

# 含薄介电层微纳光纤的模场特性

杨琳 赵楚军 文双春\* 范滇元

(湖南大学计算机与通信学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南长沙 410082)

**摘要** 基于光纤模式理论,数值研究了含有介电薄层微纳光纤的模场特性,尤其是薄介电层厚度和折射率对模场和能流密度的影响。结果表明,介电薄层的引入对微纳光纤纤芯和薄介电层中的模场特性影响不大,但对外包层中的模场影响较大。

**关键词** 微纳光纤; 介电薄层; 模场; 能流密度

**中图分类号** TN248

**OCIS** 160.4236 060.2400

**文献标识码** A

## Modal Characteristics of Micro/Nano Fiber with a Thin Refractive Index Layer

Yang Lin Zhao Chujun Wen Shuangchun Fan Dianyuan

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices, Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** Based on exact solutions of Maxwell's equations of a three-layer structured cylindrical waveguide, the electromagnetic wave propagation characteristics of the thin index dielectric coated micro/nano fiber have been studied. The influences of thickness and refractive index on the modal characteristics and energy flow density have been discussed in detail. Numerical simulations show that the modal characteristics vary little in the fiber core and thin dielectric regions, while vary much in the fiber outer cladding.

**Key words** micro/nano fiber; thin dielectric layer; modal field; energy flow density

## 1 引言

微纳光纤具有低传输损耗、大比例倏逝波和小尺度等特性<sup>[1~3]</sup>,被广泛应用于制备光耦合器、光调制器、高Q值谐振腔、激光器和传感器,在光通信、传感<sup>[4~6]</sup>和非线性光学<sup>[7~9]</sup>等领域具有良好的应用前景。对于实际制备的微纳光纤<sup>[10~12]</sup>,由于氧化等原因,难免会在纤芯外引入一附加薄介电层,这一薄层的引入必将改变其导波特性和模场特性。细致研究薄介电层对微纳光纤传输特性的影响,对微纳光纤的制备及应用具有重要参考价值。

已有研究表明,当微纳光纤纤芯外引入一薄介电层时,其色散位移会发生很大变化。对于300 nm芯径的硅微纳光纤,如果引入1%的氧化硅层,在1450 nm处的色散会减低34%<sup>[13]</sup>。但是介电薄层对光纤模场特性的影响至今还没有报道,而模场特性的改变直接影响到微纳光纤在光纤传感、微纳光器件等领域的应用。本文对含介电薄层微纳光纤的模场特征进行了分析,尤其是薄介电层厚度和折射率对模场和能流密度的影响。

## 2 理论模型

考虑一个无限长的中心对称的3层圆柱波导结构,光纤横截面和相关参数如图1所示。假设该结构为成分均匀的各向同性的媒质,且无磁性(其磁导率为真空中的取值 $\mu_0$ ),纤芯的半径为 $a$ ,介电层的厚度为

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-03

作者简介: 杨琳(1984-),女,硕士研究生,主要从事微纳光纤方面的研究。E-mail: yanglin84717@gmail.com

导师简介: 范滇元(1939-),男,院士,博士生导师,主要从事激光系统总体设计、光束传输理论与应用、强激光与物质相互作用等方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: scwen@hnu.cn

$\Delta=b-a$ ,包层延伸到无限远。假设纤芯折射率为  $n_s$ ,介电层的折射率为  $n_f$ ,包层折射率为  $n_c$ ,且  $n_c < n_s < n_f$ <sup>[14]</sup>。在柱坐标系中,光波沿  $z$  轴方向传播,场分量  $H_z$  和  $E_z$  满足亥姆霍兹方程<sup>[15]</sup>

$$\left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) \right] \begin{bmatrix} E_z \\ H_z \end{bmatrix} = 0, \quad (1)$$

式中  $\beta$  为传播常数。纵向场分量

$$e_z = \begin{cases} \sum_m A_m^{(1)} J_m(ur) f_c, & 0 < r < a \\ \sum_m [A_m^{(2)} \mathcal{R}_m(\nu r) + B_m^{(2)} \mathcal{Y}_m(\nu r)] f_c, & a < r < b \\ \sum_m [A_m^{(3)} K_m(\nu r)] f_c, & r > b \end{cases} \quad (2)$$

$$h_z = \begin{cases} \sum_m C_m^{(1)} J_m(ur) f_s, & 0 < r < a \\ \sum_m [C_m^{(2)} \mathcal{R}_m(\nu r) + D_m^{(2)} \mathcal{Y}_m(\nu r)] f_s, & a < r < b \\ \sum_m [C_m^{(3)} K_m(\nu r)] f_s, & r > b \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_m(ur) &= \begin{cases} I_m(ur), & \beta > k_0 n_s \\ J_m(ur), & \beta < k_0 n_s \end{cases} \\ \mathcal{R}_m(ur) &= \begin{cases} I_m(ur), & \beta > k_0 n_f \\ J_m(ur), & \beta < k_0 n_f \end{cases} \\ \mathcal{Y}_m(ur) &= \begin{cases} K_m(ur), & \beta > k_0 n_f \\ Y_m(ur), & \beta < k_0 n_f \end{cases} \end{aligned}$$

$J_m$  为  $m$  阶第一类贝塞尔函数,  $Y_m$  为  $m$  阶第二类贝塞尔函数,  $I_m$  为  $m$  阶第一类变型贝塞尔函数,  $K_m$  为  $m$  阶第二类变型贝塞尔函数。 $v^2 = k_0^2 n_f^2 - \beta^2$ ,  $u^2 = \beta^2 - k_0^2 n_s^2$ ,  $w^2 = \beta^2 - k_0^2 n_c^2$ ,  $f_c = \cos(m\phi + \varphi_m) \exp[j(\omega t - \beta z)]$ ,  $f_s = \sin(m\phi + \varphi_m) \exp[j(\omega t - \beta z)]$ 。而横向场分量为

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{j}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left( \beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\omega \mu_0}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right), & E_\phi &= -\frac{j}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left( \frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial r} \right), \\ H_r &= -\frac{j}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left( \beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \frac{\omega \epsilon_0 n^2}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right), & H_\phi &= -\frac{j}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left( \frac{\beta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \omega \epsilon_0 n^2 \frac{\partial E_z}{\partial r} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

纤芯和包层中的电磁波解必须满足纤芯与包层界面处 ( $r=a, r=b$ ) 的边界条件, 由此可以得到

$$\det[M(\beta)] = 0. \quad (5)$$

这里只讨论微纳光纤基模工作的情况<sup>[10]</sup>。通过求解行列式(5)得到相应的传播常数, 可以进一步得到群速度  $V_g$  和波导色散  $D_w$

$$V_g = \frac{dW}{d\beta} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{d\beta}, \quad D_w = \frac{dV_g^{-1}}{d\lambda}, \quad (6)$$

式中  $\lambda$  为真空中的波长,  $c$  为真空中的光速。

## 3 讨论和分析

### 3.1 模场特性

随着介电层折射率的变化, 光纤的模场分布情况会发生变化, 如图 2 所示。计算中,  $n_s = 1.45$ ,  $n_c = 1$ ,  $a = 100 \text{ nm}$ ,  $\Delta = 6 \text{ nm}$ 。当薄介电层的折射率  $n_f$  由 1.4 变化到 1.8 时, 电场的各个分量在纤芯和薄介电层中的变化都很小。在外包层中, 随着介电层折射率增加, 角向电场分量强度降低较为明显。

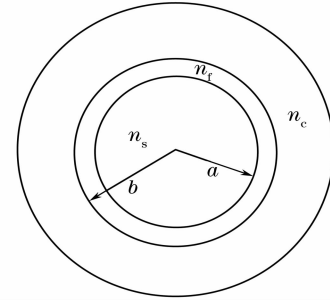


图 1 光纤的横截面和相关参数  
Fig. 1 Cross-section and parameters of the three-layer waveguide

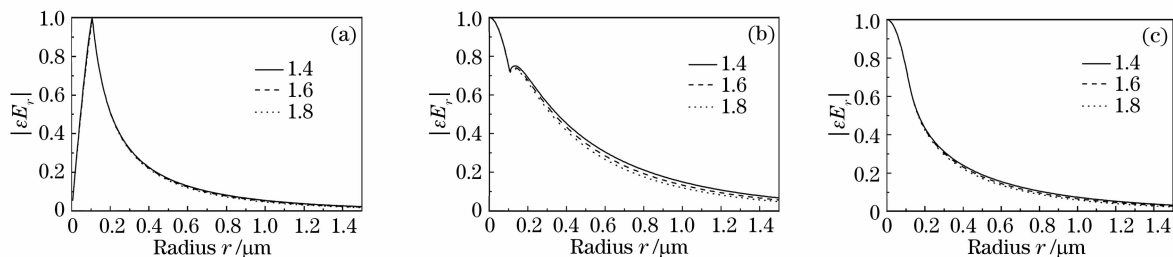


图2 介电层折射率变化时,各电场分量的变化

Fig. 2 Electric field components with different film refractive index

图3给出了介电层厚度与各电场分量的关系。计算中,  $n_s = 1.45$ ,  $n_c = 1$ ,  $n_f = 2.2$  (如  $\text{PbCl}_2$ ),  $a = 100 \text{ nm}$ 。从图3(a)可以看出,随着介电层厚度的增加,在纤芯、介电层和外包层中, $Z$ 向归一化电场分量均逐渐减小;图3(b)中,随着介电层厚度的增加,在纤芯和薄介电层区域,角向电场分量变化不大,但在外包层区域变化明显;图3(c)中,径向归一化电场分量和角向归一化电场分量变化相近,在纤芯和薄介电层区域,电场分量变化不大,但在外包层区域,径向电场随着厚度增加而下降。

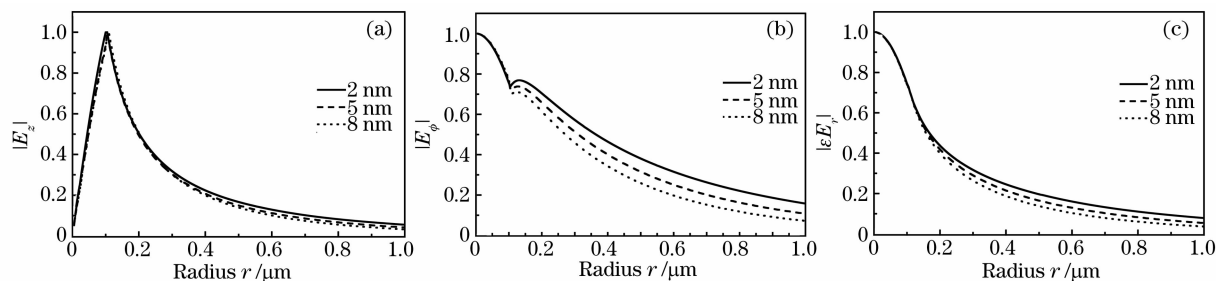
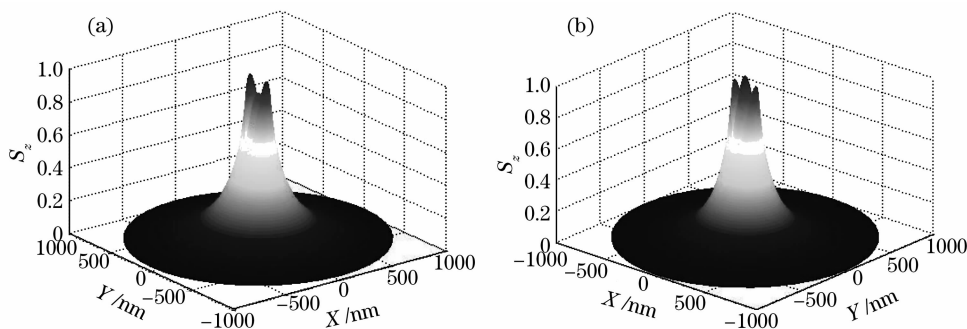


图3 介电层厚度变化时,各电场分量的变化

Fig. 3 Electric field components with different thickness

### 3.2 能流密度特性

图4给出了无薄介电层和引入介电层后,微纳光纤的能流密度分布情况。由于纤芯只有  $200 \text{ nm}$ ,所以光纤的大部分能量均以倏逝波的形式在包层中传输。在引入厚为  $5 \text{ nm}$ ,折射率为  $2.2$  的介电层后,光纤的大部分能量仍以倏逝波形式在包层中传输,但是包层中能流密度较纤芯有所降低。

图4 微纳光纤的能流密度分布。(a)无薄介电层;(b)含  $5 \text{ nm}$  厚介电层Fig. 4 Energy flow densities. (a) waveguide without film; (b) waveguide with  $5 \text{ nm}$  thickness

随着介电层折射率的变化,光纤的能流密度分布情况如图5所示,计算参数同图2,  $\phi = \pi/2$ 。可见,当薄介电层的折射率由  $1.3$  增大到  $2.0$  时,电场的各个分量在纤芯和薄介电层中的变化都很大,而在外包层中随着介电层折射率的增加,各个电场分量均逐渐减小。随着介电层厚度的变化,光纤的能流密度分布情况如图6所示,计算参数同图3,  $\phi = \pi/2$ 。当薄介电层的厚度由  $2 \text{ nm}$  增大到  $8 \text{ nm}$  时,电场的各个分量的变化趋势和图5相近。

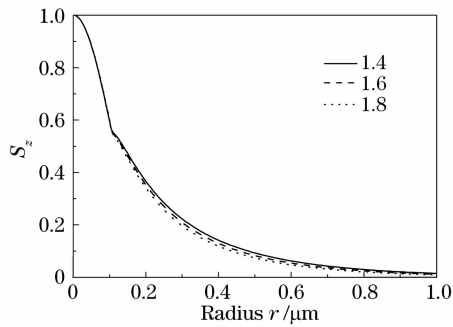


图5 薄介电层折射率变化时,能流密度的分布情况

Fig. 5 Energy flow densities with different film refractive index

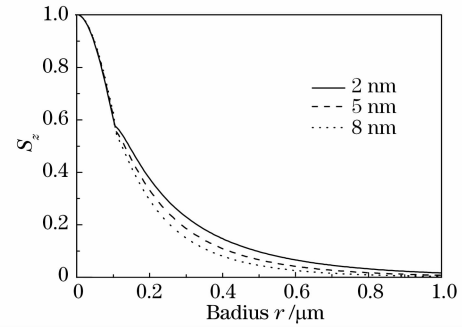


图6 介电层厚度变化时,能流密度的变化情况

Fig. 6 Energy flow densities with different film thickness

## 4 结 论

基于光纤模式理论,理论分析了具薄折射率介电薄层微纳光纤的模场特性。研究表明,引入薄介电层后,微纳光纤纤芯和薄介电层中的模场变化不大,但是外包层中的模场变化较大。随着薄介电层的厚度和折射率增加,外包层中的电场分量和能流密度均减小,而且介电层厚度的影响大于折射率的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Tong Limin, Lou Jingyi, Mazur Eric. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(6): 1025~1035
- 2 Chen Shaowu, Xu Xuejun, Tu Xiaoguang. Propagation losses measurement methods for silicon based micro-nano waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 134~138  
陈少武, 徐学俊, 屠晓光. 硅基微纳光波导损耗特性的表征技术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 134~138
- 3 Tong Limin, Pan Xinyun. Subwavelength-diameter optical fibers: waveguiding properties and photonic applications[J]. *Physics*, 2007, **36**(8): 626~631  
童利民, 潘欣云. 亚波长直径光纤的光学传输特性及其应用[J]. *物理*, 2007, **36**(8): 626~631
- 4 P. P. Bishnu. *Fundamentals of Fibre Optics in Telecommunication and Sensor Systems*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993. 52~124
- 5 Robert G. Hunsperger. *Photonic Devices and Systems*[M]. New York: Marcel Dekker, 1994. 20~60
- 6 J. S. Sanghera, I. D. Aggarwal. *Infrared Fiber Optics*[M]. New York: CRC Press, 1998. 1~31
- 7 S. Leon-Saval, T. Birks, W. Wadsworth *et al.*. Supercontinuum generation in submicron fiber waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(13): 2864~2869
- 8 R. R. Gattass, G. T. Svacha, Tong Limin *et al.*. Super continuum generation in submicrometer diameter silica fibers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9408~414
- 9 Shi Lei, Chen Xianfeng, Liu Hongjuan *et al.*. Fabrication of submicron-diameter silica fibers using electric strip heater[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5055~5060
- 10 J. Bures, R. Ghosh. Power density of the evanescent field in the vicinity of a tapered fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(8): 1992~1996
- 11 Tong Limin, Rafael R. Gattass, Jonathan B. Ashcom *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, **426**(6966): 816~819
- 12 Tong Limin, Hu Lili, Zhang Junjie *et al.*. Photonic nanowires directly drawn from bulk glasses[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 82~84
- 13 Lou Jingyi, Tong Limin, Ye Zhizhen. Dispersion shifts in optical nanowires with thin dielectric coatings[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(16): 6993~6998
- 14 Erol Karadeniz, Philipp Kornreich. Optical fibers with high-index-contrast dielectric thin films[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(10): 105006
- 15 Li Yuquan, Cui Min. *The Theory and Technology of Optical Waveguide*[M]. Beijing: Post & Telecommunications Press, 2002. 92~98  
李玉权, 崔敏. *光波导理论与技术*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002. 92~98