

文章编号: 0253-2239(2007)06-1111-5

熔锥型熊猫光纤耦合器的传输特性分析*

吴宇列 郑煜 李圣怡 王金娥

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 熔锥型保偏耦合器的传输特性决定了其光学原理与功能的实现。为了从理论上分析各参量对保偏耦合器传输特性的影响, 基于热-结构-电磁多物理场耦合理论, 建立了熔锥型熊猫光纤耦合器双锥模型, 应用有限元法, 分析了各参量对熊猫光纤耦合器传输特性的影响。结果表明应力区与包层折射率差影响耦合区纵向电磁场的分布, 折射率差越大, 纵向电磁场分布的变形也越大; HE_{11}^* 模和 HE_{11}^* 模的传播常量对偏振主轴角度差不敏感, 偏振主轴角度差是通过耦合系数进而影响保偏光纤耦合器的消光比的; HE_{11}^* 模的传播常量对熔锥的熔锥区横截面椭圆率比较敏感, 横截面椭圆率变化 6.67% 时 $\Delta\beta_{11}^*$ 变化 0.14%, 计算结果表明当熔锥区横截面椭圆率为 0.56 时可获得较高性能的耦合器。

关键词: 光纤元件; 保偏耦合器; 有限元; 传输特性; 熔锥

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Propagation Properties Analysis of Fused Taper PANDA Fiber Couplers

Wu Yulie Zheng Yu Li Shengyi Wang Jin'e

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: The optics principle and functions of fused polarization-maintaining fiber coupler is determined by propagation properties. In order to investigate the effects of parameters, based on the theory of thermal-structural-electromagnetic multiphysics field interaction, the biconical models of the fused PANDA fiber coupler were given. Using finite element method the effects of the propagation properties for fused PANDA fiber coupler is analyzed. The results show that longitudinal electromagnetic field distribution is influenced by the refractive index difference between the stress applying part (SAP) and cladding, the distortion of distribution is increase with the D-valve. The propagation constants for HE_{11}^* and HE_{11}^* modes are insensitive to the angle disparity of the birefringent axes, and they affect to the extinction ratio directly by coupling coefficient. The propagation constants for HE_{11}^* mode is sensitive to the ellipticity of fused taper section, the change of $\Delta\beta_{11}^*$ is 0.14% when the ellipticity fusion is increased 6.67%, and the numerical results show that it can get high performance when the ellipticity of fused taper section is 0.56.

Key words: optical fiber component; polarization-maintaining fiber coupler; finite element method; propagation properties; fused taper

1 引言

熔锥型保偏光纤耦合器能稳定地传输两个正交的线偏振光, 并能保持各自的偏振态不变, 而且体积小、稳定性好, 因而被广泛应用于干涉型传感、相干通信等领域^[1~3]。耦合器的参量如消光比、附加损耗、耦合比等, 主要由双锥体传输特性决定, 由于制作工艺的高度敏感性以及缺乏更深入的研究, 很少

有文献对双锥体的传输特性进行报道, 已报道的仅限于电磁场分析^[4], 没有考虑制作过程中热应力导致的双折射的影响, 难以对熔锥型保偏光纤耦合器的研制应用进行较全面的指导。

本文从熊猫光纤在火焰中熔融拉锥的实际流变成形过程出发, 基于热-结构-电磁多物理场耦合理论, 应用有限元法, 首先对熔锥进行热-结构分析, 求

* 国家自然科学基金(50235040)资助课题。

作者简介: 吴宇列(1972-), 男, 湖南株州人, 副教授, 主要从事精密工程与计算机控制、光纤器件制造方面的研究。

E-mail: ylwu@nudt.edu.cn

收稿日期: 2006-08-28; 收到修改稿日期: 2006-12-01

4.2 偏振主轴角度差对耦合器传输特性的影响

实验证明,小于 0.5°的偏振主轴角度差可以有效将保偏光纤耦合器的消光比控制在-41 dB,可满足大多数场合的精度要求。然而偏振主轴角度差是通过传播常量还是耦合系数影响消光比的,相关文献报道得很少。

考察偏振主轴角度差 $\Delta\theta=0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ 三种情况,绘出耦合器熔锥区传播常量 β/β_0 随纤芯归一化频

率 ν 的变化曲线,如图 2(a)和图 4 所示。图中 $\beta_{1x}/\beta_0, \beta_{1y}/\beta_0, \beta_{3x}/\beta_0, \beta_{3y}/\beta_0, \beta_{4x}/\beta_0, \beta_{4y}/\beta_0$ 分别为偏振主轴角度差 $\Delta\theta=0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ 时, HE_{11}^x 模与 HE_{11}^y 模的传播常量。

从图 2(a)和图 4 可以看出,随着偏振主轴角度差的增加, HE_{11} 模的传播常量并无多大的变化,从而可以肯定的是偏振主轴角度差是通过耦合系数进而影响保偏光纤耦合器的消光比的。

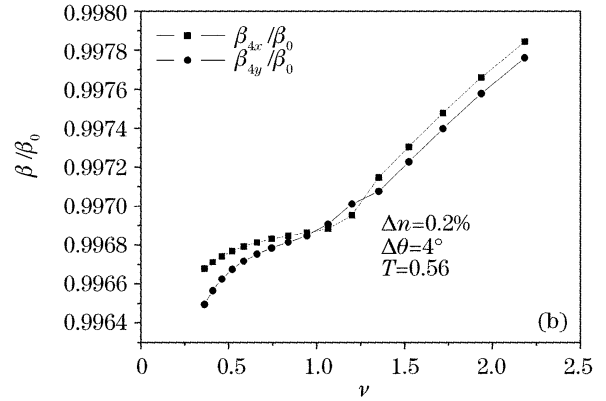
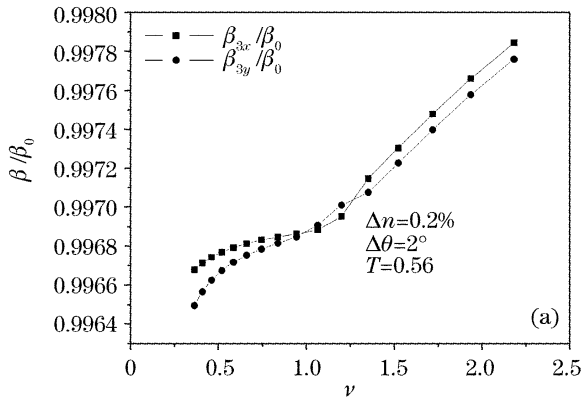


图 4 偏振主轴角度差对传播常量的影响

Fig. 4 The variation of propagation constants with angle disparity of the birefringent axes

4.3 熔锥区横截面椭圆率对耦合器传输特性的影响

熔锥型光纤耦合器的参量如耦合比、附加损耗等,主要由双锥体的形状决定。定义熔锥区横截面椭圆率为熔锥区 x 和 y 方向的宽度之比,即 $T=c/b$,如图 1(b)所示。

考察熔锥区横截面椭圆率 $T=0.56, 0.58$ 和

0.60 三种情况,绘出耦合器熔锥区传播常量 β/β_0 随纤芯归一化频率的变化曲线,如图 2(a)和图 5 所示。 $\beta_{1x}/\beta_0, \beta_{1y}/\beta_0, \beta_{5x}/\beta_0, \beta_{5y}/\beta_0, \beta_{6x}/\beta_0, \beta_{6y}/\beta_0$ 分别为熔锥区横截面椭圆率 $T=0.56, 0.58, 0.60$ 时 HE_{11}^x 模与 HE_{11}^y 模的传播常量。

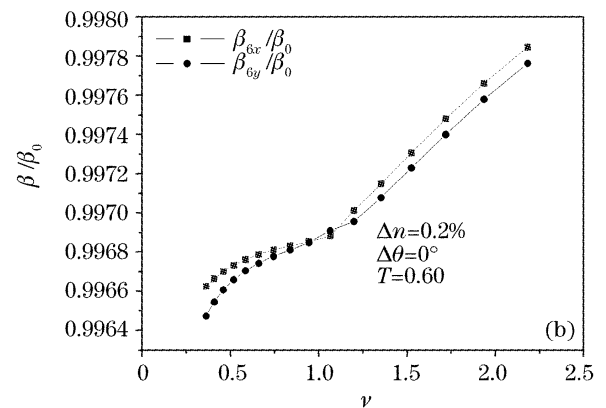
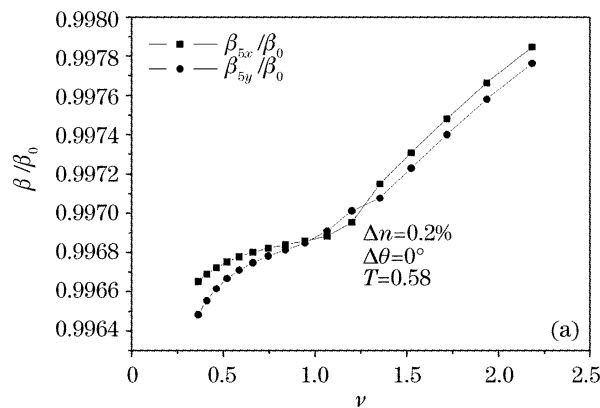


图 5 熔锥区横截面椭圆率对传播常量的影响

Fig. 5 The variation of propagation constants with the ellipticity of fused taper section

从图 2(a)和图 5 可以看出,在出现次高阶模之前,熔锥区横截面椭圆率的改变对 HE_{11} 模的传播常量影响不大,随着椭圆率的变化,传输常量几乎没有改变;出现次高阶模之后,随着熔锥区横截面椭圆率的增加, HE_{11} 模的传播常量减小,其中 HE_{11}^x 模的传播常量相对敏感一些,当熔锥区横截面椭圆率从 0.56 变化到 0.60 时(相对变化 6.67%), $\Delta\beta_{11}^x$ 增加

0.14%。熔锥区横截面椭圆率越大,熔锥的长度也就越短,锥体陡峭,冷却过程中易形成微观裂纹,导致较大的附加损耗;熔锥区横截面椭圆率越小,熔锥的长度也越长,锥体平缓,但过长束腰太细,亦会引起较大的附加损耗;只有合适的椭圆率,才能保证低的附加损耗,结果表明,当 $T=0.56$ 时可获得较高性能的耦合器。

5 结 论

基于热-结构-电磁多物理场耦合理论,应用有限元法,给出了应力区与包层折射率差、偏振主轴角度差、熔锥区横截面椭圆率等参量对熊猫光纤耦合器传输特性的影响规律。该结论对熔锥型熊猫光纤耦合器的工艺改进具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Zhou Xiaojun, Gong Junjie, Liu Yongzhi *et al.*. Analysis of white-light interference distributed optic fiber sensor by polarized modes coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 605~608 (in Chinese)
周晓军,龚俊杰,刘永智等. 白光干涉偏振模耦合分布式光纤传感器分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 605~608
- 2 Zhang Jinghua, Wang Chunhua, Huang Zhaoming. Application of white-light interference in measurement and principal axis alignment of polarization-maintaining fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(12): 1308~1311 (in Chinese)
张靖华,王春华,黄肇明. 白光干涉在保偏光纤测量与对轴中的应用[J]. *光学学报*, 1994, **14**(12): 1308~1311
- 3 Liu Guoxiang, Hu Li, Ye Kunzhen *et al.*. Characters of acousto-optic intensity modulation based on optical fiber fused taper coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1498~1500
刘国祥,胡力,叶昆珍等. 光纤熔锥耦合器的声光调制特性[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1498~1500
- 4 I. Yokohama. Analysis of mode coupling behavior in fused polarization-maintaining fiber couplers[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(19): 4216~4225
- 5 Xu Zhilun. *Mechanics of Elasticity* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 161~192 (in Chinese)
徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 161~192
- 6 Y. A. Liu, B. M. A. Rahman. Analysis of the birefringence properties of optical fibers made by a perform deformation technique[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(2): 142~147
- 7 A. W. Snyder, J. D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. London: Chapman and Hall Ltd., 1983. 551~566
- 8 I. Yokohama, K. Chida, J. Noda. Low excess loss conditions of polarization-maintaining fiber coupler [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(23): 4807~4813

征 订 启 事

第八届全国激光加工学术论文集——《中国激光》2007年增刊,已于2007年3月出版。论文集较全面地反映了近年来我国激光加工技术研究、应用和产业化的最新成果,包括激光连接(焊接、钎焊),激光去除(切割、打孔、清洗、抛光等),激光强化(合金化、熔覆、沉积等),激光制备新材料,激光快速成形与激光快速制造,激光复合加工技术,激光微纳米技术,激光加工新技术与新应用,激光加工过程检测与控制,新型激光器件与光加工系统等领域,作者来自于国内近40个大专院校、科研机构和企业。是广大激光加工领域工作者的非常有价值的参考资料。

论文集约400页,定价100元,进口雅光纸精印,光盘版定价80元,欢迎读者订阅。

联系人:高先生 电 话:021-69918253

解应力双折射及其引起的折射率的变化,以此作为初始条件,进行光纤耦合器的模式分析,得到其传输特性。

2 计算原理

2.1 热-结构耦合原理

熊猫光纤的双折射主要是由于应力区、纤芯和包层的热膨胀系数不同而引起的,在耦合器熔融拉锥流变成形过程中,同样会在耦合器内部产生应力场,形成双折射效应。计算分析的时候可以把它看成是平面应变问题,根据热-结构耦合方程有^[5]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \mathbf{D} \left\{ \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (1+\nu)\alpha(T-T_{\text{ref}}) \\ (1+\nu)\alpha(T-T_{\text{ref}}) \\ 0 \end{bmatrix} \right\}, \quad (1)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times [\nu\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y - (1+\nu)\alpha(T-T_{\text{ref}})], \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{\nu} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 E 为材料的弹性模量, T 为计算温度, T_{ref} 为参考温度, α 为材料的热膨胀系数, ν 为泊松比, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为沿 x 、 y 和 z 轴向的正应力, τ_{xy} 为切应力, ε_x 、 ε_y 为沿 x 、 y 轴向的正应变, γ_{xy} 为切应变。

根据光弹理论,各区域的折射率和应力间的关系为^[6]

$$\begin{cases} N_x = N_0 + C_1\sigma_x + C_2(\sigma_y + \sigma_z), \\ N_y = N_0 + C_1\sigma_y + C_2(\sigma_x + \sigma_z), \\ N_z = N_0 + C_1\sigma_z + C_2(\sigma_x + \sigma_y), \end{cases} \quad (4)$$

式中 N_x 、 N_y 和 N_z 为有应力时沿 x 、 y 和 z 轴的折射率, N_0 为无应力时的折射率, C_1 、 C_2 为光弹系数。

2.2 光纤传输数值分析原理

在光纤耦合器的横截面内,折射率是位置的函数,根据(4)式,计入应力双折射效应,可得

$$n(x, y) = \begin{bmatrix} N_x & 0 & 0 \\ 0 & N_y & 0 \\ 0 & 0 & N_z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$n(x, y)$ 为熔锥截面的折射率分布函数,呈各向异

性,则光波场的任意一个分量满足^[7]

$$\nabla^2 \psi(x, y) + [k_0^2 n^2(x, y) - \beta^2] \psi(x, y) = 0, \quad (6)$$

式中 $\psi(x, y)$ 为场分量; k_0 为真空中的波数; β 为传播常量。

保偏光纤是特殊的单模光纤,只能传输基模,而基模的能量主要分布在纤芯,在耦合器熔融拉锥流变成形过程中,随着拉伸长度的增加,芯径随之减小,当纤芯归一化频率 $V(V = 2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / \lambda, a$ 为纤芯半径, λ 为工作波长, n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率) 降至一定程度时,纤芯对基模传输的约束作用降低而致使光场渐跃进包层,形成包层模,此时可看作是以包层-空气为介质的特殊光波导。分析可知,在模型的外边界可以设置为理想磁导体边界,即磁场在边界的切向量为 0,纤芯和包层以及应力区和包层界面的边界条件可以设置为电磁场强度切向连续,电磁通量密度的法线方向是连续的。即可得到截面的电磁场能量函数

$$I = \frac{1}{2} \int_{\Omega} [|\nabla \psi|^2 - (k_0^2 n^2 - \beta^2) \psi^2] dx dy. \quad (7)$$

利用有限元法求解需将求解区域划分为相互连接的子区域,对每个子区域中的场函数,可近似用线性函数来表示,即

$$\psi(x, y) = p_0^e + p_1^e x + p_2^e y, \quad (8)$$

式中 p_0^e 、 p_1^e 和 p_2^e 为常量, e 表示某个子区域顶点序号 i 、 k 和 k 。应用有限元理论(7)式可化为

$$I = \{\psi\}^T \mathbf{C} \{\psi\}, \quad (9)$$

式中 $\{\psi\}$ 为有限元节点的矢量场, \mathbf{C} 为 $[M \times M]$ 的系数矩阵,上标 T 代表不转置矩阵。令 $I = 0$, 可得

$$\mathbf{C} \{\psi\} = 0, \quad (10)$$

求解(10)式的特征值和特征向量,即可获得熔锥型保偏光纤耦合器截面的传播常量和电磁场分布函数。

3 熔锥型熊猫光纤耦合器模型

熔锥型熊猫光纤耦合器的结构如图 1(a)所示。以截面中心为坐标原点,两纤芯的连线为 y 轴, $\Delta\theta$ 为两光纤未对好轴时偏振主轴角度差。 x 或 y 轴偏振光被分成两束保持线形偏振态的光。熔融区的锥形长度、最大直径和束腰直径分别用 L 、 b_{max} 和 b_{min} 表示。截面几何关系如图 1(b)所示。

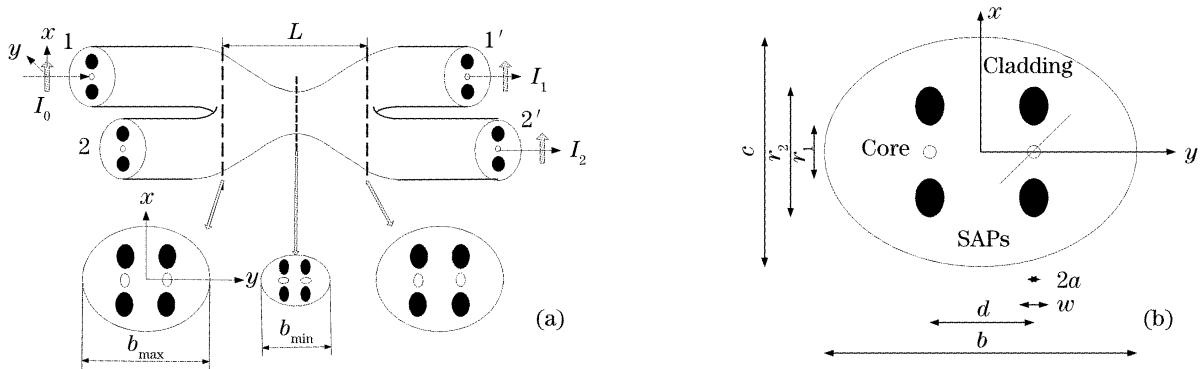


图 1 熔锥型熊猫光纤耦合器结构图(a)和截面图(b)

Fig. 1 Schematic configuration (a) and cross section (b) of fused taper PANDA fiber coupler

4 计算结果分析与讨论

4.1 应力区与包层折射率差对耦合器传输特性的影响

熊猫光纤通常具有低折射率应力施加部分,在熔锥型熊猫光纤耦合器研究的初期阶段,均采用折射率非匹配型光纤,即应力区与包层折射率相差较大($\Delta n \approx 0.5\%$),制作得到的耦合器附加损耗较大,约 3 dB,后来研究发现采用折射率匹配型光纤,即应力区与包层折射率相差较小($\Delta n \leq 0.2\%$),可得

到附加损耗低于 0.1 dB 的耦合器^[8]。

考察应力区与包层折射率相差 $\Delta n = 0.2\%$ 和 $\Delta n = 0$ 两种情况,绘出耦合器熔锥区传播常量 β/β_0 随纤芯归一化频率 ν 的变化曲线,如图 2 所示。说明 β_{1x}/β_0 、 β_{1y}/β_0 为应力区与包层折射率相差 $\Delta n = 0.2\%$ 时 HE_{11}^x 模与 HE_{11}^y 模的传播常量, β_{2x}/β_0 、 β_{2y}/β_0 为应力区与包层折射率相差 $\Delta n = 0$ 时 HE_{11}^x 模与 HE_{11}^y 模的传播常量。

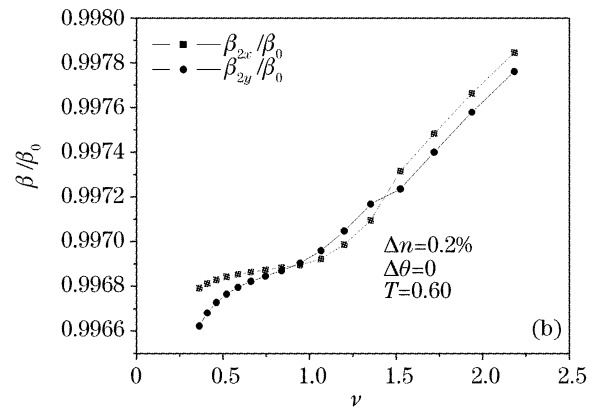
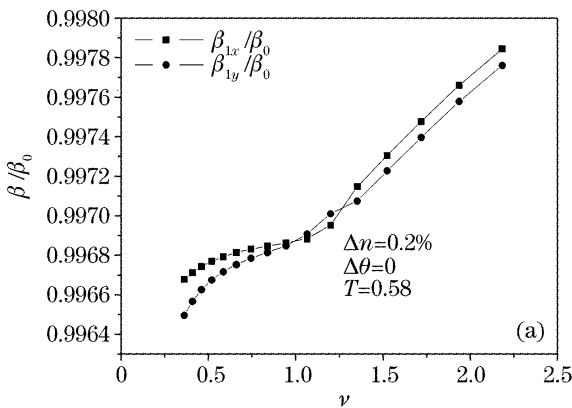


图 2 应力区与包层折射率差对传播常量的影响

Fig. 2 The variation of propagation constants with the refractive index difference between the stress applying part and cladding

从图 2 可以看出,在出现次高阶模之前应力区与包层折射率差对 HE_{11} 模的传播常量影响不大;出现次高阶模之后,应力区与包层折射率差增加, HE_{11} 模的传播常量减小,且 $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$ 增加。若应力区与包层无折射率差,由于光弹效应,也会导致应力区的折射率略低于包层, $\Delta n = n_{\text{clad}} - n_{\text{SAP}} = 0.7\%$;若应力区与包层折射率差为 0.2% ,并计上光弹效应的影响, $\Delta n = n_{\text{clad}} - n_{\text{SAP}} = 0.95\%$ 。由于应力区的折射率低于包层的,故而沿慢轴扩散的纵向电磁场避开应力区向包层扩散,如图 3 所示,折射率差越大,纵向电磁场分布的变形也越大,所获得耦合器的附加损耗也越大。

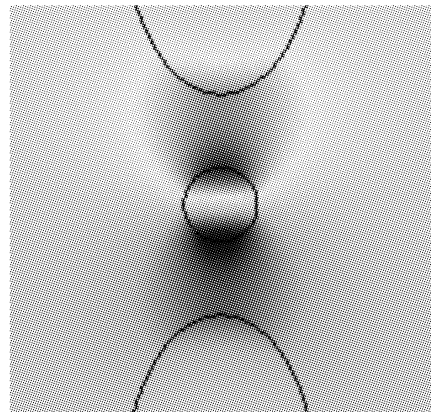


图 3 HE_{11}^x 模纵向电场分布

Fig. 3 Longitudinal electric field distribution of HE_{11}^x mode