

包含左手材料的四层平板波导中的光导模

张 静¹ 何 英¹ 李春芳^{1,2} 张凡明¹

¹ 上海大学理学院物理系, 上海 200444

² 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 研究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, 利用图解法对各种 TE 偏振的导波模式的解进行详细分析。研究表明, 四层左手材料光波导既能支持振荡导模, 也能支持表面导模, 与三层左手材料光波导相比较, 此四层波导的导波模式呈现一些新的特性。对于中间传统材料层存在振荡场的情形: 芯子层支持振荡导模的光波导中存在基模, 并且高阶振荡导模出现模式缺失的性质; 芯子层支持表面导模的光波导可以支持基模和多个高阶模式, 并且存在模式兼并的性质。对于中间传统材料层存在衰减场的情形, 此四层波导结构可等效为三层左手材料光波导。这些新的光波导传输性质对各种光波导器件的制作有潜在的应用价值。

关键词 光纤光学; 左手材料光波导; 图解法; 导模

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2673

Guided Modes in a Four-layer Slab Waveguide with the LHM Core

Zhang Jing¹ He Ying¹ Li Chunfang^{1,2} Zhang Fanming¹

¹ Department of Physics, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China

² State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract The guided modes are studied in a four-layer left-hand material (LHM) slab waveguide structure with a negative refractive material core and three traditional dielectric layer. The graphical method is applied to determine the TE guided modes. The LHM waveguide supports both oscillating guided modes and surface guided modes. The guided modes in the four layer LHM waveguide have some new properties compared to the three-layer waveguide. When the oscillating field exists both in the inner traditional dielectric layer and in the LHM layer, the fundamental mode appears and some high-order modes are absent. And when surface guided modes exist in the LHM layer with the oscillating field in the inner dielectric layer, mode double-degeneracy appears for the high-order modes. The four-layer LHM waveguide is equivalent to the asymmetric three-layer waveguide when the evanescent field exists in the inner dielectric layer. These novel properties are valuable for the fabrication of the optical waveguides in the future.

Key words fiber optics; left-hand material (LHM) waveguide; graphical method; guided modes

1 引 言

早在 1968 年, Veselago^[1] 对具有负的介电常数和磁导率的左手材料做过理论研究, 发现了许多反常的性质, 比如反常多普勒效应、反常切伦可夫辐射和负折射等。2001 年 Shelby^[2] 用周期排列的劈裂谐振环和金属丝线在吉赫兹范围内通过实验做出

了左手材料。接着, 研究者们又把波段扩展到了可见光波段^[3~5]。左手材料可以实现如微波平板聚焦透镜、粒子加速器、分布式放大器^[6~8] 等。所以它在微波和光学领域都有广泛的应用价值。一般认为左手材料在自然界中找不到, 但是实验已经证明在自然界中这种材料至少在吉赫兹范围内确实存在^[9],

收稿日期: 2008-07-09; **收到修改稿日期**: 2009-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(60877055)、上海市教育发展基金会晨光计划(2007CG52)、上海青年科技启明星计划(08QA14030)和上海市科委(08JC14097)资助课题。

作者简介: 张 静(1983—), 女, 硕士研究生, 主要从事左手材料光波导方面的研究。E-mail: z99xt@shu.edu.cn

导师简介: 何 英(1976—), 女, 博士, 硕士生导师, 主要从事导波光学和量子物理等方面的研究。

E-mail: heyng@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

这一发现又激发了研究者们的热情。

光波导应用很广泛,可以制作支持不同模式的滤波器和激光器^[10, 11]以及可调谐滤波器^[12, 13],也可以用来设计新型的调制器^[14]。鉴于光波导的应用价值以及左手材料异常的导模特性,左手材料对制作不同的光波导器件有着很大的潜在价值,可以实现超薄光波导^[15]。人们已经对三层对称左手材料光波导的异常的导模特性做了细致研究,提出了一些新奇的性质^[16~19]。接着,人们又将研究扩展到三层不对称左手材料光波导,其导模传输性质表现出更细致而且更新异的特性^[20~22]。这些新的现象和性质的提出预计会对新型光波导的研制有一定的潜在意义。本文通过电磁场理论首次利用直接图解法对含左手材料的四层光波导中的导模做了详细研究,得出了一些特殊的现象和性质,这些导模特征对模式的选择有重要意义;左手材料光波导既可以支持振荡导模,又可以支持表面导模,因此在新型左手材料光波导中有望实现表面导模的传输,在光波导领域具有潜在应用价值。

2 色散方程

考虑一个四层平板波导结构,中间两层的其中一层为左手材料,作为芯子层,厚度为 h_1 ,介电常数和磁导率分别为 ϵ_1, μ_1 ;另一层为传统材料,厚度为 h_2 ,介电常数和磁导率分别为 ϵ_2, μ_2 ;覆盖层和衬底是同一种传统材料,介电常数和磁导率分别为 ϵ_3, μ_3 ,结构如图 1 所示。对于 TE 波,电场沿 y 轴极化。角频率为 ω 的单频场随时间的变化可表达为 $\exp(i\omega t)$,沿 z 轴传播的模式可写成 $E(x) \cdot \exp[-i(\omega t - \beta z)]$,其中 β 是传播常数。

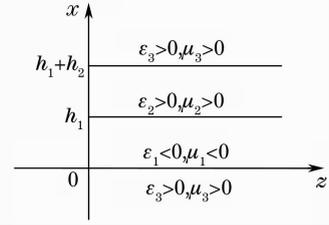


图 1 包含左手材料的四层平板波导的几何结构和符号

Fig. 1 Geometry and notations for a four-layer LHM waveguide

四层平板波导不同区域中电场分布为

$$\begin{cases} E_1(x) = A \exp[-\alpha_3(x - h_1 - h_2)], (x > h_1 + h_2) \\ E_2(x) = B \exp[i\kappa_2(x - h_1 - h_2)] + C \exp[-i\kappa_2(x - h_1 - h_2)], (h_1 < x < h_1 + h_2) \\ E_3(x) = D \exp[i\kappa_1(x - h_1)] + E \exp[-i\kappa_1(x - h_1)], (0 < x < h_1) \\ E_4(x) = F \exp(\alpha_3 x), (x < 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 α_3 是覆盖层和衬底的衰减系数,表示为 $\alpha_3 = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_3 \mu_3)^{1/2}$ 。 κ_1 和 κ_2 分别为芯子层和中间传统材料层的横向波数,与传播常数 β 的关系可写成 $\kappa_1 = (k_0^2 \epsilon_1 \mu_1 - \beta^2)^{1/2}$ 和 $\kappa_2 = (k_0^2 \epsilon_2 \mu_2 - \beta^2)^{1/2}$,其中 k_0 是自由空间的波数, $k_0 = \omega/c$, c 是真空中光速。

利用电场 $E(x)$ 以及电场的导数 $(1/\mu)\partial E(x)/\partial x$ 分别在 $x = h_1 + h_2$, $x = h_1$ 和 $x = 0$ 边界上连续,可得

$$\begin{aligned} A &= B + C, \\ \frac{-\alpha_3}{\mu_3} A &= \frac{i\kappa_2}{\mu_2} (B - C), \\ B \exp(-i\kappa_2 h_2) + C \exp(i\kappa_2 h_2) &= D + E, \\ \frac{\kappa_2}{\mu_2} [B \exp(-i\kappa_2 h_2) - C \exp(i\kappa_2 h_2)] &= \frac{\kappa_1}{\mu_1} (D - E), \\ D + E &= F, \\ \frac{i\kappa_1}{\mu_1} (D - E) &= \frac{\alpha_3}{\mu_3} F, \end{aligned} \quad (2)$$

根据以上方程消去未知数 $A-F$,可得到四层平板波导的模式本征方程:

$$\tan(\kappa_1 h_1) = \frac{\mu_1 \alpha_3 / \mu_3 \kappa_1 + \mu_1 p_2 / \kappa_1}{1 - (\mu_1 \alpha_3 / \mu_3 \kappa_1) (\mu_1 p_2 / \kappa_1)}, \quad (3)$$

式中 $p_2 = \frac{\kappa_2}{\mu_2} \tan\left(\arctan \frac{\mu_2 \alpha_3}{\mu_3 \kappa_2} - \kappa_2 h_2\right)$ 。为了方便求解导模,将 κ_2 和 α_3 的表达式改写为

$$\kappa_2 = \sqrt{-k_0^2 (\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_2 \mu_2) + \kappa_1^2}, \alpha_3 = \sqrt{k_0^2 (\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_3 \mu_3) - \kappa_1^2},$$

因此模式本征方程(3)式的右边可以表达为 $\kappa_1 h_1$ 的函数：

$$F(\kappa_1 h_1) = \frac{\frac{\mu_1}{\mu_3} \frac{\sqrt{c^2 - (\kappa_1 h_1)^2}}{\kappa_1 h_1} + \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{\sqrt{-b^2 + (\kappa_1 h_1)^2}}{\kappa_1 h_1}}{1 - \frac{\mu_1}{\mu_3} \frac{\sqrt{c^2 - (\kappa_1 h_1)^2}}{\kappa_1 h_1} - \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{\sqrt{-b^2 + (\kappa_1 h_1)^2}}{\kappa_1 h_1}} \frac{\frac{\mu_2}{\mu_3} \sqrt{\frac{c^2 - (\kappa_1 h_1)^2}{-b^2 + (\kappa_1 h_1)^2}} - \tan\left[\frac{h_2}{h_1} \sqrt{-b^2 + (\kappa_1 h_1)^2}\right]}{1 + \frac{\mu_2}{\mu_3} \sqrt{\frac{c^2 - (\kappa_1 h_1)^2}{-b^2 + (\kappa_1 h_1)^2}} \tan\left[\frac{h_2}{h_1} \sqrt{-b^2 + (\kappa_1 h_1)^2}\right]}$$

$$(4)$$

式中 $b = k_0 h_1 \sqrt{\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_2 \mu_2}$, $c = k_0 h_1 \sqrt{\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_3 \mu_3}$ 。

3 振荡导模

在左手材料光波导中, 横向波数为实数的导模称为振荡导模, 这种导模和传统介质平板波导的导模形成的机理相同, 这种导模的光强聚集于平板中, 也有人称这种导模为快波^[16]。假设 $k_0^2 \epsilon_1 \mu_1 > k_0^2 \epsilon_2 \mu_2 > \beta^2 > k_0^2 \epsilon_3 \mu_3$, 振荡导模存在于芯子层和中间传统材料层。模式本征方程(4)式是超越方程, 不能得到解析解, 因此采用作图法来求解 $\kappa_1 h_1$ 的值, 传播常数 β 可由关系式 $\kappa_1 = (k_0^2 \epsilon_1 \mu_1 - \beta^2)^{1/2}$ 得到。不同的 $\kappa_1 h_1$ 的值就对应相应的导模。导模的解还与芯子层和中间传统材料层的厚度 h_1, h_2 有关。当中间两层介质的厚度不相同导模性质类似, 以 $h_2 > h_1$ 为例来讨论导模情况。

图 2 画出了函数 $\tan(\kappa_1 h_1)$ 和 $F(\kappa_1 h_1)$ 关于 $\kappa_1 h_1$ 的曲线, 交点对应不同导模的解。对于给定的波导参数, 对应于交点的 $\kappa_1 h_1$ 的值可以从图上直接得到, 相应的导模的电场分布表示在图 3 中。图 3 对

应于图 2 中六个交点的模式分别为 $TE_2, TE_3, TE_6, TE_7, TE_8$ 和 TE_{11} 。可以看出在这个波导结构中, 低阶模式 TE_0 和 TE_1 不存在, 模式 TE_4, TE_5, TE_9 和 TE_{10} 缺失, 利用这种模式缺失性质, 有望实现按不同需求选择相应的导波模式传输^[10, 11]。

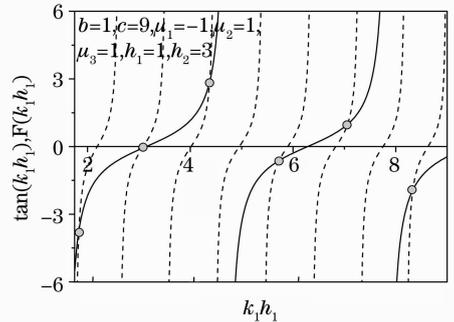


图 2 包含左手材料的四层波导振荡导模的图解法
Fig. 2 Graphical determination of $\kappa_1 h_1$ for oscillating guided modes of a four-layer LHM slab waveguide

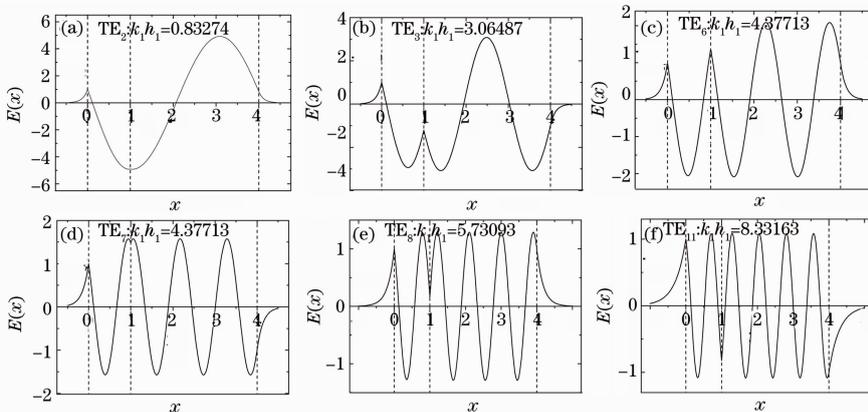


图 3 对应图 2 中六个交点的导模的电场分布。

Fig. 3 The transverse profiles of the guided modes corresponding to the six intersections in Fig. 2

当芯子层和中间传统材料层的厚度相等时,即 $h_2 = h_1$, 在给定的波导参数下, 图 4 中画出了 $\tan(\kappa_1 h_1)$ 和 $F(\kappa_1 h_1)$ 关于 $\kappa_1 h_1$ 的函数关系曲线, $b^2 = 0.2, c^2 = 2, \mu_1 = -1, \mu_2 = \mu_3 = 1, h_1 = h_2 = 1$. 可以看出, 此左手材料光波导存在基模, 但

是基模在三层左手材料波导中并不存在^[16,20], 因此, 支持基模传输是包含左手材料的四层光波导的一个重要性质. 当中间 2 层介质厚度相等时, 同样存在模式缺失现象, 这与中间 2 层介质厚度不相等时性质类似.

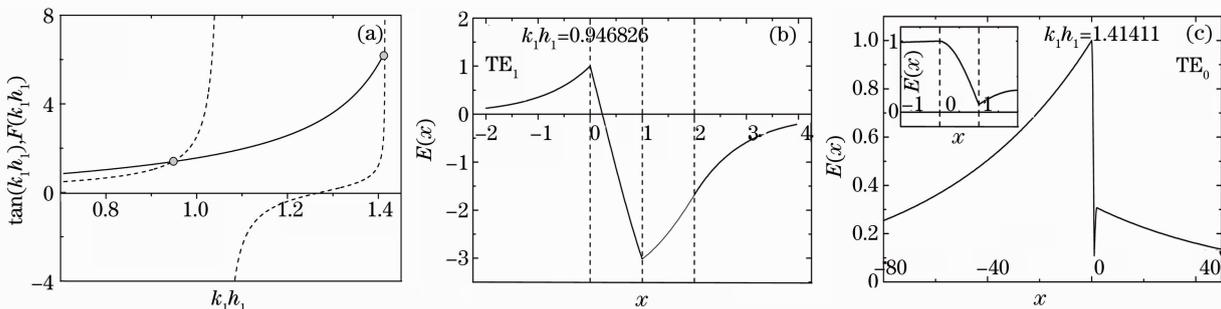


图 4 (a)包含左手材料的四层波导低阶振荡导模的图解法。(b) TE_1 电场分布, (c) TE_0 电场分布

Fig. 4 (a) Graphical determination of $\kappa_1 h_1$, (b) corresponding transverse profiles for low-order oscillating guided mode TE_1 , (c) transverse profiles for guided mode TE_0

假设 $\beta^2 < k_0^2 \epsilon_1 \mu_1, \beta^2 > k_0^2 \epsilon_2 \mu_2, \beta^2 > k_0^2 \epsilon_3 \mu_3$, 此时 $\kappa_2 = i\alpha_2$, 场在左手材料层是振荡的, 在中间传统材料层、覆盖层和衬底是衰减的, 函数 $\tan(\kappa_1 h_1)$ 和 $F(\kappa_1 h_1)$ 关于 $\kappa_1 h_1$ 的曲线以及相应的场分布分别表示在图 5 和图 6 中. 在芯子层和衬底边界 $x=0$ 上进行场振幅归一化. 由图 5、图 6 可知, 基模 TE_0 不存在, 并且 TE_1 模在给定的参数下与高阶导模 TE_2, TE_3, TE_4, TE_5 不能同时存在; 但是 TE_1 模在某些特定的波导参数下可以存在, 图 7 表示特定参数下存在的 TE_1 模的图解法和相应的电场分布. 这种情形下, 左手材料芯子层存在振荡场, 而中间传统材料层存在衰减场, 此四层波导与不对称的三层

左手材料光波导等效^[20].

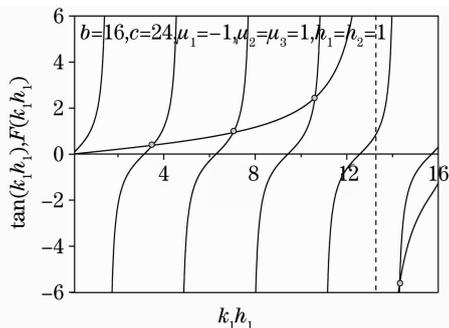


图 5 包含左手材料的四层平板波导导模的图解法
Fig. 5 Graphical determination of $\kappa_1 h_1$ for oscillating guided modes of a four-layer LHM slab waveguide

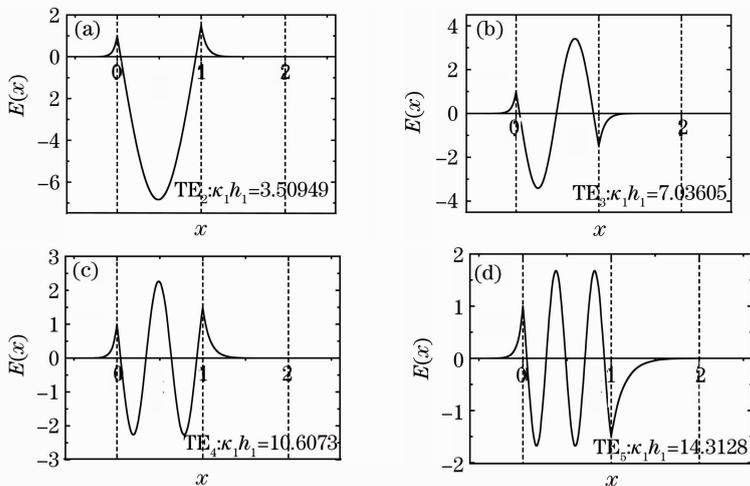


图 6 对应图 5 中四个交点的振荡导模的电场分布

Fig. 6 The transverse profiles of the oscillating guided modes corresponding to the four intersecions in Fig. 5

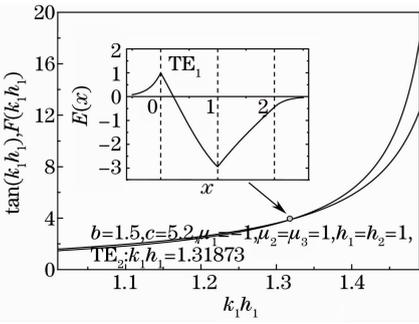


图 7 含左手材料四层波导中低阶振荡导模的图解法以及相应的电场分布

Fig. 7 Graphical determination of $\kappa_1 h_1$ and corresponding transverse profile for TE₁ in the four-layer LHM slab waveguide

4 表面导模

表面等离子体波是约束在两种介质界面上传播

的一种电磁波,其场随离开界面的距离按指数规律衰减。在左手材料出现以前,等离子体波一般指的是金属和介质的界面上传播的波。对左手材料而言,它的介电常数和磁导率都是负值,而传统材料的介电常数和磁导率都是正值,因此在左手材料和传统材料界面上可以传播 TE 偏振和 TM 偏振的表面等离子体波。由于表面等离子波的存在,引起的横向波数为虚数的导模可以在波导中传播^[17],这类横向波数为虚数的导模称为表面导模^[20,23],或称为慢波^[16]。左手材料光波导既可以支持振荡导模,也可以支持表面导模。不同的是,在表面导模中,其光强会聚于左手材料和传统介质的界面上。下面具体讨论一下此左手材料光波导中的 TE 偏振的表面导模, TM 偏振的表面导模可以做类似分析。

假设 $\beta^2 < k_0^2 \epsilon_2 \mu_2, \beta^2 > k_0^2 \epsilon_1 \mu_1, \beta^2 > k_0^2 \epsilon_3 \mu_3, \kappa_1 = i\alpha_1$, 模式本征方程(3)式改写为

$$\tanh(\alpha_1 h_1) = - \frac{\frac{\mu_1}{\mu_3} \frac{\sqrt{t^2 + (\alpha_1 h_1)^2}}{\alpha_1 h_1} + \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{\sqrt{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}}{\alpha_1 h_1} \frac{\mu_2}{\mu_3} \sqrt{\frac{t^2 + (\alpha_1 h_1)^2}{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}} - \tan\left[\frac{h_2}{h_1} \sqrt{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}\right]}{1 + \frac{\mu_2}{\mu_3} \sqrt{\frac{t^2 + (\alpha_1 h_1)^2}{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}} \tan\left[\frac{h_2}{h_1} \sqrt{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}\right]},$$

$$1 + \frac{\mu_1}{\mu_3} \frac{\sqrt{t^2 + (\alpha_1 h_1)^2}}{\alpha_1 h_1} \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{\sqrt{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}}{\alpha_1 h_1} \frac{\mu_2}{\mu_3} \sqrt{\frac{t^2 + (\alpha_1 h_1)^2}{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}} - \tan\left[\frac{h_2}{h_1} \sqrt{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}\right]}{1 + \frac{\mu_2}{\mu_3} \sqrt{\frac{t^2 + (\alpha_1 h_1)^2}{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}} \tan\left[\frac{h_2}{h_1} \sqrt{s^2 - (\alpha_1 h_1)^2}\right]} \quad (5)$$

式中 $s = k_0 h_1 \sqrt{\epsilon_2 \mu_2 - \epsilon_1 \mu_1}, t = k_0 h_1 \sqrt{\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_3 \mu_3}$ 。我们定义(5)式的右边为 $H(\alpha_1 h_1)$ 。

图 8 中画出了 $\tanh(\alpha_1 h_1)$ 和 $H(\alpha_1 h_1)$ 关于 $\alpha_1 h_1$ 的关系曲线,相应的场分布表示在图 9 中。可以发现,当衬底、左手材料芯子层和覆盖层都是衰减场时,光波导可以支持多个表面模,它们是 TE₁, TE₂, TE₃ 和 TE₃, 导模序数由低到高逐渐增加,此性质可以用来实现多模传输^[10, 11], 并且波导支持两个 TE₃ 模,模式兼并的情况出现。此外,在特定波导参数下 $\tanh(\alpha_1 h_1)$ 和 $H(\alpha_1 h_1)$ 关于 $\alpha_1 h_1$ 的曲线和相应的场分布表示在图 10 中。由图可见,波导中仅存在基模 TE₀, 它与高阶导模不能同时存在,这个特别的性质对于左手材料单模波导^[10, 11]有很大应用前景。

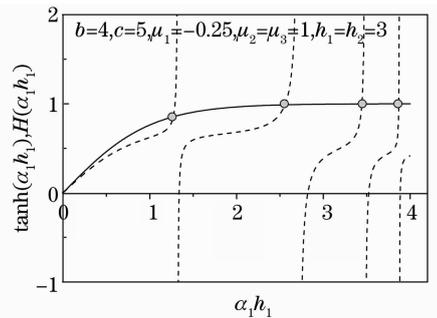


图 8 含左手材料的四层波导表面导模的图解法
Fig. 8 Graphical determination of $\alpha_1 h_1$ for surface guided modes in the four-layer LHM slab waveguide

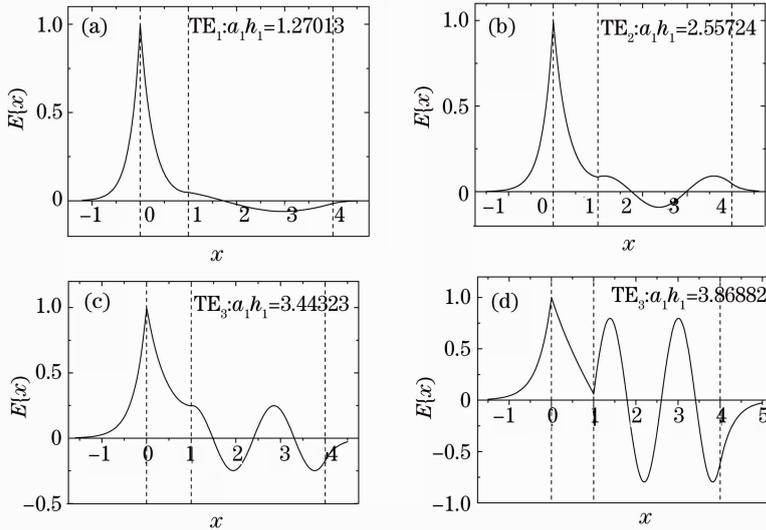


图 9 对应图 8 中四个交点的表面导模的电场分布

Fig. 9 The transverse profiles of the surface guided modes corresponding to the four intersections in Fig. 8

假设 $\beta^2 > k_0^2 \epsilon_1 \mu_1, \beta^2 > k_0^2 \epsilon_2 \mu_2, \beta^2 > k_0^2 \epsilon_3 \mu_3$, 此时 $\kappa_1 = i\alpha_1, \kappa_2 = i\alpha_2$, 模式本征方程(3)式可改写为

$$\tanh(\alpha_1 h_1) = - \frac{\frac{\mu_1}{\mu_3} \frac{\sqrt{n^2 + (\alpha_1 h_1)^2}}{\alpha_1 h_1} + \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{\sqrt{m^2 + (\alpha_1 h_1)^2}}{\alpha_1 h_1}}{1 + \frac{\mu_2}{\mu_3} \frac{\sqrt{n^2 + (\alpha_1 h_1)^2}}{\sqrt{m^2 + (\alpha_1 h_1)^2}} + \tanh\left[\frac{h_2}{h_1} \sqrt{m^2 + (\alpha_1 h_1)^2}\right]}, \quad (6)$$

式中 $m = k_0 h_1 \sqrt{\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_2 \mu_2}, n = k_0 h_1 \times \sqrt{\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_3 \mu_3}$. 我们定义方程(6)式的右边为 $U(\alpha_1 h_1)$.

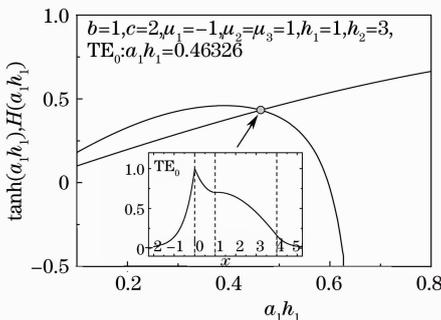


图 10 含有左手材料的四层波导中表面导模 TE₀ 的图解法以及相应的电场分布

Fig. 10 Graphical determination of $\alpha_1 h_1$ and corresponding transverse profile for TE₀ in the four-layer LHM slab waveguide

图 11 画出了 μ_1/μ_2 为不同比值时 $\tanh(\alpha_1 h_1)$ 和 $U(\alpha_1 h_1)$ 关于 $\alpha_1 h_1$ 的关系曲线, 以及 $\mu_1/\mu_2 = -0.2$ 时表面导模 TE₁ 和 TE₀ 的电场分布. 电场振

幅在芯子层和衬底边界上进行归一化. 可以看出, 当 $-0.15 \leq \mu_1/\mu_2 < 0$ 或 $-0.7 \leq \mu_1/\mu_2 \leq -0.66$ 时, 曲线有一个交点, 即只支持一个模式; 当 $-0.66 < \mu_1/\mu_2 < -0.15$ 时, 曲线有两个交点, 即支持 TE₀ 和 TE₁. 由此可见, 当芯子层以及其他三层都为衰减场时, 此四层光波导等效于三层不对称左手材料光波导^[20], 两种波导中表面导模的性质类似.

5 结 论

研究了中间两层分别是左手材料芯子层和传统材料层, 覆盖层和衬底由同种传统材料构成的四层光波导系统, 着重分析 TE 偏振波在该波导中的传播特性. 应用图解法分析该波导中存在的各种导波模式的解. 研究表明, 该左手材料波导既能支持振荡导模又能支持表面导模. 若左手材料芯子层支持振荡导模并且中间传统材料层支持振荡场, 该波导

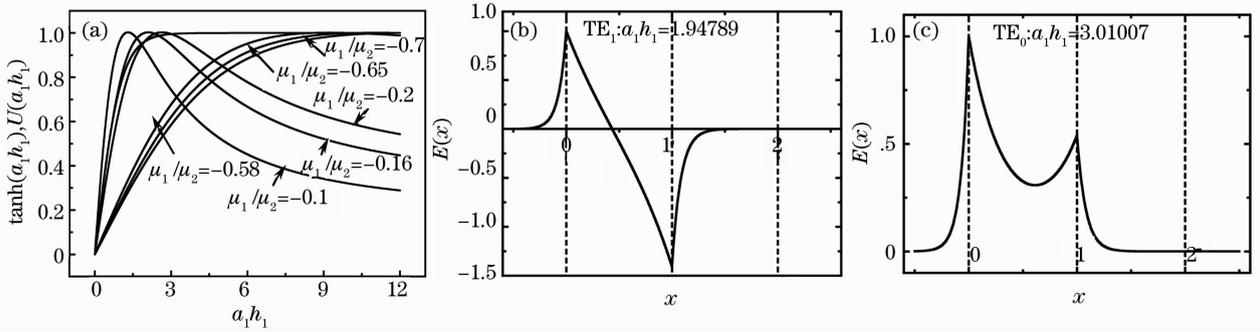


图 11 (a)含有左手材料的四层波导中表面导模的图解法, (b) $\mu_1/\mu_2 = -0.2$ 时 TE_1

的电场分布, (c) $\mu_1/\mu_2 = -0.2$ 时 TE_0 的电场分布。参数为: $b = 12, c = 14, \mu_1 = -0.2, \mu_2 = \mu_3 = 1, h_1 = h_2 = 1$

Fig. 11 (a) Graphical determination of $\alpha_1 h_1$, (b) transverse profile for surface guided mode TE_1 , (c) transverse profile for surface guided mode TE_0 when $\mu_1/\mu_2 = -0.2$ in a four-layer LHM slab waveguide. The parameters are $b = 12, c = 14, \mu_1 = -0.2, \mu_2 = \mu_3 = 1, h_1 = h_2 = 1$

结构表现出特有的性质:基模出现,而三层的左手材料波导结构在任何情形下都不支持基模;此外,模式缺失现象也是包含左手材料的四层光波导的一个新奇的性质。当左手材料芯子层支持表面导模并且中间传统材料层支持振荡场时,此光波导可以支持多个低阶及高阶导波模式,但是基模与高阶模不能同时存在,并且高阶模出现模式兼并的性质。若中间传统材料层支持衰减场,此时的光波导结构与三层非对称左手材料光波导等效:基模在任何条件下都不存在,并且模式序数由低到高逐渐增加;此时波导中存在两类表面导模,一类是电场场幅与坐标轴没有交点的 TE_0 模,另一类是电场场幅与坐标轴有一个交点的 TE_1 模。这些新的模式特征对制作新型单模波导以及其它光波导器件有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 V. G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4): 509~514
- 2 R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**: 77~79
- 3 Atsushi Ishikawa, Takuo Tanaka, Satoshi Kawata. Negative magnetic permeability in the visible light region[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(23): 237401
- 4 O. Voskoboinikov, G. Dyankov, C. M. J. Wijers. Left handed composite materials in the optical range[J]. *Microelectronics Journal*, 2005, **36**(6): 564~566
- 5 G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener *et al.*. Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(1): 53~55
- 6 J. B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966~3969
- 7 S. Antipov, L. Spentzouris, W. Gai *et al.*. Double-negative metamaterial research for accelerator applications [J]. *Nucl. Instruments and Methods in Physics Research A.*, 2007, **579**(3):

915~923

- 8 Liu Liu, Sailing He. Near-field optical storage system using a solid immersion lens with a left-handed material slab [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(20): 4835~4840
- 9 A. Pimenov, A. Loidl, K. Gehrke *et al.*. Negative refraction observed in a metallic ferromagnet in the gigahertz frequency range [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(19): 197401
- 10 Min-Suk Kwon, Sang-Yung Shin. Filter using vertical coupling between a single-mode waveguide and a multimode waveguide [J]. *Integrated Photonics Research*, 2002: IFG2
- 11 M. Maiorov, R. Menna, A. Komissarov *et al.*. InGaAsP/InP broad-waveguide single-mode ridge-waveguide lasers [J]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2001: WC2
- 12 Liu Shijing, Zhou Haifeng, Yang Jianyi *et al.*. Filtering characteristic and application of the nonreciprocal waveguide grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1906~1909
刘仕景,周海峰,杨建义等. 非互易波导光栅的滤波特性与应用 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1906~1909
- 13 Liu Jing, Zheng Zhiqiang, Feng Zhuohong *et al.*. Tunable optical filter based on two-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2034~2037
刘 璟,郑志强,冯卓宏等. 二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- 14 Li Mi, Yu Siyuan, Ma Jing *et al.*. Research on the design of $LiNbO_3$ waveguide intensity modulator with a new back slot structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 410~413
李 密,于思源,马 晶等. 新型衬底开槽结构的 $LiNbO_3$ 波导强度调制器设计分析 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 410~413
- 15 Andrea Alu, Nader Engheta. Guided modes in a waveguide filled with a pair of single-negative (SNG), double-negative (DNG), and/or double-positive (DPS) layers [J]. *IEEE Tans. Micro. Theo. Tech.*, 2004, **52**(1): 199~209
- 16 I. V. Shadrivov, A. A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar. Guided modes in negative-refractive-index waveguides [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(5): 057602
- 17 Bae-Ian Wu, Tomasz M. Grzegorzczak, Yan Zhang *et al.*. Guided modes with imaginary transverse wave number in a slab waveguide with negative permittivity and permeability [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(11): 9386~9388
- 18 Zihua Wang, Zhongyin Xiao, Suping Li. Guided modes in slab waveguides with a left handed material cover or substrate [J].

- Opt. Comm.*, 2008, **281**(4): 607~613
- 19 Wang Xinglin, Wang Qi, Shi Jielong *et al.*. Guided modes in a thin dielectric film symmetrically bounded by left-handed media [J]. *Chinese. J. Quant. Electron.*, 2006, **23**(5): 719~724
王兴林,王 奇,施解龙 等. 左手系材料对称平板结构中的波导模[J]. 量子电子学报, 2006, **23**(5): 719~724
- 20 Ying He, Zhuangqi Cao, Qishun Shen. Guided optical modes in asymmetric left-handed waveguides [J]. *Opt. Comm.*, 2005, **245**(2): 125~135
- 21 Slobodan M. Vukovic, Najdan B. Aleksic, Dejan V. Timotijevic. Guided modes in left-handed waveguides [J]. *Opt. Comm.*, 2008, **281**(6): 1500~1509
- 22 Zhongyin Xiao, Zihua Wang. Dispersion characteristics of asymmetric double-negative material slab waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2006, **23**(9): 1757~1760
- 23 Ying He, Jing Zhang, Chunfang Li. Guided modes in a symmetric five-layer left-handed waveguide [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2008, **25**(12): 2081~2091