

负折射率介质光纤的导模异常特性分析*

何金龙 沈林放 何赛灵 阮智超

(浙江大学国家光学仪器重点实验室 光与电磁波研究中心, 浙江杭州 310027)

摘要 对芯层为负折射率介质, 敷层为普通介质的光纤的导模进行了研究, 并对芯层与敷层介电常数比值(ξ)和磁导率比值(η)变化对导模色散特征的影响进行分析. 分析表明负折射率光纤具有许多不同于常规光纤的反常特征, 如存在表面波模, 存在 TM_{00} 模和 TE_{00} 模以及存在多个单模传输模式和单模传输区间等. 同时对负折射率介质光纤的单模传输条件进行了分析, 发现单模传输模式和传输区间随 ξ 和 η 的不同而改变.

关键词 负折射率介质; 左手材料; 光纤; 导模

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

0 引言

负折射率介质材料作为一种新型的人工电磁材料, 近年来引起了人们极大的研究兴趣. 所谓的负折射率介质, 是指介电常数(ϵ)和磁导率(μ)都小于0的介质材料. 当电磁波在这种介质材料中传播时, 电场、磁场和波矢遵从左手法则, 所以负折射率介质材料又被称为左手材料(LHM). 早在1968年, V. G. Veselago 就从理论上研究了LHM中的反常电磁现象^[1], 如负折射, 反常多普勒效应, 反常切伦柯夫辐射等. 由于自然界中难以找到负折射率介质材料, V. G. Veselago 的工作并没有引起人们重视, 直到2000年, Smith 等人在实验室首次制造出了微波段的负折射率介质^[2].

LHM 的反常电磁特性展现了它在光与电磁波领域潜在的重要应用价值. 目前, 已提出的重要应用有: 高分辨率透镜成像^[3,4], 新型共振腔^[5], 以及反常光子隧道^[6,7]等. 本文将研究 LHM 在圆形波导方面的光学特性, 着重通过色散方程研究由 LHM 和常规材料构成的 LHM 光纤的单频传输特性. 我们考虑的 LHM 光纤, 芯层是由 LHM 构成, 其 ϵ_1 和 μ_1 都小于0; 敷层仍为常规材料, ϵ_2 和 μ_2 大于0.

1 色散方程

在极坐标系中 LHM 光纤的模式场纵向分量满足如下 Helmholtz 方程

$$\nabla_r^2 \begin{pmatrix} E_z(r, \theta) \\ H_z(r, \theta) \end{pmatrix} + (\epsilon(r)\mu(r)k_0^2 - \beta^2) \begin{pmatrix} E_z(r, \theta) \\ H_z(r, \theta) \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

式中, β 为光纤模式的传播常数. 相对介电常数函

数和磁导率函数分别为

$$\epsilon(r) = \begin{cases} \epsilon_1 < 0 & r < a \\ \epsilon_2 > 0 & r \geq a \end{cases}, \mu(r) = \begin{cases} \mu_1 < 0 & r < a \\ \mu_2 > 0 & r \geq a \end{cases} \quad (2)$$

式中 a 是光纤芯层半径. 式(1)对应振荡模形式的解为

$$E_z = \begin{cases} \frac{A}{J_m(U)} J_m\left(\frac{Ur}{a}\right) e^{im\theta}; & r < a \\ \frac{A}{K_m(W)} K_m\left(\frac{Wr}{a}\right) e^{im\theta}; & r \geq a \end{cases}$$
$$H_z = \begin{cases} \frac{B}{J_m(U)} J_m\left(\frac{Ur}{a}\right) e^{im\theta}; & r < a \\ \frac{B}{K_m(W)} K_m\left(\frac{Wr}{a}\right) e^{im\theta}; & r \geq a \end{cases} \quad (3)$$

式中 $U = a \sqrt{\epsilon_1 \mu_1 k_0^2 - \beta^2}$, $W = a \sqrt{\beta^2 - \epsilon_2 \mu_2 k_0^2}$. 根据 E_z 和 H_z 的分布, 可以求出模式场的其它分量. 由切向场分量 E_θ 和 H_θ 在 $r = a$ 处的连续性, 可以得到光纤如下模式色散方程

$$\frac{m^2 V^2}{U^4 W^4} (\xi \eta W^2 + U^2) = \left(\frac{\xi}{U} \frac{J'_m(U)}{J_m(U)} + \frac{1}{W} \frac{K'_m(W)}{K_m(W)} \right) \cdot \left(\frac{\eta}{U} \frac{J'_m(U)}{J_m(U)} + \frac{1}{W} \frac{K'_m(W)}{K_m(W)} \right) \quad (4)$$

式中 ξ 为芯层与敷层的介电常数之比 (即 $\xi = \epsilon_1 / \epsilon_2$), η 为芯层与敷层的磁导率之比 (即 $\eta = \mu_1 / \mu_2$), V 为光纤参量 (满足 $V^2 = U^2 + W^2 = a^2 k_0^2 (\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_2 \mu_2)$). 从方程(4)可知, 光纤模式的 U - V 色散关系完全由参量 ξ 和 η 决定. 由此可知, 只要以 LHM 作包层与 LHM 作芯层的两类光纤的 ξ 、 η 值相同, 它们的传输特性完全相同.

负折射率介质的介电常数和磁导率与普通介质符号相反, 因此在负折射率介质和普通介质的界面处可以存在表面波^[8]. 可以推测在 LHM 光纤中还可能存在表面波形式的传播模式. 从表面波性质可知, 该可能模式的传播常数大于 $\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} k_0$, 此时方

*国家自然科学基金项目(批准号:60277018)和国家自然科学基金重点项目(批准号:90101024)
Tel:0571-87953225 Email:jlhe@coer.zju.edu.cn
收稿日期:2003-10-08

程(4)的 U 值为虚数,令 $U = iQ$ (Q 为实数),色散方程(4)则可以改写为

$$\frac{m^2 V^2}{Q^4 W^4} (\xi \eta W^2 - Q^2) = \left(\frac{\xi}{Q} \frac{I'_m(Q)}{I_m(Q)} - \frac{1}{W} \frac{K'_m(W)}{K_m(W)} \right) \cdot \left(\frac{\eta}{Q} \frac{I'_m(Q)}{I_m(Q)} - \frac{1}{W} \frac{K'_m(W)}{K_m(W)} \right) \quad (5)$$

数值计算表明上式方程可以有解,即表明 LHM 光纤可以传播表面波形式的导模. 同样,表面波形式的导模的 Q - V 色散关系只与参量 ξ 和 η 有关. 为区分这两种不同形式的导模,我们称 U 为实数时 LHM 光纤的导模为振荡模, U 为虚数时为表面波模.

2 数值分析

LHM 不同于天然材料,它是人工设计的周期性复合材料,其中 ϵ 和 μ 值具有一定的可调节性. 假设 LHM 光纤敷层介质为空气,显然这是一种最简单的 LHM 光纤结构. 由于色散方程为非线性方程,只能通过数值计算来分析 LHM 光纤的色散特性. 图 1 给出了一种 LHM 光纤的导模色散 U (或 Q)- V 曲线图, LHM 光纤的参数取 $\xi = -3.5, \eta = -1.0$. 由图 1 可看出, LHM 光纤导模的 U (或 Q)- V 特性与常规光纤不同,除 LHM 光纤的导模存在表面波模外,还有以下不同于常规光纤的特点: 1) 在 LHM 光纤中 HE_{11} 模^[9] 不一定为光纤的基模,如图 1 中 HE_{11} 模与 HE_{21} 等模式曲线交在一起,且 HE_{11} 导模只存在于有限的 V 参数区间内; 2) LHM 光纤的 TM_{01}, HE_{12} 等振荡模在模式截止点附近区域存在两个 U 值解,如图中虚线框内的 TM_{01}, HE_{12} 模曲线,这个特性显然对 LHM 在光学通信的应用是有害的; 3) LHM 光纤中 TE 和 TM 振荡模的第一个模式的模场结构与常规光纤的 TE 和 TM 模完全不同,而且 LHM 光纤中第 $n+1$ ($n \geq 1$) 个 TM 和 TE 模的模场结构总是与普通光纤的第 n 个模式的对应模场结构相类似,如图 1 中的插图. 为此我们把 LHM 光纤中的第一个 TM

和 TE 振荡模分别记为 TM_{00}, TE_{00} 模; 4) 在低 V 参数区出现的 HE_{m1} ($m > 0$) 模的模式曲线分别与相应的表面波曲线相连. 这些模式和表面波模式的 U - V 曲线对参数 ξ 和 η 的变化比较敏感,相比之下,其它高阶振荡模的 U - V 曲线特征比较稳定. 由于 $HE_{m1}, TM_{00}, TE_{00}$ 及表面波模对参数 ξ 和 η 值比较敏感,而且这些模式特性决定 LHM 光纤的单模传输条件,下面分析不同 ξ, η 参数下这些模式的特征.

类似常规光纤光学,引入有效折射率 $n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0}$,

芯层介质折射率 n_{co} 和敷层介质折射率 n_{cl} . 从方程(4)和(5)可以看出,参数 ξ, η 存在可交换性,即互换 ξ 和 η 的值,光纤总的色散特征曲线图不变. 为此,在下面的分析中固定 ξ 参数,分析 LHM 光纤的导模在不同 η 参数下的变化特征. 由于我们的最终研究兴趣主要在振荡模上,选取 $\xi = -2.5$. 先考虑 $\xi \eta < 1$ 的情形,这时光纤 $n_{\text{cl}}^2 > n_{\text{co}}^2$, 因此 LHM 光纤只能传播表面波. 图 2(a) 为 $\xi = -0.3$ 时的光纤模式,从中可以看出 TE 表面波并不能在 LHM 光纤中传播. 由于参数 ξ, η 可交换性,如果交换 ξ 和 η 的值,即 $\xi = -0.3, \eta = -2.5$ 时,显然这时 TM 表面波不能在 LHM 光纤中传播.

增大 LHM 光纤 $|\eta|$ 值,使光纤满足 $n_{\text{cl}}^2 < n_{\text{co}}^2$, 图 2(b) 为 LHM 光纤 $\xi = -2.5, \eta = -0.8$ 时的导模色散曲线. 分析图 2(b) 可知,此时 LHM 光纤在低 V 区存在三个单模传输区域,单模传输模式分别为 TM 表面波模、 TM_{00} 模和 TE_{00} 模,这是完全不同于常规光纤的传输性质. 从图可看出, TM_{00} 单模区比 TE_{00} 单模区大,因而更具有实际应用意义.

进一步分析更大 $|\eta|$ 值的光纤导模, HE_m 表面波模与 HE_{m1} 振荡模的导模区域会缩小甚至导模缺失. 如图 2(c), LHM 光纤 $\eta = -1.45$ 时, HE_3 表面波模和 HE_{31} 振荡模等模式缺失,而 HE_{11} 振荡模曲线起始于 $V = 0$ 值且分裂在两个区域内,两区域间由 HE_1 表面波模与之相连. 虽然 TM 表面波模和 TM_{00} 模的导模区域被 HE_{11} 模和 HE_1 表面波模覆盖, TM 模不存在单模传输区,但 HE_m 表面波模和 HE_{m1} 等模式的缺失使 LHM 光纤 HE_{11} 和 EH_{11} 模出现了单模传输区域. 显然 HE_{m1} 模式缺失越多,其单模传输区间越大,需要指出的是,虽然此时的 LHM 光纤的单模区出现在高 V 值区(约 $4 < V < 5$ 区内仍为单模),但由于芯层与敷层的介质折射差很大,因此 LHM 单模光纤的半径不会比常规单模光纤大. 再增大 $|\eta|$ 值,当 $\eta = -2.0$ 时, HE_1 表面波模和 HE_{21} 模也缺失了, HE_{11} 模的导模区域连成一个,如图 2(d) 所示. 当 $|\eta|$ 值继续增大, LHM 光纤的 HE_{11} 模的色散曲线

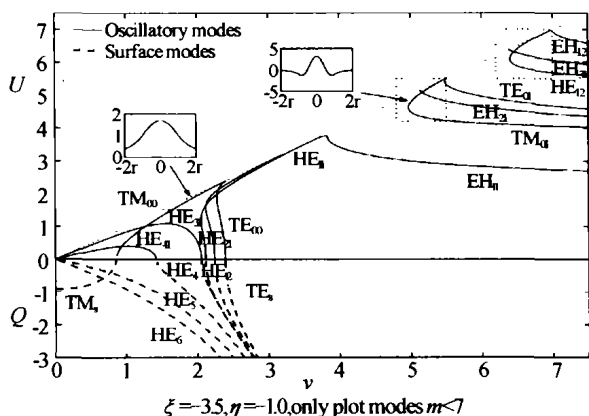


图 1 LHM 光纤的导模色散 $U(Q)$ - V 曲线
Fig. 1 $U(Q)$ - V dispersion curves of the guided modes in LHM fiber

- permeability. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2002, **1**(1): 10 ~ 13
- 6 Zhang Z M, Fu C J. Unusual photon tunneling in the presence of a layer with a negative refractive index. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(6): 1097 ~ 1099
- 7 杨立功, 顾培夫, 黄弼勤. 含有负折射介质层的布喇格镜的光学特性研究, 2004, **33**(2): 200 ~ 203
Yang L G, Gu P F, Huang B Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 200 ~ 203
- 8 曹庄琪. 导波光学中的转移矩阵方法. 上海: 上海交通大学出版社, 2000. 171 ~ 174
Cao Z Q. *Transfer Matrix Approach in Waveguide Optics*. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000. 171 ~ 174
- 9 Snitzer E. Cylindrical dielectric waveguide modes. *Journal of the Optical Society of America*, 1961, **51**(5): 491 ~ 498

Abnormal Characteristics of Guided Modes in a Fiber Formed by a Medium with Negative-refractive Index

He Jinlong, Shen Linfang, He Sailing, Ruan Zhichao

Centre for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 31002

Received date: 2003-10-08

Abstract The guided modes in a step index fiber formed by a core with negative refractive index and a usual dielectric cladding are studied. The influences of the permittivity ratio (ξ ; for the core and the cladding) and the permeability ratio (η) on the guided waves are investigated. Some abnormal properties of the guided waves in the fiber are discussed, such as the existence of surface modes, the existence of TE_{00} mode and TM_{00} mode, several single-mode regions. The condition of single-mode propagation is analyzed, and various single-mode propagation properties are discussed for different values of ξ and η .

Keywords Negative refraction index; Left-handed material; Fiber; Guided mode



He Jinlong was born in 1979, graduated from Zhejiang Normal University in 2001 and got his B. S. degree in the same year. Now he studies in Zhejiang University for his Ph. D. degree.