

基于微结构纤芯的超低损耗多零色散点的高双折射光子晶体光纤

曹 晔 王江昀* 童峥嵘

(天津理工大学薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

摘要 提出了一种新型的微结构纤芯的光子晶体光纤,在纤芯中引入 10 个呈矩形排列的小圆空气孔,包层空气孔呈阶梯渐增结构。采用全矢量有限元法,通过改变纤芯小圆空气孔的大小和二者之间的孔间距,研究了这种光纤的基模模场、双折射、限制损耗和色散特性。研究表明,当小圆半径 $r_1=0.225\ \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda_2=1.30\ \mu\text{m}$ 时,在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处,双折射为 3.22×10^{-2} ,限制损耗低至 $4.92\times 10^{-8}\ \text{dB/m}$,且在 $0.6\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 之间可获得三个零色散点。另外,通过优化纤芯结构参数,在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处,双折射最大值可达 3.45×10^{-2} ,损耗最低达 $2.88\times 10^{-9}\ \text{dB/m}$ 。该设计为在光纤通信、光纤传感方面的应用提供了理论基础。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;微结构纤芯;高双折射;低损耗;有限元法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0905005

High Birefringence and Low Confinement Loss Photonic Crystal Fiber with Multiple Zero Dispersion Points Based on Micro-Structured Core

Cao Ye Wang Jiangyun Tong Zhengrong

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract A new kind of micro-structured core photonic crystal fiber with a rectangular array of ten air holes in the core region and the incremental cladding is proposed. Using the finite element method, the fundamental mode field, birefringence, confinement loss and dispersion characteristics are investigated simultaneously by changing the radii and pitches of the air holes in the core. Numerical results show that the birefringence and confinement loss are respectively about 3.22×10^{-2} and $4.92\times 10^{-8}\ \text{dB/m}$ at $1.55\ \mu\text{m}$ when the small air hole radius is $0.225\ \mu\text{m}$ and the cladding air hole pitch size is $1.30\ \mu\text{m}$, and three corresponding zero dispersion points can be obtained over the wavelength range from $0.6\ \mu\text{m}$ to $2.0\ \mu\text{m}$. In addition, the largest birefringence can reach up to 3.45×10^{-2} and the confinement loss reduces down to $2.88\times 10^{-9}\ \text{dB/m}$ by optimizing the structural parameters. The proposed photonic crystal fiber has a broad prospect of applications in fiber-optic communications, fiber optic sensing and other fields.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; micro-structured core; high birefringence; low confinement loss; finite element method

OCIS codes 060.2280; 060.2310; 060.2420; 060.5295

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)又称为微结构光纤或者多孔光纤,与传统光纤相比,其具有许多独特的光学性质,如无截止波长的单模传输特性、极低的损耗、可

调的非线性、良好的色散性质、高双折射特性、产生超连续谱等^[1-5],故受到广泛的关注。

高双折射光纤在高速光通信系统、光纤传感和精密光学仪器等^[6-7]领域都有着重要的应用。PCF

收稿日期: 2013-03-28; 收到修改稿日期: 2013-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(61107052)、天津市高等学校科技发展基金(20110704)

作者简介: 曹 晔(1976—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤通信与光纤传感等方面的研究。

E-mail: cynever@163.com

* 通信联系人。E-mail: yunyatou2007@163.com

由于其结构设计灵活,可以得到更高的双折射,而双折射是影响光纤通信系统性能的重要特性,故成为现今的研究热点。就 PCF 而言,其高双折射主要是通过破坏结构的对称性获得的,如改变纤芯的形状^[8]和纤芯周围的空气孔直径^[9],也可以改变包层空气孔的形状^[10]。2010 年,张美艳等^[11]设计了两种具有微结构纤芯的 PCF,即矩形芯和椭圆芯 PCF。研究表明,在包层空气孔不变的情况下,仅调节纤芯气孔的大小就可灵活调节光纤的基本特性,零色散波长由一个增加到三个,限制损耗达 10^{-3} dB/m,双折射达到 10^{-3} 量级。2012 年,Wang^[12]提出了一种混合晶格的 PCF,在纤芯引入矩形空气孔,并通过调整矩形孔的参数使其双折射可达 2×10^{-2} 。2012 年,Kim 等^[13]提出在包层是椭圆孔结构的纤芯中引入一个小椭圆孔,通过优化光纤的结构参数,双折射达 1.94×10^{-2} ,限制损耗达 0.1 dB/km。2012 年,Liao 等^[14]提出了一种在纤芯中引入 5 个小椭圆孔,在包层中引入两种不同尺寸椭圆孔的矩形结构,通过数值模拟得出,因为空气孔都是椭圆孔,增加了其结构不对称性,双折射高达 4×10^{-2} ,而限制损耗为 0.005 dB/km。由以上分析可得,在 PCF 中引入微结构,增加了光纤可调的结构参数,设计的自由度更大,更加容易设计出具有优良特性的 PCF。

本文提出了具有微结构纤芯的 PCF,通过在纤芯中引入小圆空气孔,形成具有两重旋转对称性的椭圆芯。利用全矢量有限元法研究了纤芯小圆空气孔的直径以及二者之间的间距变化对该光纤的基模模场分布、双折射、限制损耗和色散特性的影响。数值模拟发现,在纤芯中引入微结构可有效地调节 PCF 的基本特性,该种结构可实现较高的双折射,且由于包层空气孔渐变,也可实现良好的光约束特性,从而降低损耗,有利于光的远距离传输,同时又可实现灵活地调节其色散的目的。

2 理论基础与光纤结构

2.1 理论基础

有限元法^[15-16]是分析 PCF 物理特性的一种高效数值方法。其适用于截面是任意不规则形状、空气孔任意排布和材料折射率任意组合的情况。有限元法的基本原理是从麦克斯韦基本方程出发,导出 PCF 中的电磁波方程为

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

式中 H 为磁场强度; ϵ_r 和 μ_r 分别为介质的介电常数和磁导率, ω 是光波的角频率, c 是真空中光速。用有限元法建立适当的模型。计算区域的外部边界采用各向异性完美匹配层,可直接计算出传播常数 β 和模式有效折射率 n_{eff} 的复数形式,再由 n_{eff} 的实部可得到该模式的双折射 B 和波导色散系数 $D_w(\lambda)$ 。

模式双折射 B 是衡量光纤偏振特性的重要参数,基模的模式双折射^[17]可表示为

$$B = | \text{Re}(n_{\text{eff}}^x) - \text{Re}(n_{\text{eff}}^y) |, \quad (2)$$

式中 n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别表示 x 偏振方向和 y 偏振方向基模的有效折射率, Re 表示实部。

PCF 的色散 D 由两部分组成,即波导色散 $D_w(\lambda)$ 和材料色散 $D_M(\lambda)$,可表示为

$$D = D_w(\lambda) + D_M(\lambda). \quad (3)$$

本文采用的是纯石英材料,故对于不同结构参数的 PCF,材料色散 $D_M(\lambda)$ 相同,可由 Sellmeier 方程计算得到。其波导色散 $D_w(\lambda)$ 则是根据基模的有效折射率的实部,采用曲线拟合法计算得到,计算公式为^[18]

$$D_w(\lambda) = - \frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 | \text{Re}(n_{\text{eff}}) |}{\partial \lambda^2}, \quad (4)$$

式中 λ 是光在真空中的波长。

通过模式有效折射率 n_{eff} 的虚部可以得到该模式所对应的光纤的限制损耗^[11](其单位为 dB/m),即

$$L = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6, \quad (5)$$

式中 λ 的单位为 μm , Im 表示虚部。

2.2 光纤结构

图 1 是所设计的具有微结构纤芯的 PCF 的截面图,该光纤包层由四层空气孔组成,中心消去一个空气孔形成纤芯,在纤芯引入 10 个呈矩形排列的小圆孔结构,其基质仍为石英,折射率设为 1.45。包层空气孔间距 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$,外两层空气孔半径为 $1.05 \mu\text{m}$,内两层空气孔半径为 $0.86 \mu\text{m}$,纤芯处小圆直径为 d_1 ,小圆沿 X 轴的间距为 Λ_2 ,沿 Y 轴的间

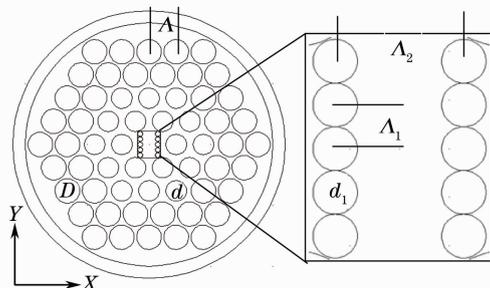


图 1 PCF 的截面图

Fig. 1 Cross section of the PCF

距为 $\Lambda_1 = 0.45 \mu\text{m}$ 。

3 模拟与结果分析

3.1 基模模场特性

基模是光波在光纤中传输时的最低阶模式，基模模场的分布是反映光纤性能和特性的重要指标。图 2 给出了波长在 $1.55 \mu\text{m}$ 处，X 偏振基模的模场分布情况。由图可看出，在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处，该光纤的光能量主要集中在纤芯内传输，在小圆空气孔半径 r_1 确定，孔间距减小时，纤芯空气孔与模场交叠程度增大，模场向包层区扩展较多，因而能量有一部分向包层泄漏。另外，模场均表现出向 Y 方向的延伸，呈现出椭圆形状，这主要是因为引入微结构纤芯，且纤芯处小圆空气孔沿 Y 方向分布，增大了 Y 方向的折射率，故使得模场向 Y 方向延伸。

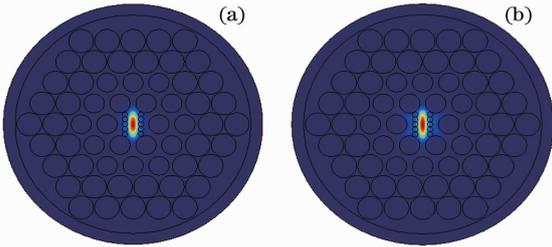
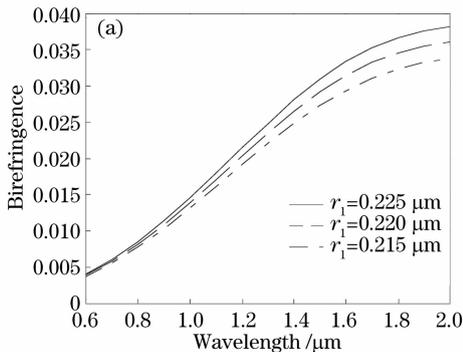


图 2 X 轴偏振模的功率分布。(a) $\Lambda_2 = 1.36 \mu\text{m}$, $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$; (b) $\Lambda_2 = 1.24 \mu\text{m}$, $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$

Fig. 2 Power distributions of polarization mode in X direction. (a) $\Lambda_2 = 1.36 \mu\text{m}$, $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$; (b) $\Lambda_2 = 1.24 \mu\text{m}$, $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$

3.2 双折射特性

图 3 给出了不同结构参数下双折射和波长的关系。图 3(a) 给出了小圆孔间距 $\Lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$ ，小圆空气孔半径 r_1 从 $0.215 \mu\text{m}$ 增加到 $0.225 \mu\text{m}$ 时，双



折射随波长的变化曲线。从图中可以看出双折射随着波长的增加而增加，同一波长处，小圆空气孔的直径越大，双折射越大。这主要是因为，光纤的双折射是由纤芯沿 X 和 Y 方向的不对称性引起的，对于 PCF 而言，其双折射主要由最内层气孔的不对称性引起，即 X 偏振模和 Y 偏振模的折射率不同造成的。纤芯结构参数一定时，随着波长的增加，模场向包层渗透，与内层气孔作用加强，X 偏振模与 Y 偏振模的渗透速度不同，导致两偏振模的有效折射率之差增大，双折射随之增大；而波长确定时，随着空气孔半径 r_1 的增大，模场与内层气孔的交叠程度增强，因此双折射逐渐增大。图 3(b) 给出了小圆半径 $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$ ，小圆孔间距 Λ_2 从 $1.24 \mu\text{m}$ 增加到 $1.36 \mu\text{m}$ 时，双折射随波长的变化曲线。同一波长处，小圆空气孔间距越小，双折射越大。这是因为 Λ_2 的减小会导致纤芯面积变小，从而使得模场与内层气孔的作用增强，双折射增大。故比较图 3(a) 和 (b) 得出，要想获得高双折射，小圆空气孔半径取 $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$ ，孔间距则要具体分析。

由图 3(b) 可得，当小圆半径 $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$ ，小圆孔间距 Λ_2 分别为 $1.24, 1.30, 1.36 \mu\text{m}$ 时，在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时，该光纤的双折射可分别达到 $3.45 \times 10^{-2}, 3.22 \times 10^{-2}, 3.05 \times 10^{-2}$ ，高于文献所报道的 2.0×10^{-2} [12], 1.94×10^{-2} [13]。比较得出，小圆孔间距 Λ_2 为 $1.24 \mu\text{m}$ 时，双折射最大，但是孔间距减小时，限制损耗增大了将近一个数量级，其限制损耗分别为 $5.48 \times 10^{-7} \text{ dB/m}, 4.92 \times 10^{-8} \text{ dB/m}, 1.06 \times 10^{-8} \text{ dB/m}$ 。由以上分析可得，光纤的双折射和限制损耗是相互制约的，因此研究时，应该综合考虑，使二者同时达到较理想的状态。

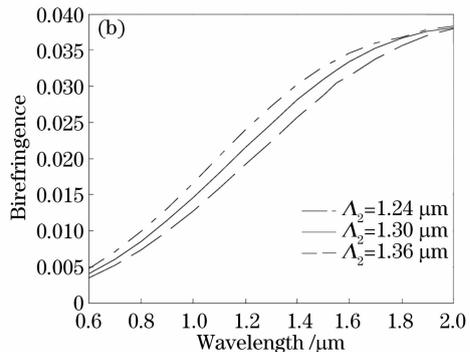


图 3 PCF 的双折射随波长的变化曲线。(a) $\Lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$ 时， r_1 从 $0.215 \mu\text{m}$ 变化到 $0.225 \mu\text{m}$ ；(b) $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$ 时， Λ_2 从 $1.24 \mu\text{m}$ 变化到 $1.36 \mu\text{m}$

Fig. 3 Birefringence variation with wavelength. (a) $\Lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$, r_1 varies from $0.215 \mu\text{m}$ to $0.225 \mu\text{m}$; (b) $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$, Λ_2 varies from $1.24 \mu\text{m}$ to $1.36 \mu\text{m}$

3.3 限制损耗

图 4 给出了不同结构参数下限制损耗和波长的关系。从图中可以看出,限制损耗随波长的增大而增加。波长 $\lambda \leq 1.5 \mu\text{m}$ 时,限制损耗变化比较缓慢,而当 $\lambda > 1.5 \mu\text{m}$ 时,限制损耗呈指数形式递增。这是因为 PCF 对短波长具有更强的约束性,光波主要束缚于纤芯内传输,相应的限制损耗小且变化也较平缓,而当波长增大时,光场的泄漏程度逐渐增加,相当一部分的能量扩散到包层中,导致限制损耗呈指数增加。由图 4(a)得出,小圆空气孔的孔间距确定时,限制损耗随着小圆空气孔直径的增大而增大,这与以前的研究结果(即限制损耗随着包层气孔的增大而减小)相矛盾,故内层的小空气孔被视为是纤芯的一部分而不是包层。由图 4(b)可知,小圆孔直径确定时,

限制损耗随着小圆孔间距的增大而减小,这一点由图 2 也可解释。但是孔间距 $\Lambda_2 = 1.36 \mu\text{m}$ 时,双折射的值较小。由图可得,当孔间距为 $\Lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$,小圆空气孔半径 r_1 分别为 $0.225, 0.220, 0.215 \mu\text{m}$ 时,该结构既可实现高双折射,又可获得较低的限制损耗。在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处,限制损耗分别低至 $4.92 \times 10^{-8} \text{ dB/m}, 2.34 \times 10^{-8} \text{ dB/m}, 2.88 \times 10^{-9} \text{ dB/m}$,远低于参考文献的 $0.005 \text{ dB/km}^{[14]}, 0.019 \text{ dB/km}^{[19]}$,但是其双折射也相应地减小,分别为 $3.22 \times 10^{-2}, 3.04 \times 10^{-2}, 2.84 \times 10^{-2}$ 。综上分析,本文选取小圆半径为 $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$ 。限制损耗低主要是因为包层中引入渐变增大的空气孔的结构,使光纤对光波的束缚能力增加,这种具有如此低限制损耗的结构,对于实现光的远距离传输是大有益处的。

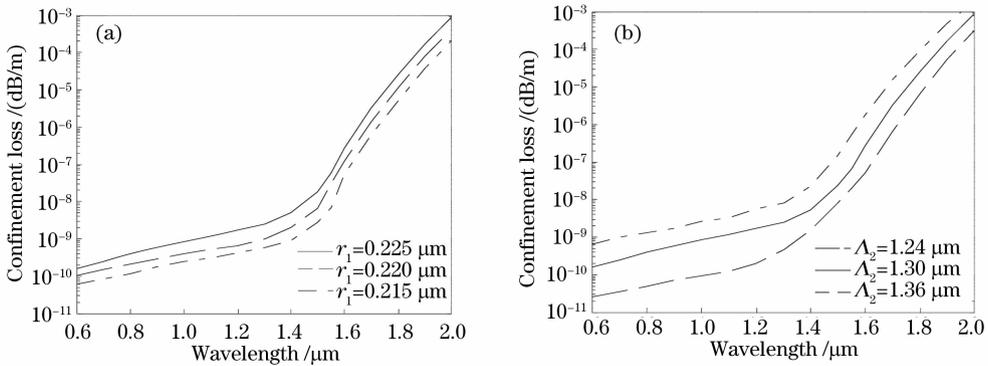


图 4 PCF 的限制损耗随波长的变化曲线。(a) $\Lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$ 时, r_1 从 $0.215 \mu\text{m}$ 变化到 $0.225 \mu\text{m}$;
(b) $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$ 时, Λ_2 从 $1.24 \mu\text{m}$ 变化到 $1.36 \mu\text{m}$

Fig. 4 Confinement loss variation with wavelength. (a) $\Lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$, r_1 varies from $0.215 \mu\text{m}$ to $0.225 \mu\text{m}$;
(b) $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$, Λ_2 varies from $1.24 \mu\text{m}$ to $1.36 \mu\text{m}$

3.4 色散特性

图 5 给出了该微结构纤芯的 X 轴偏振模总色散随结构参数和波长的变化关系。由图中可以看出,色散值随着小圆空气孔的直径和间距的增大而增大。当小圆孔间距 $\Lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$ 一定,半径 r_1 由 $0.215 \mu\text{m}$ 增加到 $0.225 \mu\text{m}$ 时,光纤的零色散波长由 2 个增加到 3 个,3 个零色散点分别位于可见光、近红外和中红外波段。多个零色散波长的 PCF 可以产生丰富的相位匹配曲线,有效控制光孤子及超短脉冲的四波混频及共振散射产生的光谱特性。当 $r_1 = 0.215 \mu\text{m}$ 时,在 $1.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的传输波段出现大的负色散值,这为宽带色散补偿的设计提供了一种思路。而当小圆半径 $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$ 一定,孔间距 Λ_2 由 $1.24 \mu\text{m}$ 增加到 $1.36 \mu\text{m}$ 时,光纤的零色散波长由 3 个减少到 2 个,且随着波长的增大,零色散点向长波长方向移动。通过以上分析可以看出,在纤

芯引入小圆空气孔,不仅可以增加纤芯的不对称性,使其具有高双折射特性,而且仅通过调节纤芯小圆气孔的半径 r_1 和二者之间的间距 Λ_2 就可以获得不同的色散特性,使其满足不同的应用需求。可见,微结构纤芯的引入为调节 PCF 的基本特性(如双折射和色散特性)提供了一种有效的方法。

文献 [20] 制备出了微小空气孔直径为 $0.110 \mu\text{m}$ 结构的 PCF,本文所设计的 PCF 纤芯空气孔半径为 $0.225 \mu\text{m}$,空气孔直径越大越容易拉制,所以设计的 PCF 在将来是可以制备出来的。

3.5 双折射可调谐特性

光纤在实际拉制过程中,由于误差的存在导致空气孔尺寸难以精确控制,且空气孔有时也会出现坍塌,而在空气孔中选择性地填充折射率 n_q 可调的液体可有效地提高双折射。图 6 给出了在波长 $1.55 \mu\text{m}$,纤芯孔间距 $\Lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$,小圆半径 $r_1 =$

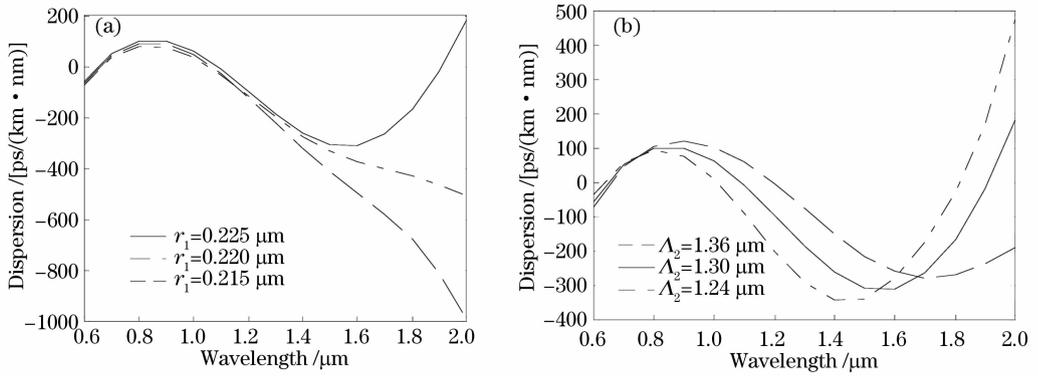


图 5 PCF 的色散系数随波长的变化曲线。(a) $\Delta_2 = 1.30 \mu\text{m}$ 时, r_1 从 $0.215 \mu\text{m}$ 变化到 $0.225 \mu\text{m}$;

(b) $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$ 时, Δ_2 从 $1.24 \mu\text{m}$ 变化到 $1.36 \mu\text{m}$

Fig. 5 Dispersion variation with wavelength. (a) $\Delta_2 = 1.30 \mu\text{m}$, r_1 varies from $0.215 \mu\text{m}$ to $0.225 \mu\text{m}$;

(b) $r_1 = 0.225 \mu\text{m}$, Δ_2 varies from $1.24 \mu\text{m}$ to $1.36 \mu\text{m}$

$0.225 \mu\text{m}$ 时, 在沿 X 轴的 8 个空气孔填充折射率变化的液体时双折射的变化曲线。由图 6 可以看出, 双折射随着填充液体折射率的增加而线性增加, 这是因为在空气孔中填充了不同折射率的液体, 增加了结构不对称性, 从而实现了其双折射的可调谐特性。在实际中, 可以通过填充折射率随温度变化的液体以达到调整 PCF 双折射值的目的, 而且这是一种对光纤的后处理方法, 较易实现。

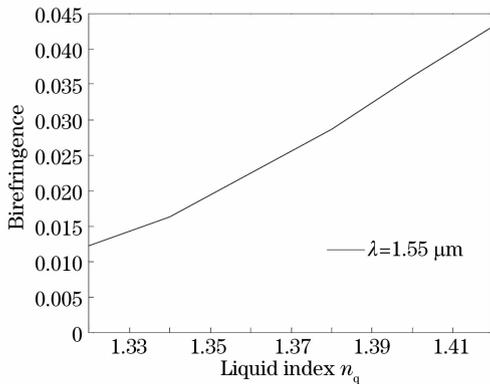


图 6 双折射随液体折射率的变化曲线

Fig. 6 Birefringence versus the liquid index

4 结 论

提出了一种在纤芯中引入 10 个小圆空气孔且包层空气孔渐变的具有微结构纤芯的 PCF, 利用全矢量有限元方法研究了它的基模模场分布、双折射、限制损耗和色散特性。数值模拟发现, 通过调整微结构纤芯的参数, 该光纤的双折射高达 3.22×10^{-2} , 限制损耗低至 $4.92 \times 10^{-8} \text{ dB/m}$, 同时分别在可见光、近红外和中红外波段出现三个零色散点。在此参数的基础上, 双折射在 $\Delta_2 = 1.24 \mu\text{m}$ 时可高达 3.45×10^{-2} ,

而当小圆半径 $r_1 = 0.215 \mu\text{m}$ 且孔间距 $\Delta_2 = 1.30 \mu\text{m}$ 时, 损耗可低至 $2.88 \times 10^{-9} \text{ dB/m}$ 。另外, 在包层空气孔直径不变时, 仅通过调节纤芯小空气孔的直径和二者之间的间距, 就可灵活调节光纤的特性。当小空气孔直径确定时, 随着孔间距的增大, 双折射逐渐减小, 限制损耗也相应减小, 零色散点由三个减小到两个; 而当小空气孔孔间距确定时, 随着直径的增加, 双折射和限制损耗均相应增大, 零色散点由两个增加到三个。通过在空气孔填充折射率可调的液体可实现双折射的可调谐。综上所述, 所设计的光纤可同时实现高双折射、超低限制损耗、多零色散点, 为其应用于高速光通信、光传感领域提供了一定的理论依据。

参 考 文 献

- 1 Qiang Xu, Miao Wang, Fei Liu, *et al.*. Theoretical design of single-polarization single-mode photonic crystal fiber [C]. International Conference on Electronics and Optoelectronics, 2011, 4: 178–181.
- 2 Zhang Yin, Chen Mingyang, Zhang Yongkang. Investigation of a novel large-mode-area photonic crystal fiber transmission system and its transmission characteristics[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1205001.
张 银, 陈明阳, 张永康. 新型大模场光子晶体光纤传输系统及其传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205001.
- 3 Geng Pengcheng, Zhang Weigang, Zhang Shanshan, *et al.*. Design of new type single-polarization single-mode photonic crystal fiber with wide bandwidth[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706001.
耿鹏程, 张伟刚, 张珊珊, 等. 新型宽带偏振单模光子晶体光纤的设计[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0706001.
- 4 Li Wei, Chen Hui, Chen Ming. High symmetry of the mode field distribution photonic crystal fiber with high birefringence [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0205002.
黎 薇, 陈 辉, 陈 明. 高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205002.
- 5 Wang Dan, Zheng Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber with flattened dispersion [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0806010.
王 丹, 郑 义. 双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分

- 析[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0806010.
- 6 M D Nielsen, C Jacobsen, N A Mortensen, *et al.*. Low-loss photonic crystal fibers for transmission system and their dispersion properties [J]. *Opt Express*, 2004, 12(7): 1372–1376.
- 7 F Begum, Y Namihira, S M A Razzak, *et al.*. Novel broadband dispersion compensating photonic crystal fibers: application in high-speed transmission systems [J]. *Optics Laser Technol*, 2009, 41(6): 679–686.
- 8 Lou Shuqin, Ren Guobin, Yan Fengping, *et al.*. Dispersion and polarization properties of near-rectangle core photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(3): 1229–1234.
娄淑琴, 任国斌, 延凤平, 等. 类矩形芯光子晶体光纤的色散与偏振特性[J]. *物理学报*, 2005, 54(3): 1229–1234.
- 9 Wang Wei, Yang Bo, Song Hongru, *et al.*. Characteristic analyses of high birefringence and two zero dispersion points photonic crystal fiber with octagonal lattices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(14): 144601.
王伟, 杨博, 宋鸿儒, 等. 八边形高双折射双零色散点光子晶体光纤特性分析[J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 144601.
- 10 Yang Yue, Guiyun Kai, Zhi Wang, *et al.*. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with squeezed hexagonal lattice[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(5): 469–471.
- 11 Zhang Meiyun, Li Shuguang, Yao Yanyan, *et al.*. Influence of micro-structured core on characteristics of photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(5): 3278–3284.
张美艳, 李曙光, 姚艳艳, 等. 微结构纤芯对光子晶体光纤基本特性的影响[J]. *物理学报*, 2010, 59(5): 3278–3284.
- 12 Wei Wang, Bo Yang, Hongru Song, *et al.*. Investigation of high birefringence and negative dispersion photonic crystal fiber with hybrid crystal lattice[J]. *Optik*, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.08.084>.
- 13 S E Kim, B H Kim, C G Lee, *et al.*. Elliptical defected core photonic crystal fiber with high birefringence and negative flattened dispersion [J]. *Opt Express*, 2012, 20(2): 1385–1391.
- 14 Jianfei Liao, Junqiang Sun. High birefringent rectangular-lattice photonic crystal fibers with low confinement loss employing different sizes of elliptical air holes in the cladding and the core [J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(6): 457–461.
- 15 Li Deyue, Zhou Guiyao, Xia Changming, *et al.*. Theoretical investigation of photonic crystal fiber with highly nonlinear and birefringent[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1105003.
李德月, 周桂耀, 夏长明, 等. 高非线性高双折射光子晶体光纤特性的理论研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1105003.
- 16 T Fujisawa, M Koshihara. Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers[J]. *Opt Express*, 2003, 11(13): 1481–1489.
- 17 Zhang Lei, Li Shuguang, Yao Yanyan, *et al.*. Characteristics of nano-structures photonic crystal fibers with high birefringence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(2): 1101–1107.
张磊, 李曙光, 姚艳艳, 等. 高双折射纳米结构光子晶体光纤特性研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(2): 1101–1107.
- 18 Y M Wang, X Zhang, X M Ren, *et al.*. Design and analysis of a dispersion flattened and highly nonlinear photonic crystal fiber with ultralow confinement loss[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(3): 292–297.
- 19 S S Mishra, V K Singh. Highly birefringence photonic crystal fiber with low confinement loss at wavelength 1.55 μm [J]. *Optik*, 2011, 122(22): 1975–1977.
- 20 G S Wiederhecker, C M B Cordeiro, F Couny, *et al.*. Field enhancement within an optical fiber with a subwavelength air core [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 115–118.

栏目编辑: 王晓球