

doi:10.3788/gzxb20174602.0206002

## 实用化少模光纤的研究

曹原<sup>1</sup>, 施伟华<sup>2</sup>, 郁小松<sup>1</sup>, 赵永利<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>

(1 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

(2 南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210023)

**摘 要:**针对大容量光纤通信系统,设计了一种实用化的椭圆纯硅芯少模光纤,给出了光纤的设计原理与参考标准,运用全矢量有限元法结合完美匹配层边界条件分析了光纤的传输特性.在 1.4~1.65  $\mu\text{m}$  波长处,光纤处于稳定的  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  双模运转,模式有效折射率差大于  $1.8 \times 10^{-3}$ ,避免了模间耦合和串扰;在工作波长 1.55  $\mu\text{m}$  处, $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的色散系数分别为 19.61 和 4.41 ps/(nm·km),色散斜率分别为 0.048 和 0.002 ps/(nm<sup>2</sup>·km),模场面积分别为 97.17 和 143.96  $\mu\text{m}^2$ ,模式的衰减系数均小于 0.21 dB/km.该光纤的传输特性基本符合 G.652 和 G.655 光纤标准,可利用现有成熟的“预制棒拉丝工艺”制备,同时与波分复用技术相结合可以成倍提升光网络的传输容量,对于下一代通信网络带宽的提升具有重要意义.

**关键词:**光纤光学;光网络;有限元法;少模光纤;大容量;色散;带宽;实用性

中图分类号:TN818

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)02-0206002-7

## Research on the Practical Few-mode Fiber

CAO Yuan<sup>1</sup>, SHI Wei-hua<sup>2</sup>, YU Xiao-song<sup>1</sup>, ZHAO Yong-li<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(2 College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** An practical few-mode fiber with elliptical pure  $\text{SiO}_2$  core was designed for large-capacity optical communication systems. The design principle and reference standard are presented, and the transmission properties were analyzed with full vector finite element method combined with perfectly matched layer boundary conditions. At the wavelength of 1.4~1.65  $\mu\text{m}$ , the fiber is in stable dual-mode operation with modes  $\text{HE}_{11}$  and  $\text{HE}_{21}$ , and the effective refractive index difference between the modes is greater than  $1.8 \times 10^{-3}$ , which can avoid the mode coupling and crosstalk. At the wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$ , the chromatic dispersion of the modes  $\text{HE}_{11}$  and  $\text{HE}_{21}$  is 19.61 and 4.41 ps/(nm·km) respectively, the dispersion slope is 0.048 and 0.002 ps/(nm<sup>2</sup>·km) respectively, the mode field area is 97.17 and 143.96  $\mu\text{m}^2$  respectively, and the attenuation coefficient of each mode is less than 0.21 dB/km. Transmission properties of the fiber can basically meet the G.652 and G.655 fiber standards, and it can be made by the existing mature “preform drawing” technology. This is significant for the promotion of next generation communication network bandwidth, which can be combined with WDM technologies to increase optical network transmission capacities exponentially.

**Key words:** Fiber optics; Optical networks; Finite element method; Few-mode fiber; Large-capacity; Chromatic dispersion; Bandwidth; Practicability

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.2280; 060.2330; 060.2400

基金项目:国家自然科学基金(No. 61601052)资助

第一作者:曹原(1994-),男,博士研究生,主要研究方向为光通信与光网络技术. Email:yuancao@bupt.edu.cn

导 师:张杰(1972-),男,教授,博士,主要研究方向为光通信与光网络技术. Email:lgr24@bupt.edu.cn

收稿日期:2016-08-31;录用日期:2016-10-12

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

随着光纤通信系统的传输和接入带宽需求的不断提升,骨干网传输所用的单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)具有的非线性效应使得系统容量逐渐接近香农极限.少模光纤(Few-Mode Fiber, FMF)中的模分复用(Mode Division Multiplexing, MDM)技术是一种全新的光多输入多输出传输形式,与波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术相结合可以数倍地提升系统传输容量,且FMF相比SMF较大的模场面积可以有效抑制非线性效应<sup>[1]</sup>.从2010年Yaman等<sup>[2]</sup>首先采用5032 km的FMF进行长距离传输 $10 \times 112$  Gb/s信号的实验以来,可作为新一代长距离传输的FMF及MDM技术迅速发展.2011年,由美国NEC实验室牵头,康宁公司以及多所大学合作将MDM-WDM技术相结合实现 $88 \times 3 \times 112$  Gb/s在FMF中传输50 km的实验<sup>[3]</sup>,此次实验首次利用了少模光纤放大器,使MDM技术得以突破性发展.2012年,Takenaga等<sup>[4]</sup>提出了一种少模多芯光纤的设计方案,设计了4芯与7芯的FMF,使光纤支持在C波段和L波段有效面积大于 $110 \mu\text{m}^2$ 的双LP模传输.2013年,Zheng等<sup>[5]</sup>提出了一种强耦合型多芯大模场FMF,实现了 $\text{HE}_{11}$ 和 $\text{HE}_{21}$ 严格意义上的双模传输,但是多芯结合空气孔的结构增加了光纤的制作难度.2015年,曹原等针对MDM系统设计了一种传输用单芯低弯曲损耗双模PCF<sup>[6]</sup>和一种高功率光通信器件用单芯抗弯曲大模场面积双模PCF<sup>[7]</sup>,光纤可保持 $\text{HE}_{11}$ 和 $\text{HE}_{21}$ 模稳定双模运转,且对弯曲不敏感,但其较复杂的多孔结构难以实用化.已有报道的FMF大多具有多芯或是多孔包层结构,抑或是通过设计复杂折射率分布的纤芯来优化模式耦合与串扰,如何在实用化的前提下有效控制高阶模式数量,降低长距离通信中的衰减,同时减小非线性效应和色散,解决FMF本身的模间耦合、串扰和稳定性问题,都需要进一步探索.

本文针对长距离大容量光纤传输系统,设计实用化的FMF,分析了结构参数对光纤特性的影响.通过优化结构参数,使 $\text{HE}_{11}$ 模与 $\text{HE}_{21}$ 模的有效折射率差大于 $1.8 \times 10^{-3}$ ,光纤可实现稳定的双模运转.

## 1 光纤结构与原理

从实用化角度出发,在提高稳定性的同时避免复杂的多芯及多孔包层结构,设计了一种椭圆芯双模光纤,其结构如图1.可以参考现有光纤成熟的MCVD工艺,使用旋转沉积技术来沉积椭圆芯层与包层以制作光纤预制棒,再利用“预制棒拉丝工艺”进行制备.该FMF采用纯 $\text{SiO}_2$ 纤芯(浅灰色区域),包层材料为掺氟石英(白色区域),纤芯与包层折射率差 $\Delta = n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}$ .由文献<sup>[8]</sup>可知,引入包层掺氟的纯 $\text{SiO}_2$ 纤芯,可以减小瑞利散射产生的衰减,进一步降低光纤的传输损耗.椭圆纤芯长半轴为 $a$ ,短半轴为 $b$ ,长短半轴之比 $\eta = a/b$ ,光纤直径为 $125 \mu\text{m}$ .当工作波长 $\lambda$ 为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,纯 $\text{SiO}_2$ 的折射率为1.444.由于FMF的光缆特性与标准尚未统一,因此在设计时可以参考ITU-T G.652和G.655传输光纤标准优化特性.

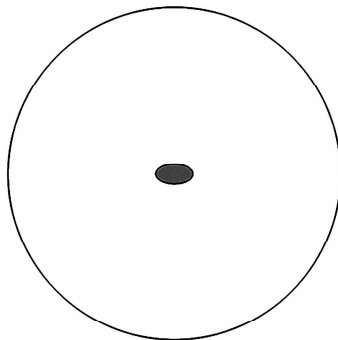


图1 椭圆芯双模光纤截面图  
Fig. 1 Cross section of the elliptical-core dual-mode fiber

全矢量有限元法(Finite Element Method, FEM)是一种通过建立和求解偏微分方程分析光纤传输特性的数值分析方法<sup>[9]</sup>.这种方法计算精度高且能够方便地得到光纤的传输模场分布,是目前分析光纤特性最常用也是最权威的方法<sup>[10]</sup>.本文选取计算精度较自然边界和吸收边界高的完美匹配层边界条件,使用仿真软件COMSOL与MATLAB,对光纤特性进行仿真研究和实用化分析.

光纤模式反映了光纤在空间上的能量分布,本质上仍然是电磁场在空间的分布形式,可以通过求解

Maxwell 方程组得到. 为了避免模间耦合<sup>[4]</sup>, 光纤模式之间的有效折射率差应大于  $0.5 \times 10^{-3}$ . 根据光纤各阶模式的传输常数和模场分布, 可以计算出光纤中各模式的等效模场面积<sup>[11-12]</sup>, 即

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint_S |\mathbf{E}|^2 dx dy \right)^2}{\iint_S |\mathbf{E}|^4 dx dy} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{E}$  为电场矢量,  $S$  为光纤横截面.

光纤的衰减包括材料吸收损耗、散射损耗和辐射(限制)损耗. 在  $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$  波段范围内, 光纤材料的吸收损耗小于  $0.03 \text{ dB/km}$ ; 瑞利散射引起的本征损耗可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\alpha_R = C/\lambda^4 \quad (2)$$

式中,  $C = 0.7 \sim 0.9 \text{ (dB/km)} \cdot \mu\text{m}^4$  为常数, 具体取值由光纤结构决定. 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处,  $\alpha_R = 0.12 \sim 0.16 \text{ dB/km}$ , 表明在此波长处, 平直光纤的传输损耗主要为瑞利散射损耗. 光纤中各模式的限制损耗  $L$  可以通过传输常数的虚部求得<sup>[14]</sup>, 即

$$L = \frac{20k_0}{\ln(10)} \text{Im}(n_{\text{eff}}) = \frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (3)$$

式中,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  是有效折射率的虚部. 实际应用中, 光纤中模式折射率  $n_{\text{eff}}$  满足  $n_{\text{clad}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{core}}$  的模式为导模, 折射率低于  $n_{\text{clad}}$  的模式截止, 即不能在光纤中传输<sup>[5]</sup>.

光纤总色散包括材料、波导和模间色散. 本文的椭圆纯硅芯光纤的材料色散  $D_M$  可参考 Sellmeier 公式计算. 运用全矢量 FEM 计算  $n_{\text{eff}}$  的实部, 可以求得波导色散<sup>[15-17]</sup>

$$D_W = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \quad (4)$$

式中,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为模式有效折射率的实部. FMF 的模式之间存在模间色散, 当模间耦合很低时, 模式稳定性高, 模间色散可以忽略. 因此, 总色散  $D = D_M + D_W$ .

## 2 结构参数对传输特性的影响

本文设计的光纤在制备过程中的误差(纤芯尺寸、掺杂浓度等)会对光纤实际传输特性产生一定的影响, 本节对图 1 所示光纤结构参数对双模特性、色散特性和衰减特性的影响进行了研究. 光纤中  $\text{HE}_{11}$  模和  $\text{HE}_{21}$  模各自的两个简并态特性相似, 本文为方便区分, 只讨论模式对应的一个简并态与其他高阶模式(Other Higher Order Mode, OHOM)的传输特性.

### 2.1 结构参数对双模特性的影响

初步分析发现, 增大椭圆纤芯可以增加模场面积, 有利于抑制光纤在长距离传输中的非线性效应, 但是椭圆芯过大容易增加光纤的传输模式数量从而增大模间色散与串扰, 很难保证双模工作的稳定性. 除了椭圆纤芯长、短半轴  $a$  与  $b$  以外, 纤芯与包层折射率差  $\Delta$  也会影响双模工作, 且参数之间互相制约, 选取初始结构参数为  $a = 7.0 \mu\text{m}$ ,  $b = 3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ , 纤芯与包层折射率差  $\Delta = 0.2\% \sim 1\%$ . 图 2(a)、(b) 分别给出了波长

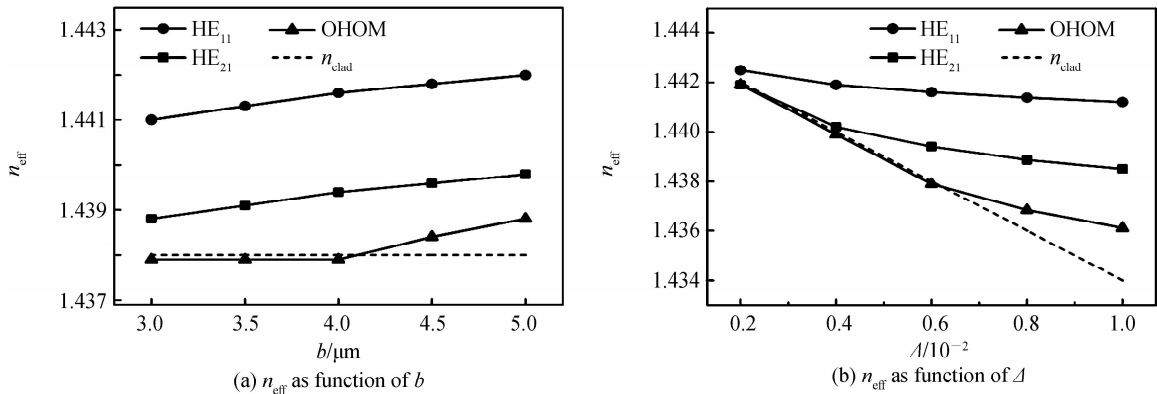


图 2 光纤模式的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随  $b$  与  $\Delta$  的变化关系  
Fig. 2 Effective refractive index  $n_{\text{eff}}$  of the FMF as functions of  $b$  and  $\Delta$

1.55  $\mu\text{m}$  处, 光纤模式的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随  $b$  与  $\Delta$  的变化关系. 其中, 图 2(a) 假设  $\Delta=0.6\%$ , 图 2(b) 假设  $b=4.0 \mu\text{m}$ ,  $n_{\text{clad}}$  为包层材料的折射率. 由图 2 可知, 增大  $b$  或者减小  $\Delta$ , 各阶模式有效折射率  $n_{\text{eff}}$  均对应增大. 当 OHOM 的  $n_{\text{eff}} < n_{\text{clad}}$ , 且  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的  $n_{\text{eff}} > n_{\text{clad}}$  时,  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  为导模, OHOM 截止, 光纤只传输  $\text{HE}_{11}$  模和  $\text{HE}_{21}$  模, 实现了稳定的双模工作, 此时  $b=3.0\sim 4.0 \mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.4\%\sim 0.6\%$ .

## 2.2 结构参数对色散特性的影响

在保证 FMF 稳定双模运转的基础上, 讨论  $b=3.0\sim 4.0 \mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.4\%\sim 0.6\%$  条件下, 光纤色散特性的变化情况. 选取  $\Delta=0.6\%$ , 图 3(a)、(b) 所示分别为短半轴  $b$  变化时,  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模色散系数随波长的变化曲线. 由图 3(a) 可知,  $b$  的变化对  $\text{HE}_{11}$  模的色散影响不大, 其色散系数随波长增大而增大. 图 3(b) 显示随着  $b$  的增大,  $\text{HE}_{21}$  模的色散系数也随之明显增大, 这表明  $b$  的值主要影响  $\text{HE}_{21}$  模的色散, 选取  $b=3.8 \mu\text{m}$ . 图 4(a)、(b) 所示分别为折射率差  $\Delta$  对光纤  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模色散系数的影响. 由图 4 可知, 随着  $\Delta$  的变化,  $\text{HE}_{11}$  模的色散系数变化仍然较小, 而  $\text{HE}_{21}$  模的色散系数有明显的改变. 尤其是当  $\Delta=0.5\%$  时, 在波长  $1.45\sim 1.65 \mu\text{m}$  区间范围内,  $\text{HE}_{21}$  模的色散曲线大致趋于平坦, 色散系数在  $2.697\sim 4.411 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  之间. 因此, 结构参数对  $\text{HE}_{11}$  模的波导色散影响较小, 而对  $\text{HE}_{21}$  模的影响较大, 这是由于基模的能量大多集中在纤芯中传输,  $\text{HE}_{21}$  模相比  $\text{HE}_{11}$  模在包层中传输了更多的光能, 从而导致波导色散的改变.

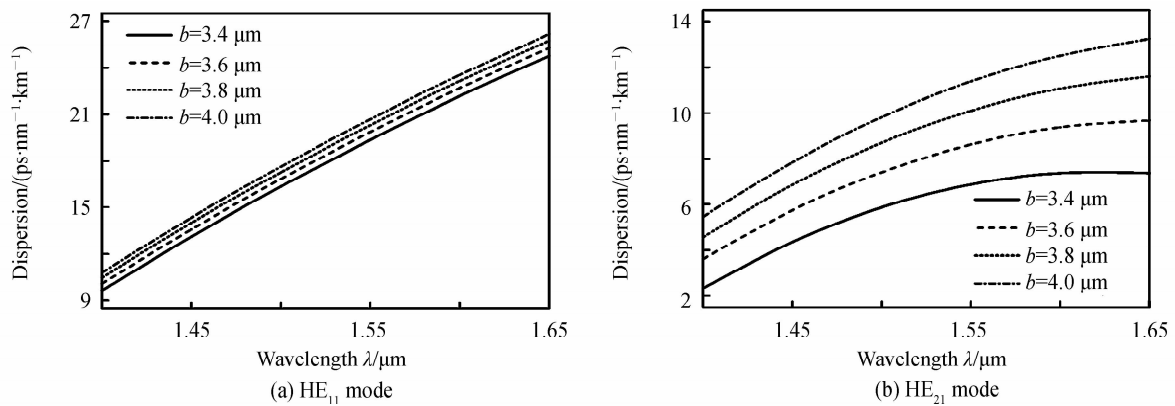


图 3  $b$  变化时光纤色散系数随波长的变化曲线  
Fig. 3 Dispersion of the FMF as functions of  $b$  and  $\lambda$

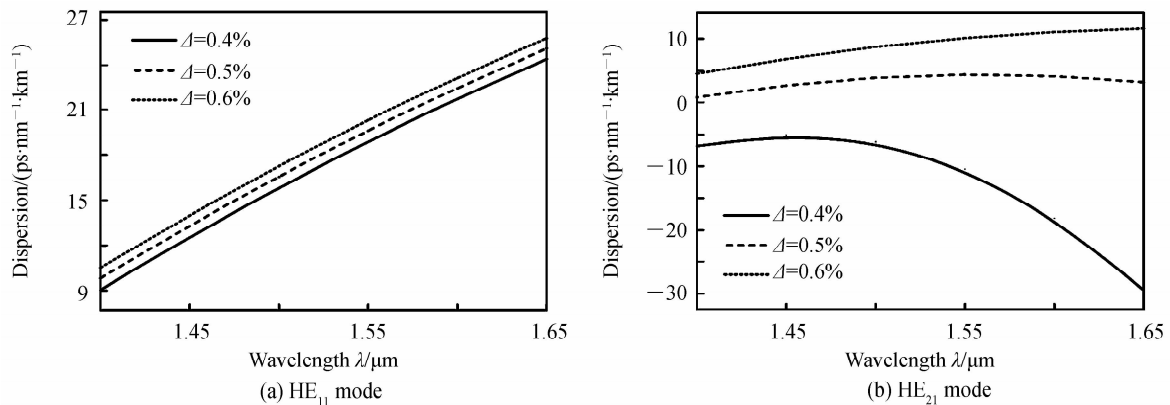


图 4 折射率差  $\Delta$  对光纤色散系数的影响  
Fig. 4 Dispersion of the FMF as function of  $\Delta$

## 2.3 结构参数对衰减特性的影响

由上一节可知, 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处, 纯硅芯光纤的吸收损耗与散射损耗之和小于  $0.19 \text{ dB}/\text{km}$ , 这里主要讨论  $b=3.4\sim 3.8 \mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.5\%\sim 0.6\%$  条件下, 光纤限制损耗的变化情况, 如图 5. 从图 5 中可以看出,  $\text{HE}_{21}$  模的限制损耗大于  $\text{HE}_{11}$  模, 且  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的限制损耗均随着  $b$  与  $\Delta$  的增大而减小. 这源于增大  $b$  和  $\Delta$ , 纤芯与包层的折射率差对应增加, 模式被光纤的束缚效果增强, 光能可以有效地集中在椭圆纤芯中传播. 同时可以发现, 该双模光纤的限制损耗非常小, 影响衰减特性的主要因素仍然是瑞利散射损耗. 当  $\Delta=$

0.6%时,模式的限制损耗小于  $1.54 \times 10^{-4}$  dB/km,基本可以忽略不计.

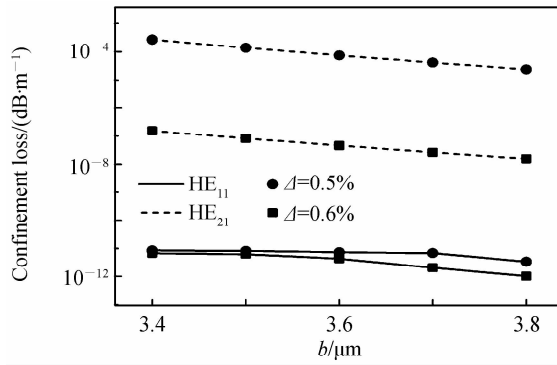


图5 光纤限制损耗随  $b$  与  $\Delta$  的变化关系

Fig. 5 Confinement loss of the FMF as functions of  $b$  and  $\Delta$

### 3 光纤传输特性

选取保证 FMF 双模运转、色散小且平坦、限制损耗较小的结构参数作为最优参数,即  $a = 7.0 \mu\text{m}$ ,  $b = 3.8 \mu\text{m}$ ,  $\Delta = 0.5\%$ . 此时 FMF 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处,  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的色散系数分别为  $19.61$  和  $4.41 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,符合 G. 652 光纤的色散系数标准 ( $\leq 20 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ); 限制损耗分别为  $3.37 \times 10^{-9}$  和  $0.02 \text{ dB}/\text{km}$ , 单个模式的衰减系数小于  $0.21 \text{ dB}/\text{km}$ ,符合 G. 652 光纤 ( $\leq 0.3 \text{ dB}/\text{km}$ ) 和 G. 655 光纤 ( $\leq 0.35 \text{ dB}/\text{km}$ ) 的衰减系数标准. 另外, 光纤  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模两偏振态之间的双折射分别为  $3.42 \times 10^{-6}$  和  $3.69 \times 10^{-7}$ , 可忽略不计, 表明  $\text{HE}_{11}$  模的两个偏振态和  $\text{HE}_{21}$  模的两个偏振态均属于良好的简并态, 光纤具有的椭圆芯结构不会对光纤偏振相关特性产生影响. 在此基础上对光纤的传输特性进行分析.

#### 3.1 双模与色散特性

图 6(a) 给出了光纤模式的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随波长的变化关系. 由图可知,  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的  $n_{\text{eff}}$  均随波长的增大而减小, 且在波长  $1.4 \sim 1.65 \mu\text{m}$  区间范围内,  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  的  $n_{\text{eff}} > n_{\text{clad}}$ ,  $\text{OHOM}$  的  $n_{\text{eff}} < n_{\text{clad}}$ ,  $\text{HE}_{11}$  模与  $\text{HE}_{21}$  模的有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}} > 1.8 \times 10^{-3}$ , 光纤可以保持严格意义上的稳定双模运转, 其双模运转区间可达  $1.4 \sim 1.65 \mu\text{m}$ , 此波长区间包含 WDM 系统工作的波段范围, 因此, 该光纤可以与 WDM 技术相结合成倍提升长距离传输系统的容量. 图 6(b) 所示为  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的色散斜率随波长的变化曲线, 在波长  $1.4 \sim 1.65 \mu\text{m}$  区间内,  $\text{HE}_{11}$  模的色散斜率  $D_s$  在  $0.047 \sim 0.053 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$  之间,  $\text{HE}_{21}$  模的色散斜率  $D_s$  在  $-0.023 \sim 0.035 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$  之间, 符合 G. 652 光纤 ( $\leq 0.092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ) 和 G. 655 光纤 ( $\leq 0.085 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ) 的色散斜率标准. 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处,  $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的色散斜率  $D_s$  分别为  $0.048$  和  $0.002 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ , 满足光纤通信系统长距离传输的要求.

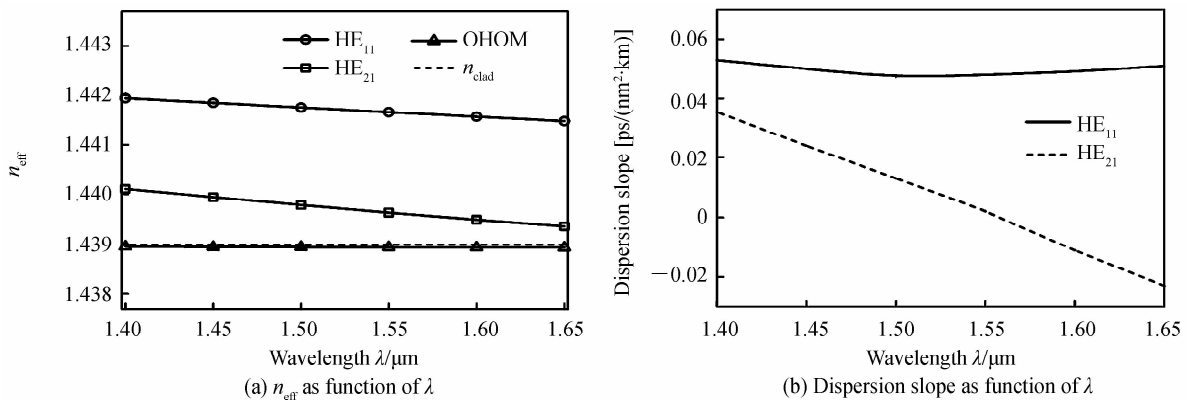


图6 光纤的双模与色散特性

Fig. 6 Dual-mode and dispersion characteristics of the FMF

### 3.2 模场特性

图7给出了波长改变时,光纤  $HE_{11}$  和  $HE_{21}$  模的模场面积变化曲线. 图中插图为 FMF 中  $HE_{11}$  和  $HE_{21}$  模的二维电矢量与模场分布. 从图7中可以看出,随着波长逐渐增大, $HE_{11}$  和  $HE_{21}$  模的模场面积也相应增大,且  $HE_{21}$  模的模场面积比  $HE_{11}$  模大. 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处, $HE_{11}$  和  $HE_{21}$  模的模场面积分别为  $97.17$  和  $143.96 \mu\text{m}^2$ . 由 ITU-T 光纤标准可知,G.652 和 G.655 光纤的模场面积最大为  $105.68 \mu\text{m}^2$ ,本文设计的 FMF 模场面积与其相似,可以有效抑制光纤传输的非线性效应.

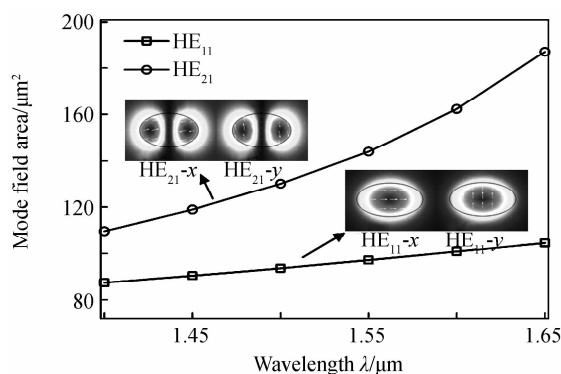


图7 光纤模场面积随波长的变化

Fig. 7 Mode field area of the FMF as function of  $\lambda$

## 4 结论

本文针对大容量光纤传输系统,从降低制作难度和提高实用性与稳定性出发,设计了一种椭圆纯硅芯双模 FMF. 在  $1.4 \sim 1.65 \mu\text{m}$  处,该光纤可实现稳定的  $HE_{11}$  和  $HE_{21}$  双模工作,模式有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}} > 1.8 \times 10^{-3}$ ,避免了模间耦合和串扰. 当工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时, $HE_{11}$  模和  $HE_{21}$  模的色散系数分别为  $19.61$  和  $4.41 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ;色散斜率分别为  $0.048$  和  $0.002 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ;模场面积分别为  $97.17$  和  $143.96 \mu\text{m}^2$ ;模式的衰减系数均小于  $0.21 \text{ dB}/\text{km}$ . 此光纤的传输特性基本符合 G.652 和 G.655 光纤标准,有效抑制了非线性效应,可以与 WDM 技术相结合成倍提升光网络的传输容量,并且方便利用现有光纤成熟的制备技术,采用“预制棒拉丝工艺”进行制备,具有广阔的应用前景.

### 参考文献

- [1] CHENG Yu, YANG Chen, LUO Jie. Optical fiber technologies for ultrahigh-speed, ultralarge-capacity telecommunication networks[J]. *ZTE Technology Journal*, 2013, **19**(3): 12-16.  
成煜, 杨晨, 罗杰. 超高速率超大容量建设用光纤技术[J]. 中兴通讯技术, 2013, **19**(3): 12-16.
- [2] YAMAN F, BAI N, HUANG Y K, *et al.*  $10 \times 112 \text{ Gb/s}$  PDM-QPSK transmission over 5032 km in few-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(20): 21342-21349.
- [3] IP E, BAI N, HUANG Y K, *et al.*  $88 \times 3 \times 112\text{-Gb/s}$  WDM transmission over 50 km of three-mode fiber with inline few-mode fiber amplifier[C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2011: Th. 13. C. 2.
- [4] TAKENAGA K, SASAKI Y, GUAN N, *et al.* Large effective-area few-mode multicore fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(21): 1941-1944.
- [5] ZHENG S, REN G, LIN Z, *et al.* A novel four-air-hole multicore dual-mode large-mode-area fiber: proposal and design [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(5): 419-427.
- [6] CAO Yuan, SHI Wei-hua, SUN Yu-xin, *et al.* Study of a low-bending-loss dual-mode photonic crystal fiber[J]. *Optical Communication Technology*, 2015, **39**(8): 56-58.  
曹原, 施伟华, 孙雨昕, 等. 低弯曲损耗双模光子晶体光纤的研究[J]. 光通信技术, 2015, **39**(8): 56-58.
- [7] CAO Yuan, SHI Wei-hua, XU Guan-jie, *et al.* Design of bend-resistant large-mode-area dual-mode photonic crystal fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(10): 100602.  
曹原, 施伟华, 徐冠杰, 等. 抗弯曲大模场面积双模光子晶体光纤的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, **52**(10): 100602.
- [8] CHEN Hao, QI Shao-feng, ZHOU Xiao-dong. Introduction of ultra-low loss optical fiber technology and application[J]. *OE Product & News*, 2012, **3**(6): 23-24.  
陈皓, 祁劭峰, 周晓栋. 超低损耗光纤技术及其应用介绍[J]. 光电产品与资讯, 2012, **3**(6): 23-24.

- [9] FRANCO M A R, PASSARO A, CARDOSO J R, *et al.* Finite element analysis of anisotropic optical waveguide with arbitrary index profile[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, **35**(3): 1546-1549.
- [10] RAHMAN B M A. Finite element analysis of optical waveguides[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 1995, **10**: 187-216.
- [11] MORTENSEN N A. Effective area of photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(7): 341-348.
- [12] WANG Guan-jun, TAN Xu-xiang, WANG Zhi-bin. Nonlinear of dispersion characteristics of nano-core fiber based on selective filling method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 0506004.  
王冠军, 谭绪祥, 王志斌. 基于选择性填充的超高非线性纳米纤芯光纤特性[J]. 光子学报, 2015, **44**(5): 0506004.
- [13] 杨祥林, 孟宇. 光纤通信系统(第2版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [14] WANG X, LOU S, LU W. Rectangle lattice large mode area photonic crystal fiber for 2  $\mu\text{m}$  compact high-power fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(5): 0903606.
- [15] REEVES W H, KNIGHT J C, RUSSELL P ST J, *et al.* Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(14): 609-613.
- [16] RENVERSEZ G, KUHLMEY B, MCPHEDRAN R. Dispersion management with microstructured optical fibers: Ultraflattened chromatic dispersion with low losses[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(12): 989-991.
- [17] YANG Pei-long, DAI Shi-xun, LUO Bao-hua, *et al.* Design of dispersion flattened and dispersion decreasing fiber in mid-infrared region[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(9): 0919002.  
杨佩龙, 戴世勋, 罗宝华, 等. 中红外色散平坦渐减光纤设计[J]. 光子学报, 2016, **45**(9): 0919002.