

doi: 10.3788/gzxb20154401.0106006

# 基于 CdSe/ZnS 量子点薄膜结构的高双折射光子晶体光纤的色散与损耗控制

耿琰, 王河林, 陈中师

(浙江工业大学 理学院 应用物理系, 杭州 310023)

**摘 要:** 基于有限元法, 设计了一种六边形排列含 CdSe/ZnS 量子点薄膜结构的高双折射光子晶体光纤, 分析了具有不同厚度 CdSe/ZnS 量子点薄膜光子晶体光纤的色散及损耗特性. 结果表明, 含 CdSe/ZnS 量子点薄膜结构的光子晶体光纤在  $x$  和  $y$  方向均存在基模. 当泵浦光波长逐渐增加时, 具有相同厚度 CdSe/ZnS 量子点薄膜光子晶体光纤的双折射值逐渐增大,  $x$  和  $y$  方向总色散先增大后减小且存在两个零色散点, 损耗逐渐增大并在可见光波段趋近于零; 具有不同厚度 CdSe/ZnS 量子点薄膜光子晶体光纤随 CdSe/ZnS 量子点薄膜厚度的增加, 在相同泵浦光波长处, 双折射值逐渐减小,  $x$  和  $y$  方向总色散逐渐减小且两个零色散点逐渐靠近, 损耗逐渐增大. 通过沉积不同厚度 CdSe/ZnS 量子点薄膜和选择合适泵浦光波长, 可有效控制光子晶体光纤的色散和损耗.

**关键词:** 光子晶体光纤; CdSe/ZnS 量子点; 薄膜; 双折射; 色散; 损耗; 控制

**中图分类号:** O436.2; O435.1; O431.2 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2015)01-0106006-9

## Dispersion and Loss Control of High Birefringence Photonic Crystal Fiber with CdSe/ZnS Quantum Dots Film

GENG Yan, WANG He-lin, CHEN Zhong-shi

(Department of Applied Physics, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** With finite element method, a hexagon High Birefringence Photonic Crystal Fiber (HB-PCF) with two zero-dispersion dots and CdSe/ZnS quantum dots film was designed. The dispersion and loss characteristics of the designed HB-PCFs with the different thickness of CdSe/ZnS quantum dots films were analyzed. The results show that HB-PCFs with CdSe/ZnS quantum dots films exist the fundamental modes along the  $x$ - and  $y$ -axes of fibers. As pump wavelength increases, the birefringence of HB-PCFs with the same thickness of CdSe/ZnS quantum dots films increases gradually. And their dispersions increase first and then decrease along the  $x$ - and  $y$ -axes of fiber. The losses of HB-PCFs are close to zero in the visible region while they increase gradually in the infrared region. For the different thickness of CdSe/ZnS quantum dots films, the birefringence of HB-PCFs decreases gradually with the increase of quantum dot film thickness for the same pump wavelength. Their dispersions decrease gradually along the  $x$ - and  $y$ -axes of fiber, and their two zero-dispersion dots are close to each other, and their losses increase gradually. These research results indicate that the dispersions and losses of the HB-PCFs can be controlled effectively in experiment by depositing the different thickness of CdSe/ZnS quantum dots films and choosing a suitable pump wavelength.

**Key words:** Photonic crystal fiber; CdSe/ZnS quantum dots; Film; Birefringence; Dispersion; Loss; Control

**基金项目:** 浙江省自然科学基金(No. LY12F05006)和浙江省教育厅基金(No. Y201121906)资助

**第一作者:** 耿琰(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感. Email: 380612771@qq.com

**导师(通讯作者):** 王河林(1977-), 男, 硕导, 讲师, 主要研究方向为光纤传感及通信技术. Email: whl982032@163.com

**收稿日期:** 2014-05-16; **录用日期:** 2014-07-21

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

## 0 引言

高双折射光子晶体光纤 (High Birefringence Photonic Crystal Fiber, HB-PCF) 是指在特定波段内其双折射值高于  $10^{-3}$  的光子晶体光纤. 因其具有较高的双折射值和低损耗特性, 在光纤通讯、光纤传感和光纤激光器等<sup>[1-7]</sup> 领域有着极其广阔的应用前景. 半导体量子点是指半导体材料在纳米尺度上的原子和分子的集合体. 虽然量子点自身折射率较大, 但量子点一般都沉积在某种基底中, 所以可以通过选择不同的基底材料来控制其折射率. 相较于其他折射率材料, 量子点最主要的特性是它受激后可以发射荧光, 而且具有低激发阈值、发光稳定性好和发射光谱范围广等优点. 量子点特殊的光学性质使得它在生物化学、分子生物学、细胞生物学、基因组学、蛋白质组学、药物筛选、生物大分子相互作用等<sup>[8-14]</sup> 研究中应用广泛. 若利用静电层层自组装技术<sup>[15-18]</sup> 将量子点沉积到 HB-PCF 光纤的空气孔中, 便可得到具有量子点薄膜结构的 HB-PCF 光纤. 具有量子点薄膜结构的 HB-PCF 光纤在光传感<sup>[19]</sup>、光放大<sup>[20]</sup>、光纤激光器<sup>[20]</sup> 等方面表现出传统光纤所不具备的一些优异特性, 从而激发研究者的兴趣.

近年来, 由于 HB-PCF 光纤高度可调的结构设计可以实现传统光纤所不能够具有的各种特性, 许多科研工作者已经对其双折射、色散与损耗特性进行了多方面的研究. 2004 年, 姜淑琴等提出一种包层采用两种尺寸空气孔的三角形结构 HB-PCF 光纤<sup>[21]</sup>. 在波长 1 540 nm 处, 双折射可达  $3.7865 \times 10^{-3}$ ; 色散曲线在短波段迅速上升, 在 900 nm 附近到达色散零点, 后趋于平坦. 2010 年, 梁健等通过在纤芯引入两个小空气孔以及将包层的第一环和中间一行变为椭圆空气孔来造成光纤模式的不对称性, 获得了 HB-PCF 光纤<sup>[22]</sup>. 经优化后在波长 1 600 nm 处, 双折射可达  $10^{-3}$  量级; 1 100~1 800 nm 波段中获得超平坦色散曲线. 2013 年, 李志全等提出一种由三角形晶格组成的矩形内包层和八边形外包层的双包层 HB-PCF 光纤<sup>[23]</sup>. 通过调整结构参数, 在泵浦光波长 1 550 nm 处, 双折射可达  $1.599 \times 10^{-2}$ ; 色散曲线在 1 530~1 565 nm 及 1 570~1 620 nm 波段具有一定的色散补偿作用. 上述设计的 HB-PCF 光纤的横截面结构一旦确定后其双折射、色散与损耗特性无法改变, 要想实现对这些特性的控制只能改变它们的原始结构. 而在带量子点薄膜结构的 HB-PCF 光纤中, 可通过改变量子点薄膜结构的厚度来实现对 HB-PCF 光纤的双折射、色散与损耗特性的控制, 具有一定的优越性.

本文基于有限元法, 设计了具有不同 CdSe/ZnS 量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤, 分析了这种 HB-PCF

光纤的基模模场分布特性、双折射特性、色散特性和损耗特性以及掺杂后量子点薄膜厚度的变化对它们的影响. 结果表明, 含 CdSe/ZnS 量子点薄膜结构的 HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向均存在基模. 当泵浦光波长逐渐增加时, 对于具有相同厚度 CdSe/ZnS 量子点薄膜的 HB-PCF 光纤, 双折射值逐渐增大,  $x$  和  $y$  方向的总色散先增大后减小且存在两个零色散点, 损耗逐渐增大并在可见光波段趋近于零; 对于具有不同厚度 CdSe/ZnS 量子点薄膜的 HB-PCF 光纤, 随着 CdSe/ZnS 量子点薄膜厚度的增加, 在相同泵浦光波长处, 双折射、色散和损耗特性也存在规律性变化. 通过沉积不同厚度的 CdSe/ZnS 量子点薄膜和选择合适的泵浦光波长, 可有效控制 HB-PCF 光纤的色散和损耗.

## 1 有限元法理论

根据麦克斯韦方程组可以得到 HB-PCF 光纤中电场的波动方程

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right) = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \epsilon_r E \quad (1)$$

设 HB-PCF 光纤中的电场强度

$$E = E(x, y) \exp(-j\beta \cdot z) \quad (2)$$

则将式(2)代入到式(1)中, 利用有限元方法的变分原理可以得到波动方程的泛函形式

$$F = \frac{1}{2} \left[ \beta^2 \begin{Bmatrix} e_x \\ e_z \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xz} \\ B_{zx} & B_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_x \\ e_z \end{Bmatrix} + \{e_x\}^T A_{tt} \{e_x\} \right] \quad (3)$$

式(3)中各单元矩阵为

$$\left\{ \begin{array}{l} [A_{tt}] = \iint_{\Omega} \left[ \frac{1}{\mu_r} \{ \nabla_t \times N_i \} \{ \nabla_t \times N_i \}^T - \beta^2 \epsilon_r \{ N_i \} \{ N_i \}^T \right] d\Omega \\ [B_{tt}] = \iint_{\Omega} \left[ \frac{1}{\mu_r} \{ N_i \} \{ N_i \}^T \right] d\Omega \\ [B_{tz}] = \iint_{\Omega} \left[ \frac{1}{\mu_r} \{ L \} \{ \nabla_t N_i \}^T \right] d\Omega \\ [B_{zt}] = \iint_{\Omega} \left[ \frac{1}{\mu_r} \{ \nabla_t N_i \} \{ L \}^T \right] d\Omega \\ [B_{zz}] = \iint_{\Omega} \left[ \frac{1}{\mu_r} \{ \nabla_t L \} \{ \nabla_t L \}^T - \beta^2 \epsilon_r \{ L \} \{ L \}^T \right] d\Omega \end{array} \right.$$

在式(3)中,  $\beta$  是 HB-PCF 光纤波导模的传播常数,  $E_x$  和  $E_z$  分别是电场强度的横向和轴向分量,  $e_x = \beta \cdot E_x$ ,  $e_z = \beta \cdot E_z$ ,  $\{N_i\}$  和  $\{L_i\}$  分别是矢量基差值函数和节点基差值函数. 对式(3)采用利兹变分法可得到本征方程

$$\begin{bmatrix} A_{tt} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_x \\ e_z \end{Bmatrix} = -\beta^2 \begin{bmatrix} B_{tt} & B_{tz} \\ B_{zt} & B_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_x \\ e_z \end{Bmatrix} \quad (4)$$

求解本征方程(4)可得到 HB-PCF 光纤中沿  $x$  方向和  $y$  方向波导模的传播常数  $\beta_x$  与  $\beta_y$ , 再利用式  $n_{\text{eff}}^x = \beta_x/k_0, n_{\text{eff}}^y = \beta_y/k_0$  就可以得到 HB-PCF 光纤  $x$  和  $y$  方向上的基模有效折射率<sup>[24]</sup>.

需要指出的是,在利用有限元法对 HB-PCF 光纤进行仿真时,需要采用边界条件来模拟光纤的无限大模场. 在这里选用的边界条件是完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML). PML 是指设置在区域边界附近并与相邻介质波阻抗完全匹配的特殊介质层. 这种介质层的特点是入射波穿过分界面进入 PML 时不产生反射,但因为 PML 同时又是一种有耗介质层,进入 PML 的透射波依然会迅速衰减,这样就可以在有限区域内模拟光纤的无限大模场. 加入 PML 边界条件后对本征方程(4)的特征值求解可得到整个封闭连续区域的数值解.

## 2 带 CdSe/ZnS 量子点薄膜的 HB-PCF 光纤的设计

首先设计了一种在 600~2 000 nm 波段具有双零色散点的 HB-PCF 光纤,其截面结构如图 1. 该光纤包层由不同直径的空气孔组成,从纤芯向外各空气孔的直径依次为  $d_1=1.7 \mu\text{m}, d_2=1 \mu\text{m}, d_3=1.2 \mu\text{m}, d_4=0.8 \mu\text{m}$ ,孔间距  $\Lambda=1.6 \mu\text{m}$ . 在该 HB-PCF 光纤的包层空气孔中沉积厚度分别为  $\text{QDh}_1=40 \text{ nm}, \text{QDh}_2=80 \text{ nm}, \text{QDh}_3=120 \text{ nm}$  的 CdSe/ZnS 量子点薄膜,便可设计出具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤. 空气孔折射率设为 1,  $\text{SiO}_2$  材料折射率设为 1.44. 经实验测量得以正己烷为基底的 CdSe/ZnS 量子点折射率为 1.52,因此设计光纤时,量子点薄膜的折射率设为 1.52. 实验中,量子点薄膜利用静电层层自组装技术<sup>[15-19]</sup>来实现,这种技术利用带相反电荷的聚电解质之间的吸引力在具有复杂形状的表面形成纳米结构的薄膜,例如光子晶体光纤的空气圆孔壁上. 它的主要优

点是可以连续建立阳离子和阴离子的双分子膜从而在纳米尺度控制薄膜的厚度. 例如设计的空气孔虽然大小不一,但总体均在微米级别,而静电层层自组装技术可在纳米级别控制,故不同大小的气孔中沉积相同厚度的薄膜在理论上是可行的. 实验中,首先取适量正己烷置入洁净干燥的试管中,将 CdSe/ZnS 量子点滴加到试管中,通过搅拌使得量子点在正己烷中分布均匀,然后将试管放到超声波振荡器中振荡,使量子点均匀分布在正己烷中,后将 CdSe/ZnS 量子点组装在 HB-PCF 的空气孔中,最终利用正己烷的易挥发性和静电自组装技术,可使量子点均匀的沉积在孔内壁上,注意,薄膜厚度可通过控制沉积薄膜的层数来实现,更多光纤内部镀膜细节见参考文献<sup>[25]</sup>. 需要指出的是,由于量子点制备时存在的个体差异,也就无法保证量子点薄膜的绝对均匀性,但在理论分析阶段是可以当做相对均匀的,因此分析时假设薄膜厚度均匀. 图 2 给出了在泵浦光波长为 1 550 nm 时具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 基模模场分布. 其中(a)、(c)、(e)、(g)分别表示具有 0 nm、40 nm、80 nm、120 nm 量子点薄膜

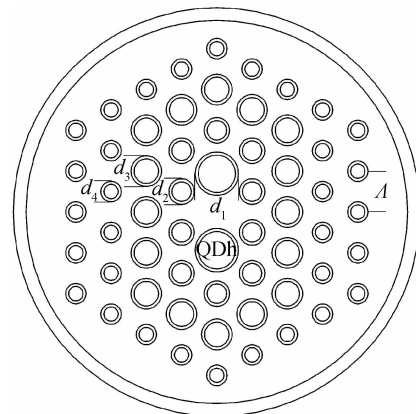
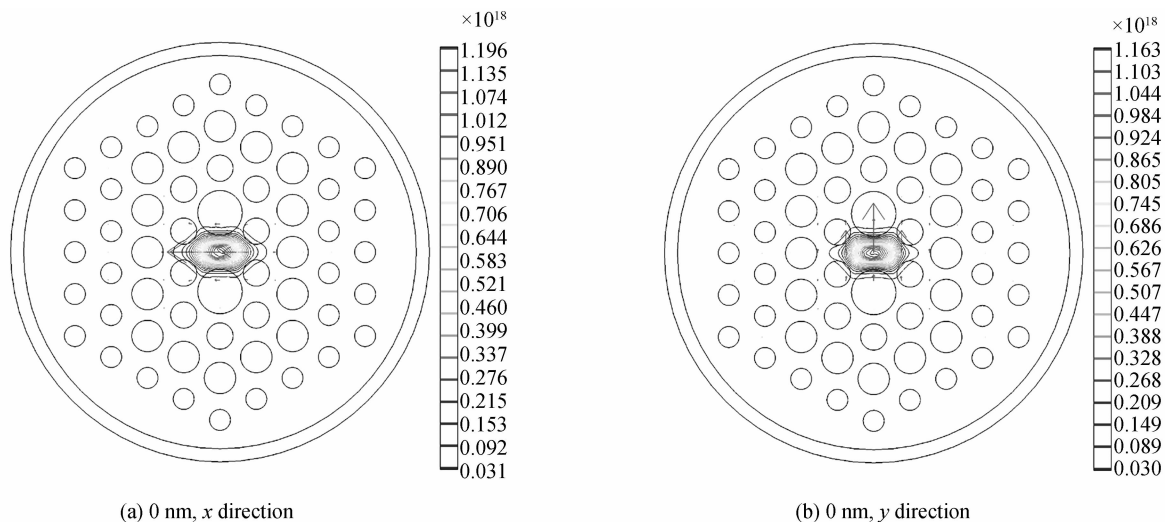


图 1 具有量子点薄膜的 HB-PCF 光纤截面设计  
Fig. 1 The cross sections of HB-PCF with quantum dots film



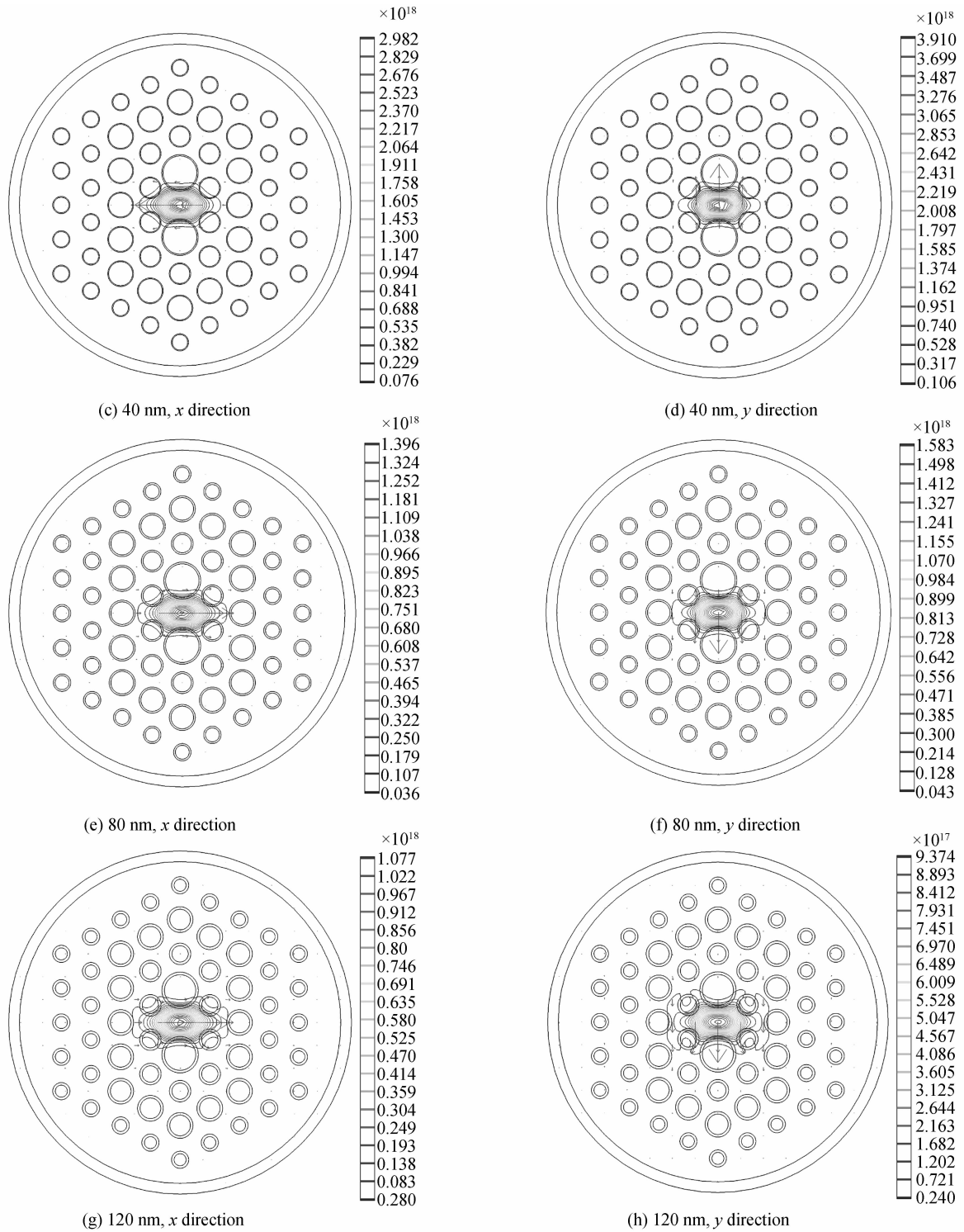


图 2 泵浦光波长为 1 550 nm 时具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 在  $x$  和  $y$  方向基模模场分布  
 Fig. 2 The fundamental mode field distribution of HB-PCFs with different thickness quantum dots films in  $x$  and  $y$  directions when pump wavelength is 1 550 nm

表 1 泵浦光波长为 1 550 nm 处具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 基模光强  
 Table 1 The fundamental mode light intensity of HB-PCFs with different thickness quantum dots films when pump wavelength is 1 550 nm

QDh/nm	0	40	80	120
The maximum of light intensity in $x$ direction( $\times 10^{18}$ W/m <sup>2</sup> )	1. 217	3. 001	1. 417	1. 104
The maximum of light intensity in $y$ direction( $\times 10^{18}$ W/m <sup>2</sup> )	1. 192	4. 118	1. 667	0. 9581

厚度的 HB-PCF 光纤在  $x$  方向上存在的基模模场光强分布;(b)、(d)、(f)、(h) 分别表示具有 0 nm、40 nm、80 nm、120 nm 量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤在  $y$  方向上存在的基模模场光强分布。

根据图 2,可以看出加入量子点薄膜后,HB-PCF 光纤纤芯基模能量外泄比例加大.这是因为对于全内发射型 HB-PCF 光纤,基模在光纤中的传输需满足全反射条件.由空气孔组成的包层在加入量子点薄膜后折射率加大,则纤芯对于基模的束缚能力就会相对减弱,所以基模能量外泄比例随之加大.结合表 1,进一步分析图 2(c)~(h),可以得到,当量子点薄膜厚度从 40 nm 增加到 120 nm 时,光纤纤芯处光强最大值逐渐减少,这说明 HB-PCF 光纤纤芯基模能量的外泄比例增大.原因在于,量子点薄膜的厚度增大使得由空气孔组成的包层折射率增大,导致满足波导条件的基模光波减少,即纤芯对于基模的束缚能力就越弱,基模能量外泄比例越大.从图 2 还可以看出,对于具有相同厚度量子点薄膜的 HB-PCF 光纤, $y$  方向产生的纤芯基模能量外泄比例大于  $x$  方向.这是因为空气孔在 HB-PCF 光纤  $y$  方向的填充率较大,则  $y$  方向的有效折射率相对于  $x$  方向较小,导致  $y$  方向对基模的束缚能力较弱,所以  $y$  方向产生的纤芯基模能量外泄比例大于  $x$  方向.结合表 1,进一步分析图 2(e)~(h),可以得到,当量子点薄膜厚度为 40 nm 和 80 nm 时,HB-PCF 光纤  $x$  和  $y$  方向基模光强的最大值比未加入量子点薄膜时大;当量子点薄膜厚度为 120 nm 时,HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向基模光强的最大值比未加入量子点薄膜时小.这说明实验中通过沉积不同厚度的 CdSe/ZnS 量子点薄膜和选择合适的泵浦光波长,可有效控制 HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向的基模光强。

### 3 色散与损耗特性分析

#### 3.1 色散与损耗的理论

采用有限元法得到的各基模有效折射率为复数.其中,有效折射率的实部描述了 HB-PCF 光纤的波导色散特性,虚部则反映了 HB-PCF 光纤中存在光子禁带而对光产生衰减的损耗特性. HB-PCF 光纤的材料色散可由 Sellmeier 公式求出,波导色散可由有效折射率的实部求出,两者相加就是 HB-PCF 光纤的总色散.而 HB-PCF 光纤的限制损耗可由有效折射率的虚部求出。

HB-PCF 光纤的双折射值  $B(\lambda)$  由式(5)计算,即

$$B(\lambda) = |\operatorname{Re}(n_{\text{eff}}^x) - \operatorname{Re}(n_{\text{eff}}^y)| \quad (5)$$

式(5)中, $n_{\text{eff}}^x$ 、 $n_{\text{eff}}^y$  分别表示 HB-PCF 光纤  $x$  和  $y$  方向上的有效折射率。

光纤的材料色散  $D_m(\lambda)$  由式(6)计算,即

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{mat}}}{d\lambda^2} \quad (6)$$

式(6)中, $n_{\text{mat}}$  表示 HB-PCF 光纤的材料折射率。

波导色散  $D_w(\lambda)$  可根据有效折射率的实部按式(7)计算,即

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \operatorname{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \quad (7)$$

总色散  $D(\lambda)$  为材料色散  $D_m(\lambda)$  和波导色散  $D_w(\lambda)$  之和,即

$$D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_w(\lambda) \quad (8)$$

限制损耗  $L_c(\lambda)$  可根据有效折射率的虚部按式(9)计算,即

$$L_c(\lambda) = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \operatorname{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6 \quad (9)$$

式(9)中, $\lambda$  的单位是 nm, $L_c(\lambda)$  的单位是 dB/km。

#### 3.2 具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤色散与损耗特性分析

图 3 为具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤的双折射随泵浦光波长的变化关系.如图 3 所示,未加入量子点薄膜时,在泵浦光波长 600~2 000 nm 波段,HB-PCF 光纤的双折射值  $B(\lambda)$  随泵浦光波长近似成线性递增关系并始终大于  $10^{-3}$ .在通信波长 1 550 nm 处双折射值  $B=0.01183$ ,达到了  $10^{-2}$ ,最终在泵浦光波长为 2 000 nm 处达到最大值且为 0.018 48.当加入量子点薄膜的厚度分别为 40 nm、80 nm 和 120 nm 时,HB-PCF 光纤的双折射值  $B(\lambda)$  依然随泵浦光波长近似成线性递增关系,最终均在泵浦光波长为 2 000 nm 处达到最大值且分别为 0.012 62、0.009 64、0.006 12.进一步分析图 3 得到,在相同泵浦光波长的条件下,当量子点薄膜厚度从 0 nm 增大到 120 nm 时,双折射值  $B(\lambda)$  随着量子点薄膜厚度的增加而逐渐减小.因此,通过沉积不同厚度的 CdSe/ZnS 量子点薄膜和选择合适的泵浦光波长,可有效控制 HB-PCF 光纤的双折射。

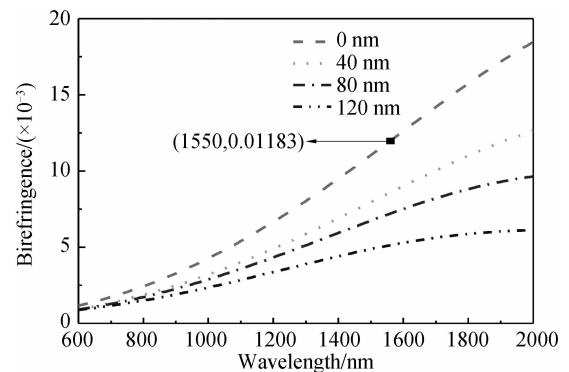


图 3 具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 双折射随泵浦光波长的变化关系

Fig. 3 The birefringence of HB-PCFs with different thickness quantum dots films

图 4 为具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤

在  $x$  和  $y$  方向的总色散随泵浦光波长的变化关系. 从图 4(a)可以看出,未加入量子点薄膜时,在泵浦光波长 600~1 210 nm 波段,HB-PCF 光纤在  $x$  方向的总色散值  $D(\lambda)$  逐步增加并在 770 nm 附近具有第一零色散点;在泵浦光波长 1 210~2 000 nm 波段,HB-PCF 光纤在  $x$  方向的总色散值  $D(\lambda)$  逐步减少并在 1 840 nm 附近具有第二零色散点. 当加入量子点薄膜的厚度分别为 40 nm、80 nm 和 120 nm 时,HB-PCF 光纤在  $x$  方向的第一零色散点分别位于 790 nm、810 nm、850 nm 附近,相较于未加入量子点薄膜时的第一零色散点 770 nm,红移现象明显;第二零色散点分别位于 1 800 nm、1 690 nm、1 580 nm 附近,相较于未加入量子点薄膜时的第二零色散点 1 840 nm,蓝移现象明显. 对于图 4(b)而言,具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤在  $y$  方向的总色散曲线与图 4(a)中的  $x$  方向相似,只是总色散值  $D(\lambda)$  与零色散点位置存在规律性变化. 当量子点薄膜厚度从 0 nm 增大到 120 nm 时,HB-PCF 光纤在  $y$  方向的第一零色散点分别位于 720 nm、750 nm、770 nm、810 nm 附近,红移现象明显;第二零色散点分别位于 1 715 nm、1 670 nm、1 555 nm、1 445 nm 附近,蓝移现象明显. 对比图 4(a)、(b)可以发现当量子点薄膜厚度从 0 nm 增大到 120 nm 时,HB-

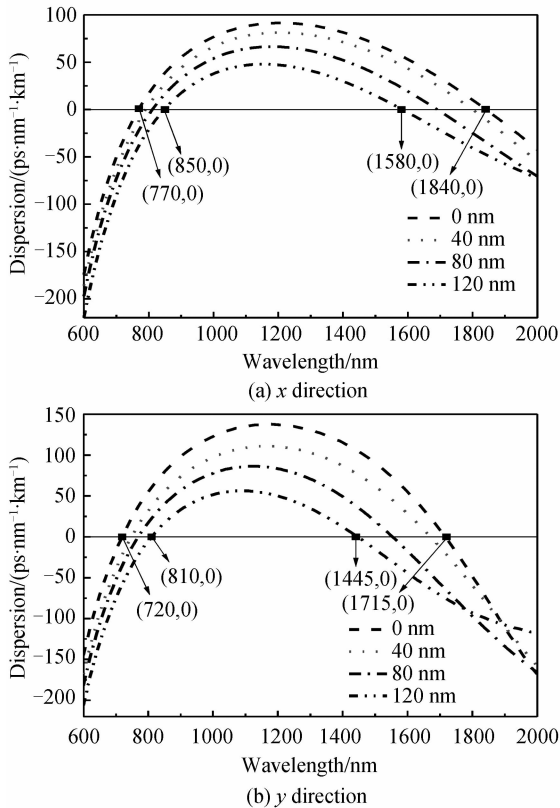


图 4 具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 在  $x$ 、 $y$  方向的总色散  
Fig. 4 The dispersion of HB-PCFs with different thickness quantum dots films in  $x$  and  $y$  direction

PCF 光纤在  $x$  方向的双零色散点相较于  $y$  方向发生红移;在相同泵浦光波长的条件下,HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向的总色散随着量子点薄膜厚度的增加而逐渐减小. 需要指出的是,当泵浦光波长接近 2 000 nm 时,具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤在  $y$  方向的总色散相比于未加入量子点薄膜时较大. 综合图 4 可以得出,HB-PCF 光纤在泵浦光波长 600 至 2 000 nm 波段具有双零色散点;当量子点薄膜厚度从 0 nm 增大到 120 nm 时,HB-PCF 光纤的第一零色散点发生红移,第二零色散点发生蓝移,最终两个零色散点随着量子点薄膜厚度的增加而逐渐靠近. 这说明,实验中通过沉积不同厚度的 CdSe/ZnS 量子点薄膜和选择合适的泵浦光波长,可以有效控制 HB-PCF 光纤的色散.

图 5 为具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向的限制损耗随泵浦光波长的变化关系. 如图 5(a),可以看出未加入量子点薄膜时,在泵浦光波长 600 至 1 500 nm 波段,HB-PCF 光纤在  $x$  方向的损耗值  $L_c(\lambda)$  一开始趋近于零,当泵浦光波长进入 1 500 nm 波段后损耗值  $L_c(\lambda)$  迅速上升,最终在泵浦光波长为 2 000 nm 处达到最大值且为 1.919 16 dB/km. 当加入量子点薄膜的厚度分别为 40 nm、80 nm 和 120 nm 时,HB-PCF 光纤在  $x$  方向的损耗值  $L_c(\lambda)$  一开

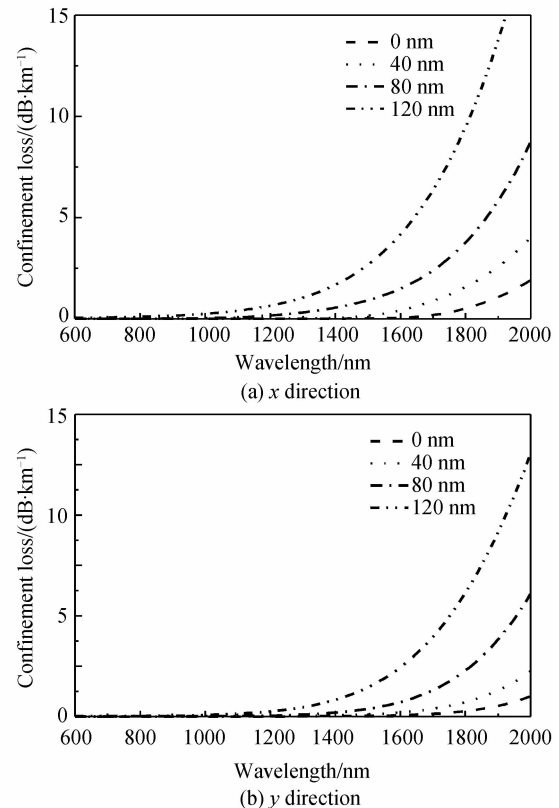


图 5 具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 在  $x$ 、 $y$  方向的限制损耗  
Fig. 5 The confinement loss of HB-PCFs with different thickness quantum dots films in  $x$  and  $y$  direction

始趋近于零,当泵浦光波长分别进入 1 000 nm、1 200 nm、1 500 nm 波段后损耗值  $L_c(\lambda)$  迅速上升,最终均在泵浦光波长为 2 000 nm 处达到最大值且分别为 4.044 38 dB/km、8.770 1 dB/km、19.518 86 dB/km. 对于图 5(b)而言,具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤在  $y$  方向的损耗曲线与图 5(a)中的  $x$  方向相似,只是损耗值  $L_c(\lambda)$  存在规律性变化. 当量子点薄膜厚度从 0 nm 增大到 120 nm 时,HB-PCF 光纤在  $y$  方向的损耗值  $L_c(\lambda)$  的最大值分别为 2.006 01 dB/km、4.505 86 dB/km、12.170 03 dB/km、26.111 07 dB/km. 对比图 5 可以发现具有相同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤在  $y$  方向的损耗值  $L_c(\lambda)$  最大值大于  $x$  方向. 综合图 4 和图 5 可以得出,当量子点薄膜厚度从 0 nm 增大到 120 nm 时,在相同泵浦光波长的条件下,HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向的损耗值  $L_c(\lambda)$  随着量子点薄膜厚度的增加而逐渐增大. 这说明,实验中通过沉积不同厚度的 CdSe/ZnS 量子点薄膜和选择合适的泵浦光波长,可有效控制 HB-PCF 光纤的损耗.

### 4 改进与优化

由图 5 可以看出当加入量子点薄膜的厚度分别为 40 nm、80 nm 和 120 nm 时,HB-PCF 光纤在长波长波段的损耗值  $L_c(\lambda)$  会急剧增大,这对长波长光在光纤中的传输尤为不利. 本文尝试只对纤芯周围空气孔选择性镀膜的方式来研究是否达到整体镀膜的效果,即如图 6 所示,只对直径为  $d_1$ 、 $d_2$  的空气孔镀不同厚度的量子点薄膜,对  $d_3$ 、 $d_4$  空气孔不镀膜.

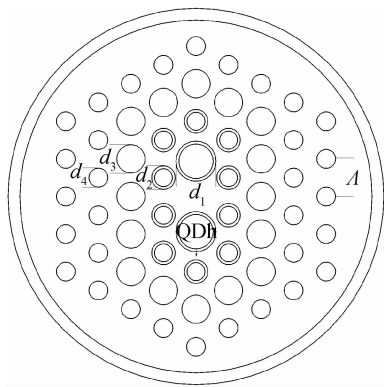


图 6 改进后具有量子点薄膜的 HB-PCF 光纤截面设计  
Fig.6 The improved cross sections of HB-PCF with quantum dots film

图 7 为改进后具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤的双折射随泵浦光波长的变化关系. 改进后 HB-PCF 光纤的双折射值  $B(\lambda)$  依然随泵浦光波长近似成线性递增关系. 对比图 3 和图 7 可以发现,改进后的 HB-PCF 光纤的双折射略微增大. 例如当加入量子点薄膜的厚度分别为 40 nm、80 nm 和 120 nm 时,在通信波长 1 550 nm 处,改进后 HB-PCF 光纤的双折射从

之前的 0.008 48、0.007 13、0.005 09 增大至 0.008 49、0.007 24、0.005 4. 综合图 3 和图 7 可以得出,只对纤芯周围直径为  $d_1$ 、 $d_2$  的空气孔选择性镀膜可以使双折射基本达到整体镀膜的效果,甚至略微优化.

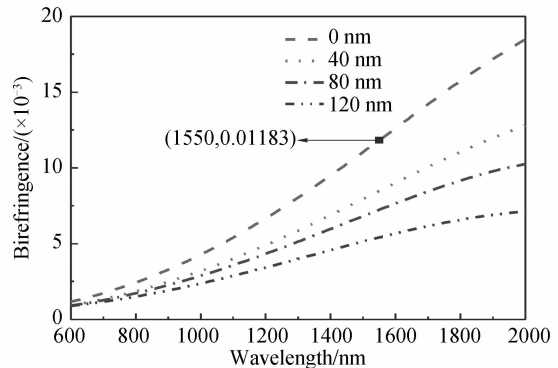


图 7 改进后具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 双折射随泵浦光波长的变化关系

Fig.7 The improved birefringence of HB-PCFs with different thickness quantum dots films

图 8 为改进后具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向的总色散随泵浦光波长的变化关系. 从图 8 可以看出,改进后 HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向的总色散值曲线与改进前相似,都是先增大后减小,同样存在双零色散点,且色散值所处范围也大体相同,只是在色散具体数值上和零色散点位置存在些微

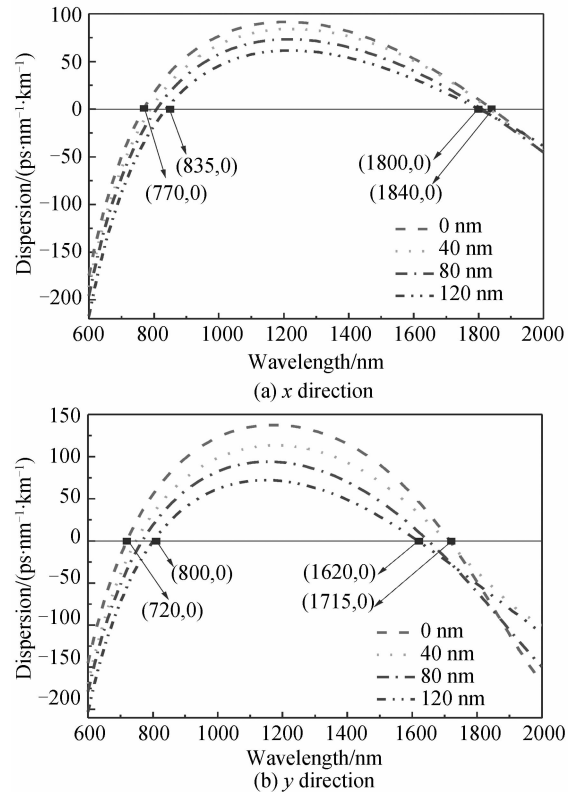


图 8 改进后具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 在  $x$ 、 $y$  方向的总色散

Fig.8 The improved dispersion of HB-PCFs with different thickness quantum dots films in  $x$  and  $y$  direction

差异. 例如当加入量子点薄膜的厚度分别为 40 nm、80 nm 和 120 nm 时, HB-PCF 光纤在  $x$  方向的第一零色散点从之前的 790 nm、810 nm、850 nm 附近移至 790 nm、810 nm、835 nm 附近, 可见变化并不明显. 需要指出的是, 改进后 HB-PCF 光纤在  $x$  方向和  $y$  方向的第二零色散点位置变化较明显, 但对色散曲线总体趋势影响不大. 综合图 4 和图 8 可以得出, 只对纤芯周围直径为  $d_1$ 、 $d_2$  的空气孔选择性镀膜可以使总色散基本达到整体镀膜的效果.

图 9 为改进后具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向的限制损耗随泵浦光波长的变化关系. 从图 9 可以看出, 改进后 HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向的限制损耗曲线与改进前相似, 都是在短波长波段趋近于与零, 后在长波长波段急剧增大. 对比图 5 (a) 和图 9(a) 可以发现, 改进后的 HB-PCF 光纤在  $x$  方向的限制损耗明显减少. 例如当加入量子点薄膜的厚度分别为 40 nm、80 nm 和 120 nm 时, 在通信波长 1 550 nm 处, HB-PCF 光纤在  $x$  方向的限制损耗从之前的 0.263 25 dB/km、1.169 63 dB/km、3.349 61 dB/km 减小至 0.002 96 dB/km、0.001 69 dB/km、0.000 83 dB/km. 从图 9(a) 还可以看出, 改进后加入量子点薄膜的 HB-PCF 光纤在  $x$  方向的限制损耗比未加入量子点薄膜时

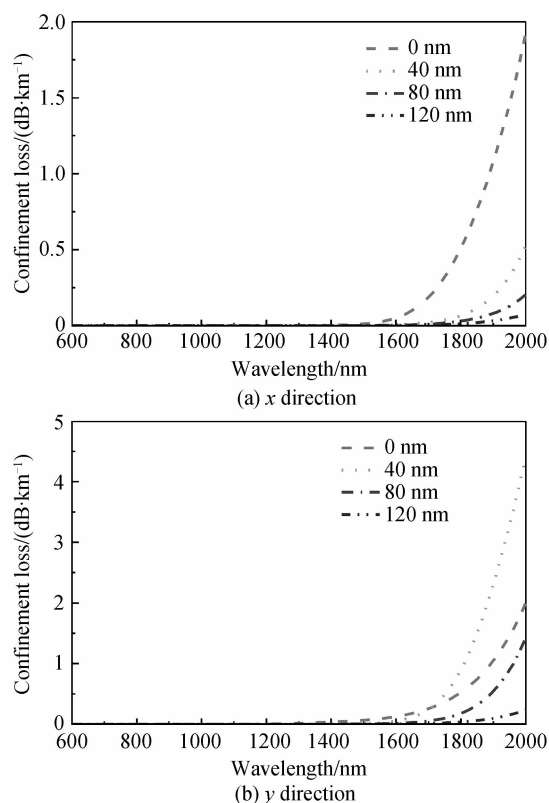


图 9 改进后具有不同量子点薄膜厚度的 HB-PCF 在  $x$ 、 $y$  方向的限制损耗

Fig. 9 The improved confinement loss of HB-PCFs with different thickness quantum dots films in  $x$  and  $y$  direction

要小且随着厚度的增加而减少. 由此可见通过选择性沉积 CdSe/ZnS 量子点薄膜及控制量子点薄膜厚度可有效优化 HB-PCF 光纤在  $x$  方向的限制损耗. 对比图 5(b) 和图 9(b) 可以发现, 改进后的 HB-PCF 光纤在  $y$  方向的限制损耗虽然不如  $x$  方向变化明显, 但也存在一定程度的减少. 例如当加入量子点薄膜的厚度分别为 40 nm、80 nm 和 120 nm 时, 在通信波长 1 550 nm 处, HB-PCF 光纤在  $y$  方向的限制损耗从之前的 0.289 01 dB/km、1.044 8 dB/km、3.775 33 dB/km 减小至 0.022 45 dB/km、0.006 67 dB/km、0.002 01 dB/km. 从图 9(b) 还可以看出, 加入量子点薄膜厚度为 80 nm、120 nm 的 HB-PCF 光纤在  $y$  方向的限制损耗比未加入量子点薄膜时要小且 120 nm 厚度的限制损耗比 80 nm 还要小. 因此, 通过选择性沉积 CdSe/ZnS 量子点薄膜以及控制量子点薄膜厚度可有效优化 HB-PCF 光纤在  $y$  方向的限制损耗. 结合图 5 和图 9 可以看出, 改进后加入量子点薄膜厚度为 120 nm 的 HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向的限制损耗都比未加入量子点薄膜时要小, 而且比 40 nm、80 nm 厚度还要小. 这说明在增加膜厚的情况下, 针对纤芯的选择性镀膜可有效控制限制损耗. 综合图 5 和图 9 可以得出, 只对纤芯周围直径为  $d_1$ 、 $d_2$  的空气孔选择性镀膜和控制 CdSe/ZnS 量子点薄膜的厚度可以优化限制损耗, 即与整体镀膜相比, 选择性镀膜的损失明显减少.

## 5 结论

本文基于有限元法, 设计了掺杂不同 CdSe/ZnS 量子点薄膜厚度的 HB-PCF 光纤, 分析了量子点薄膜厚度对 HB-PCF 光纤的色散和损耗特性的影响. 结果表明, 含 CdSe/ZnS 量子点薄膜结构的 HB-PCF 光纤在  $x$  和  $y$  方向均存在基模. 对于具有相同厚度 CdSe/ZnS 量子点薄膜的 HB-PCF 光纤, 当泵浦光波长逐渐增加时, 双折射值逐渐增大,  $x$  和  $y$  方向的总色散先增大后减小且存在两个零色散点, 损耗逐渐增大并在可见光波段趋近于零. 对于具有不同厚度 CdSe/ZnS 量子点薄膜的 HB-PCF 光纤, 随着 CdSe/ZnS 量子点薄膜厚度的增加, 在相同泵浦光波长处, 双折射值逐渐减小,  $x$  和  $y$  方向的总色散逐渐减小且两个零色散点逐渐靠近, 损耗逐渐增大. 通过只对纤芯周围气孔选择性镀膜的方式可使双折射和色散基本达到整体镀膜的效果并且有效控制限制损耗. 因此, 沉积不同厚度的 CdSe/ZnS 量子点薄膜和选择合适的泵浦光波长可以控制 HB-PCF 光纤的色散和损耗.

## 参考文献

- [1] ZHANG Ya-ni, REN Li-yong, WANG Li-li, *et al.* Progress in the study of high birefringence polarization maintained photonic crystal fibers[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(5): 577-582.



- 张亚妮,任立勇,王丽莉,等. 高双折射光子晶体保偏光纤研究进展[J]. 量子电子学报,2006,23(5):577-582.
- [2] YANG Yuan-hong, DUAN Wei-qian, YE Miao, *et al.* Technology of photonic crystal fiber gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(6):1143-1147.  
杨远洪,段玮倩,叶淼,等. 光子晶体光纤陀螺技术[J]. 红外与激光工程,2011, **40**(6):1143-1147.
- [3] ALEXANDRE B, RODRIGO M G, CHRISTIANO J S, *et al.* Temperature sensing using colloidal-core photonic crystal fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(1):195-200.
- [4] HU Ming-lie, SONG You-jian, LIU Bo-wen, *et al.* Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(7):1660-1670.  
胡明列,宋有建,刘博文,等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿[J]. 中国激光,2009, **36**(7):1660-1670.
- [5] CHEN Yang-ming, ZHANG Yong-kang. Research progresses of highly birefringent photonic crystal fibers[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, **31**(2):165-169.  
陈阳明,张永康. 高双折射光子晶体光纤研究进展[J]. 半导体光电,2010, **31**(2):165-169.
- [6] HE Li, YANG Bo-jun, ZHANG Xiao-guang, *et al.* Characteristics of photonic crystal fiber and its application in optical communication[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2006, **12**(4):225-230.  
何理,杨伯君,张晓光,等. 光子晶体光纤特性及光通信中的应用[J]. 量子光学学报,2006, **12**(4):225-230.
- [7] REN Guo-bin, LOU Shu-qin, WANG Zhi, *et al.* Study on dispersion properties of photonic crystal fiber by equivalent-index model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):319-323.  
任国斌,娄淑琴,王智,等. 有效折射率模型研究光子晶体光纤的色散特性[J]. 光学学报,2004, **24**(3):319-323.
- [8] CHENG Cheng, WU Yin-fei. Technology of photonic crystal fiber gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10):1014001.  
程成,吴寅飞. CdSe/ZnS 量子点非饱和单模光纤激光器的数值建模[J]. 光学学报,2011, **31**(10):1014001.
- [9] LI Bu-hong, ZHANG Zhen-xi, XIE Shu-sen. Research progress of quantum dots in biology[J]. *Acta Laesr Biology Sinica*, 2006, **15**(2):214-220.  
李步洪,张镇西,谢树森. 量子点在生物学中的研究进展[J]. 激光生物学报,2006, **15**(2):214-220.
- [10] ZHAO Wei, ZHANG Zhi-lin, PANG Dai-wen. Application of quantum dots as flourescent labels in medicine and biology [J]. *Chemical Sensors*, 2008, **28**(1):8-14.  
赵薇,张志凌,庞代文. 量子点荧光标记技术在生物医学领域的应用[J]. 化学传感器,2008, **28**(1):8-14.
- [11] YANG Dong-zhi, XU Shu-kun, CHEN Qi-fan. Application of quantum dots to biology probes [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(9):1807-1810.  
杨冬芝,徐淑坤,陈启凡. 量子点的荧光特性在生物探针方面的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2007, **27**(9):1807-1810.
- [12] BHATTACHARYA P, MI Z. Quantum-dot optoelectronic devices [C]. Proceedings of the IEEE, 2007, **95**(9):1723-1740.
- [13] WALKER G W, SUNDAR V C, RUDZINSKI C M, *et al.* Quantum-dot optical temperature probes [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(17):37-40.
- [14] YAN Hai-zhen, CHENG Cheng, ZHANG Qing-hao, *et al.* Effect of the temperature on absorption and photoluminescence spectra of CdSe/ZnS quantum dots [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, **29**(1):166-170.  
闫海珍,程成,张庆豪,等. 温度对 CdSe/ZnS 量子点吸收光谱和光致发光光谱的影响[J]. 发光学报,2008, **29**(1):166-170.
- [15] LARRION B, HERNAEZ M, ARREDUI F J, *et al.* Photonic crystal fiber temperature sensor based on quantum dot nanocoatings[J]. *Journal of Sensors*, 2009, **2009**:932471.
- [16] DECHER G. Fuzzy nanoassemblies; toward layered polymeric multicomposites[J]. *Science*, 1997, **277**(5330):1232-1237.
- [17] CRISP M T, KOTOV N A. Preparation of nanoparticle coatings on surfaces of complex geometry[J]. *Nano Letter*, 2003, **3**(2):173-177.
- [18] GOICOECHEA J, ARREGUI F J, CORRES J M, *et al.* Study and optimization of self-assembled polymeric multilayer structures with neutral red for pH sensing applications[J]. *Journal of Sensors*, 2008, **2008**:142854.
- [19] BASTIDA G D, ARREGUI F J, GOICOECHEA J, *et al.* Quantum dots-based optical fiber temperature sensors fabricated by layer-by-layer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, **6**(6):1378-1379.
- [20] WU Yin-fei. Numerical modeling of an single-mode fiber laser doped with CdSe/ZnS (core/shell) nanocrystal quantum dots [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.  
吴寅飞. CdSe/ZnS(核/壳)纳米晶体量子点单模光纤激光的数值建模[D]. 杭州:浙江工业大学, 2012.
- [21] LOU Shu-qin, WANG Zhi, REN Guo-bin, *et al.* Highly birefringent index guiding photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10):1310-1315.  
娄淑琴,王智,任国斌,等. 折射率导模高双折射光子晶体光纤[J]. 光学学报,2004, **24**(10):1310-1315.
- [22] LIANG Jian, YUN Mao-jin, KONG Wei-jin, *et al.* A novel highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2010, **39**(S1):39-42.  
梁健,云茂金,孔伟金,等. 新型高双折射光子晶体光纤特性分析[J]. 光子学报,2010, **39**(S1):39-42.
- [23] LI Zhi-quan, LI Sha, HAO Rui, *et al.* Hybrid dual-cladding photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(4):1044-1049.  
李志全,李莎,郝锐,等. 混合双包层高双折射光子晶体光纤的特性[J]. 红外与激光工程,2013, **42**(4):1044-1049.
- [24] GUO S, ALBIN S. Simple plane wave implementation method for photonic crystal calculations [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(2):167-175.
- [25] BRAVO J, GOICOECHEA J, CORRES J M, *et al.* Encapsulated quantum dot nanofilms inside hollow core optical fibers for temperature measurement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7):1368-1374.