振荡模色散特性的影响.

3.1.1 TE 振荡模

根据色散方程(16)式, 当纤芯半径为 2.0 cm, 频率从 4.0 GHz 增加到 6.0 GHz 时, 找到了 3 个 TE_{0n} ($n=1,2,3$) 振荡模, 相关的色散曲线如图 2 所示. 纵轴有效折射率为纵向传播常数 β 和真空中的波矢 k_0 之比(下同). TE 振荡模的具体色散特性如下:

1) 随着模阶数的增加, 色散曲线向左上方移动, 带宽变窄. 当有效折射率在 1.5~6.0 之间, 对于 TE_{01} 模, 工作频率在 4.00~5.73 GHz 之间, 带宽为 1.73 GHz; TE_{02} 模, 工作频率在 4.00~4.92 GHz 之间, 带宽为 0.92 GHz; 而 TE_{03} 模, 工作频率在 4.00~4.43 GHz 之间, 带宽为 0.43 GHz, 不到 TE_{01} 模带宽的 1/4.

2) 随着频率的增加, 有效折射率也单调增加, 可以实现高有效折射率光纤. 对于 TE_{01} 模, 随着频率的增加, 其有效折射率先缓慢增加, 后快速增加. 根据群速的公式 $v_g = \frac{d\omega}{dn}$, 所以该模的群速由快变慢; 而 TE_{02} 和 TE_{03} 模, 随着频率的增加, 其有效折射率几乎线性增加, 说明群速几乎不变.

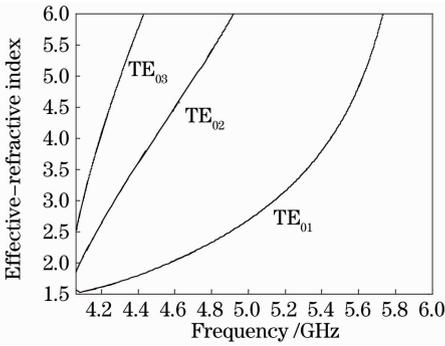


图2 振荡模 TE_{0n} ($n=1, 2, 3$) 的色散曲线。纤芯为各向异性、材料色散的左手材料, 纵向的介电常数和磁导率分别为: $\epsilon_{1z} < 0, \mu_{1z} < 0$; 而横向的介电常数和磁导率分别为: $\epsilon_{1t} = 2.0, \mu_{1t} = 1.0$ 。包层也为普通材料, 它的介电常数和磁导率分别为 $\epsilon_2 = 2.25, \mu_2 = 1.0$

Fig. 2 Dispersion curves are of the oscillating guided modes TE_{0n} ($n = 1, 2, 3$). The core is anisotropic and dispersive metamaterial with negative permittivity ($\epsilon_{1z} < 0$) and negative permeability ($\mu_{1z} < 0$) in the longitudinal, but positive permittivity and permeability in the transverse ($\epsilon_{1t} = 2.0, \mu_{1t} = 1.0$) while the cladding is RHM with permittivity $\epsilon_2 = 2.25$ and permeability $\mu_2 = 1.0$, respectively

3.1.2 TM 振荡模

基于实验模型, 根据 (17) 式, 当纤芯半径为 2.0 cm, 频率从 4.0 GHz 增加到 6.0 GHz 时, 发现有 3 个 TM_{0n} ($n=1, 2, 3$) 振荡模, 如图 3 所示。随着频率的增加, 有效折射率几乎线性增加, 但有效折射率只在很小的范围内增加。而且其色散曲线几乎互相平行, 所以有几乎相等的群速。当有效折射率在 1.5 ~ 6.0 之间, TM_{02} 模的带宽最宽, 几乎为 2.0 GHz; 而 TM_{03} 模的带宽最窄, 不到 0.2 GHz。前者几乎为后者的 10 倍。

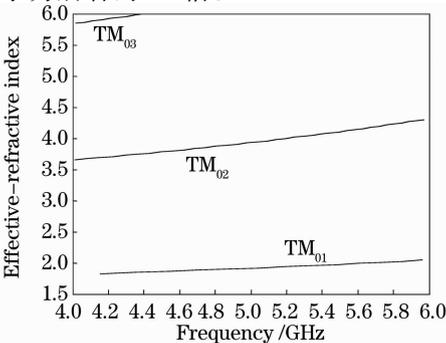


图3 振荡模 TM_{0n} ($n=1, 2, 3$) 的色散曲线 (光纤其他参数与图 2 相同)

Fig. 3 Dispersion curves are of the oscillating guided modes TM_{0n} ($n = 1, 2, 3$). The parameters for optical fiber are the same as Fig. 2

3.1.3 EH_{1n} ($n=1, 2, 3$) 振荡模

光纤的混合模有 EH 模和 HE 模, 对 EH 模的讨论采用与图 2 相同的光纤参数, 根据色散方程 (18) 式且方程的右边取“+”, 相关的色散曲线如图 4 所示。分析这些色散曲线可以发现:

1) 当有效折射率在 1.5 ~ 6.0 之间, 共找到 3 个 EH 振荡模, 其色散曲线相似。每一模式都由两条直线组成, 这两条直线有 2 个不同斜率, 所以有 2 个不同的群速。随着频率的增加, 有效折射率也单调增加, 先快速增加, 后缓慢增加, 所以群速由小变大。

2) 随着模阶数的增加, 色散曲线上移, 第 1 个群速 v_{g1} 逐渐变小, 第 2 个群速 v_{g2} 几乎不变, 突变频率在 4.4 GHz 左右。然而频域几乎不变, 第 1 个群速 v_{g1} 是在频率 4.0 ~ 4.4 GHz 之间, 带宽为 0.4 GHz; 第 2 个群速 v_{g2} 在 4.4 ~ 6.0 GHz 之间, 带宽为 1.6 GHz。

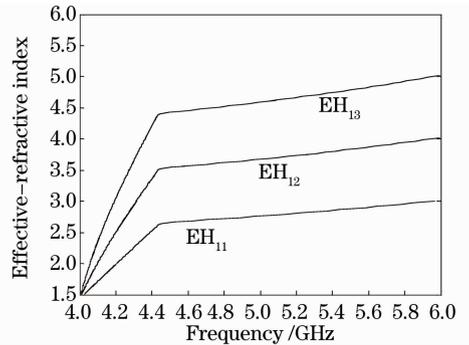


图4 振荡模 EH_{1n} ($n=1, 2, 3$) 的色散曲线 (光纤其他参数与图 2 相同)

Fig. 4 Dispersion curves are of the oscillating guided modes EH_{1n} ($n = 1, 2, 3$). The parameters for optical fiber are the same as Fig. 2

3.1.4 HE_{1n} ($n=1, 2, 3$) 振荡模

在普通光纤中, HE 模具有非常重要的价值。当纤芯半径为 2.0 cm 时, 色散曲线只在很窄的频域内存在, 不能看清该模完整的色散特性, 所以选用较小的纤芯半径 (0.2 cm), 而光纤其他参数则与图 2 相同。根据色散方程 (18) 式且方程的右边取“-”号, 相关的色散曲线如图 5 所示。分析这些色散曲线可以发现:

1) 当有效折射率在 1.5 ~ 6.0 之间, 共找到 3 个 HE 振荡模。随着频率的增加, 有效折射率也单调增加, 色散曲线斜率却由大变小, 所以群速由小变大, 由此可以实现高折射率 HE 振荡模光纤。

2) 随着模阶数的增加, 色散曲线上移, 其群速逐

渐变小,频域变窄。当有效折射率在 1.5~6.0 之间,对于 HE_{11} 振荡模,工作频率 4.00~4.15 GHz 之间,带宽为 0.15 GHz;对于 HE_{12} 振荡模,工作频率 4.0000~4.0335 GHz 之间,带宽为 0.0335 GHz;而 HE_{13} 振荡模,工作频率在 4.0003~4.0140 GHz 之间,带宽仅为 0.0137 GHz,只有 HE_{11} 模带宽的近 1/10。

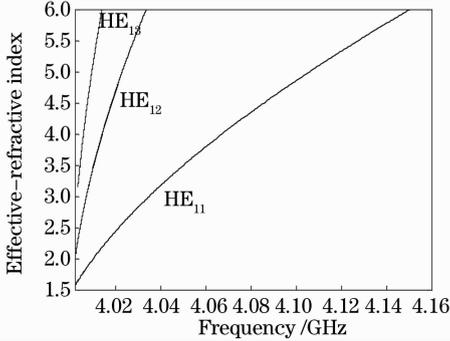


图5 振荡模 HE_{1n} ($n=1, 2, 3$) 的色散曲线。(光纤半径为 0.2 cm,其他参数与图 2 相同)

Fig. 5 Dispersion curves are of the oscillating guided modes HE_{1n} ($n=1, 2, 3$). The core radius is 0.2 cm and other parameters for optical fiber are the same as Fig. 2

3.2 纤芯半径对导模色散特性的影响

3.2.1 TE 振荡模

根据色散方程(16)式,采用不同纤芯半径(1.0, 2.0, 3.0 cm),其他光纤参数与图 2 相同, TE_{01} 振荡模的色散曲线如图 6 所示。通过对图 6 的分析可以发现:

- 1) 随着纤芯半径的增加,色散曲线右下移,截止频率变大;
- 2) 当纤芯半径 $a=1.0$ cm 时,群速几乎相同,

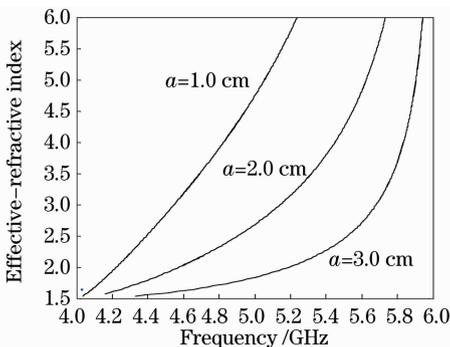


图6 TE_{01} 振荡模色散曲线。(纤芯半径分别为 1.0, 2.0, 3.0 cm,其他参数与图 2 相同)

Fig. 6 Dispersion curves are of the oscillating guided modes TE_{01} . The core radius is 1.0, 2.0, 3.0 cm and other parameters for optical fiber are the same as Fig. 2

但是,随着纤芯半径的增加,群速发生了明显的变化,即随着频率的增加,群速由快变慢;

3) 随着纤芯半径的增加,色散曲线之间的间隔明显变小,由此可以推断,当纤芯半径达到一定值以后,色散曲线几乎重合在一起,也就是说,它们具有几乎一样的色散特性,或者说,改变纤芯半径对 TE 振荡模的传输特性几乎没有影响。

3.2.2 TM 振荡模

根据色散方程(17)式,采用不同纤芯半径(1.0, 2.0, 3.0 cm),其他光纤参数与图 2 相同, TM_{01} 振荡模的色散曲线如图 7 所示。比较这些色散曲线,可以发现:当纤芯有不同的半径时,色散曲线几乎总是呈直线,这说明纤芯半径一定时,振荡模具有不变的群速,这不同于 TE_{01} 振荡模;此外,随着纤芯半径的增加,还可以发现:

- 1) 直线斜率变小,由此可以推断它的群速应该变大;
- 2) 色散曲线下移,有效折射率变小;
- 3) 该振荡模的频域变窄,有效折射率的变化范围也变小。

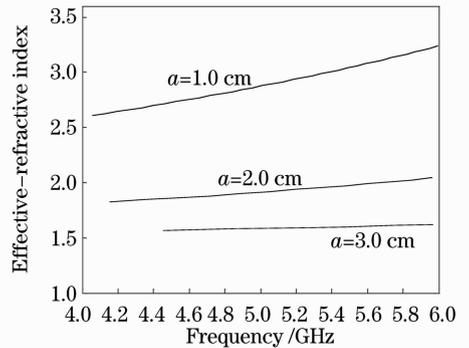


图7 TM_{01} 振荡模色散曲线。(纤芯半径分别为 1.0, 2.0, 3.0 cm,其他参数与图 2 相同)

Fig. 7 Dispersion curves are of the oscillating guided modes TM_{01} . The core radius is 1.0, 2.0, 3.0 cm and other parameters for optical fiber are the same as Fig. 2

3.2.3 EH 振荡模

根据色散方程(18)式且方程右边选“+”号,采用不同纤芯半径(1.0, 2.0, 3.0 cm),其他光纤参数与图 2 相同,振荡模 EH_{11} 的色散曲线如图 8 所示。比较这些色散曲线,可以发现:

- 1) 当纤芯有不同的半径时,色散曲线类似,它们都分别由 2 条不同斜率的近似于直线的曲线组成,这说明了该模具有 2 个不同的群速;
- 2) 随着纤芯半径的增加,色散曲线右下方移

动,有效折射率变小,截止频率变小;

3) 随着纤芯半径的增加,第 1 个群速由小变大,带宽变窄。当频率约等于 4.46 GHz 时,群速突变,第 1 个群速变为第 2 个群速。第 2 个群速也由小变大,工作频率在 4.4~6.0 GHz 之间,具有不变的带宽。

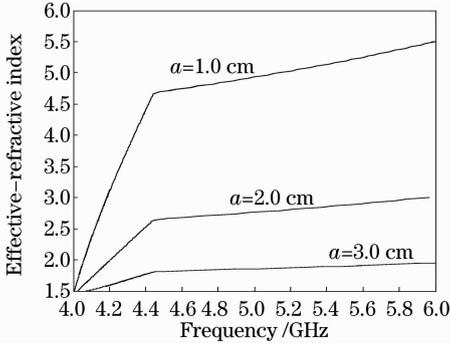


图 8 EH₁₁ 振荡模色散曲线。(纤芯半径分别为 1.0, 2.0, 3.0 cm, 其他参数与图 2 相同)

Fig. 8 Dispersion curves are of the oscillating guided modes EH₁₁. The core radius is 1.0, 2.0, 3.0 cm and other parameters for optical fiber are the same as Fig. 2

3.2.4 HE 模

根据色散方程(18)式且方程右边选“-”号,采用不同纤芯半径(0.1, 0.2, 0.3 cm),其他光纤参数与图 2 相同,振荡模 HE₁₁ 的色散曲线如图 9 所示。比较这些色散曲线,可以发现:

1) 随着纤芯半径的增加,色散曲线斜率变小,群速相对变大;

2) 当纤芯有不同的半径时,有效折射率随着频率的增加而单调增加,而且在小纤芯半径时,有效折射率增加的相对较快。

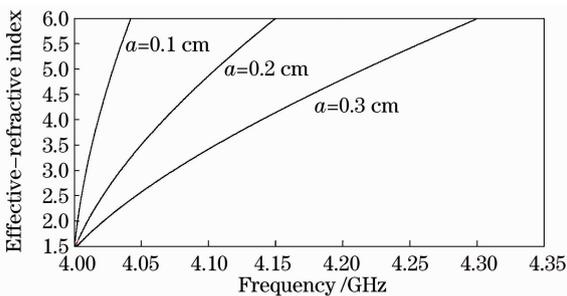


图 9 HE₁₁ 振荡模色散曲线。(纤芯半径分别为 0.1, 0.2, 0.3 cm, 其他参数与图 2 相同)

Fig. 9 Dispersion curves are of the oscillating guided modes HE₁₁. The core radius is 0.1, 0.2, 0.3 cm and other parameters for optical fiber are the same as Fig. 2

3) 随着纤芯半径的增加,色散曲线向右方移动,工作频带变宽,所以可以通过增加纤芯半径来适度增加带宽。

4 结 论

本文对纤芯为各向异性左手材料,包层为普通材料的光纤进行了研究。得到了相关振荡模的色散特性。当光纤半径不变时,随着模阶数的增加,色散曲线上移,有效折射率增加,同时,不同的振荡模,它们的群速也发生了相应的变化;随着光纤半径的增加,最低阶振荡模的色散曲线向右下方移动,有效折射率减小,而 HE₁₁ 振荡模的工作频域变宽,这为增加带宽指明了方向。总之,以上这些色散特性,有待于进一步深入地进行研究,为左手材料光纤的实际应用提供理论基础。

参 考 文 献

- 1 D. R. Smith, N. Kroll. Negative refraction index in left-handed materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(14): 2933~2936
- 2 V. G. Veselago. Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic properties[J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4): 509~517
- 3 Z. Y. Xiao, Z. H. Wang. Dispersion characteristics of asymmetric double-negative material slab waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(9): 1757~1760
- 4 R. A. Silin. Electromagnetic waves in artificial periodic structures[J]. *Phys. Usp.*, 2006, **49**(5): 542~545
- 5 J. He, Y. Jin, Z. Hong *et al.*. Slow light in a dielectric waveguide with negative-refractive-index photonic crystal cladding [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11077~11082
- 6 K. L. Tsakmakidis, A. Klaedtke, D. Aryal *et al.*. Single-mode operation in the slow-light regime using oscillatory waves in generalized left-handed hetrostructures [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **89**(20): 201103
- 7 K. L. Tsakmakidis, A. D. Boardman, O. Hess. Trapped rainbow storage of light in metamaterials [J]. *Nature*, 2007, **450**: 397~401
- 8 Tingting Tang, Fushen Chen, Bao Sun. Photonic band gap from periodic structures containing anisotropic nonmagnetic left-handed metamaterial[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 431~434
- 9 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
- 10 Jiang Meiping, Chen Xianfeng, Ni Chongwen. Propagation properties of a left-handed material slab waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 193~197
蒋美萍, 陈宪锋, 倪重文. 左手材料平板波导的传输特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 193~197
- 11 Shen Lufa, Wang Zihua. Transmission properties of TM modes in slab waveguide with anisotropy and dispersion left-hand materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(12): 121302
沈陆发, 王子华. 各向异性色散左手材料三层平面波导 TM 模的传输特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(12): 121302
- 12 K. Y. Kim. Fundamental guided electromagnetic dispersion

- characteristics in lossless dispersive metamaterial clad circular air-hole waveguides [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, **9**: 1062~1069
- 13 Kim K. Y., Lee J. H., Cho Y. K. *et al.*. Electromagnetic wave propagation through doubly dispersive subwavelength metamaterial hole[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(10): 3653~3665
- 14 Yan Min, Niels Asger Mortensen. Hollow-core infrared fiber incorporating metal-wire metamaterial[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 14851~14864
- 15 Yan Min, Niels Asger Mortensen. Metamaterial reflector for hollow-core infrared fiber design [C]. San Jose: Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2010
- 16 Elliot Smith J., Liu Zhaowei, Mei Yongfeng *et al.*. Combined surface plasmon and classical waveguiding through metamaterial fiber design[J]. *Nano Lett.*, 2010, **10**(1): 1~5
- 17 R. Rupp. Surface polaritons and extinction properties of a left-handed material cylinder [J]. *J. Phys.: Condensed Matter*, 2004, **16**(34): 5991~5998
- 18 Novitsky A. V., Barkovsky L. M.. Guided modes in negative-

- refractive-index fibers[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(2): S51~S56
- 19 Novitsky A. V.. Negative-refractive-index fibres: TEM modes [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(10): 864~866
- 20 H. Cory, T. Blum. Surface-wave propagation along a metamaterial cylindrical guide [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2005, **44**(1): 31~35
- 21 Shen L. F., Wang Z. H.. Guided modes characteristics in a fiber with left-handed material [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(5): 1039~1041
- 22 Shen Lufa, Wang Zihua. Guided modes in fiber with left-handed materials[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009, **26**(4): 754~759
- 23 D. Marcuse. Light Transmission Optics[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1982. 308~320
- 24 I. V. Shadrivov, A. A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar. Guided modes in negative-refractive-index waveguides [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(5): 057602

全光纤结构被动锁模 2 μm 掺铥光纤激光器

由于水分子在 2 μm 波段有很强的中红外吸收峰,而掺铥光纤激光器可以发射 2 μm 波长附近的激光,因此掺铥光纤激光器可广泛应用于生物医疗、国防工业等领域。北京工业大学高功率光纤激光课题组成功实现了高脉冲能量全光纤结构被动锁模的掺铥皮秒脉冲光纤激光器。激光器采用了环形腔结构设计,整个激光腔长约 25 m。激光脉冲的主要输出特性如图 1 所示,当抽运功率为 1.3 W 时,开始得到稳定重复频率为 8.2 MHz 的自锁模脉冲,其重复频率与激光器的腔长相吻合。随着抽运功率的增

加,平均输出功率几乎成线性增加,当抽运功率增加到 5.5 W 时,最大平均输出功率达到了 66 mW,相应的单脉冲能量高达 8 nJ。激光的中心波长为 2007 nm,3 dB 光谱带宽为 1.3 nm,脉冲宽度小于 20 ps。采用频谱分析仪测得锁模激光脉冲的信噪比大于 65 dB,表明锁模激光脉冲非常稳定。进一步增加抽运功率将产生脉冲分裂现象,其重复频率变为 16.4 MHz。据我们所知,此单脉冲能量为目前所报道的全光纤结构被动锁模 2 μm 掺铥超快光纤激光器最高结果。

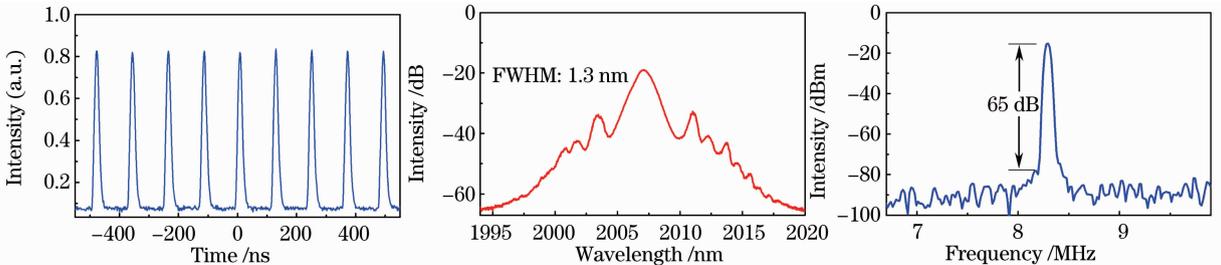


图 1 被动锁模 2 μm 掺铥全光纤激光器输出特性图

Fig. 1 Main output characteristics of the 2 μm Tm-doped mode-locked all fiber laser

刘江 曹镫 王璞

(北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

收稿日期: 2011-07-18