

一种四排短轴渐减椭圆空气孔阵列的单模单偏振光子晶体光纤

郑宏军^{1,2} 吴重庆¹ 王 健¹ 王 智¹ 刘山亮² 黎 昕²

(¹北京交通大学理学院发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044; ²聊城大学光通信研究所, 山东 聊城 252059)

摘要 提出了一种新型的四排短轴渐减椭圆空气孔阵列的单模单偏振光子晶体光纤结构,并以完美匹配层为边界条件采用全矢量有限元方法研究了该光纤的各种特性及其各种参量随入射波长变化规律。研究表明,提出的光子晶体光纤结构是实现更宽带宽、色散平坦、单模单偏振运用的有效方案;在入射光波长为 $1.550\ \mu\text{m}$ 时,单模单偏振光子晶体光纤的模式双折射高达 2.752×10^{-3} ,拍长为 $0.564\ \text{mm}$; x 偏振模的限制损耗为 $0.139\ \text{dB/km}$, y 偏振模的限制损耗是 $16.890\ \text{dB/km}$;对比 x 偏振模损耗情况, y 偏振模可以在较短的光纤中被衰减掉,从而实现单模单偏振运用; x 偏振模的数值孔径为 0.415 ,有效模场面积为 $3.667\ \mu\text{m}^2$,非线性系数为 $28.740\ (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 。入射光波长在 $1.347\sim 1.691\ \mu\text{m}$ 的范围内,该光纤呈现出出色散平坦特性,使其在超连续谱产生、脉冲传输等领域具有广阔应用前景;该光纤能够在入射光波长 $600\ \text{nm}$ 较宽范围内实现单模单偏振运用。

关键词 光纤光学;单偏振单模;有限元方法;光子晶体光纤;短轴渐减椭圆空气孔;色散平坦

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0806003

A Novel Single-Polarization Single-Mode Photonic Crystal Fiber with Two Arrays of Four Lines of Semiminor-Axis-Decreasing Elliptical Air-Holes

Zheng Hongjun^{1,2} Wu Chongqing¹ Wang Jian¹ Wang Zhi¹ Liu Shanliang² Li Xin²

¹Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²Institute of Optical Communication, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China

Abstract A novel single-polarization single-mode photonic crystal fiber (SPSM-PCF) design with two arrays of four lines of semiminor-axis-decreasing elliptical air-holes is proposed. The proposed SPSM-PCF characteristics are investigated by using a full-vector finite element method (FEM) with perfect matched layer (PML) boundary conditions. The modal birefringence of the proposed SPSM-PCF is as high as 2.752×10^{-3} at the wavelength of $1.550\ \mu\text{m}$ and the beat length is $0.564\ \text{mm}$. The confinement loss of the x -polarization mode is as low as $0.139\ \text{dB/km}$, whereas the loss of the y -polarization mode is as large as $16.890\ \text{dB/km}$. Compared with the case of x -polarization mode, the y -polarization mode can be suppressed with a shorter fiber length. The numerical aperture is 0.415 , the effective mode-field area is $3.667\ \mu\text{m}^2$, and the nonlinear coefficient is $28.740\ (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ at the wavelength of $1.550\ \mu\text{m}$. The total dispersion profile of the SPSM-PCF is dispersion-flattened with the wavelength range from 1.347 to $1.691\ \mu\text{m}$. This dispersion property makes the proposed SPSM-PCF useful for various applications such as supercontinuum spectrum generation and pulse transmission. The spectral region of input light for SPSM operation is as wide as $600\ \text{nm}$. It indicates that this is a good solution to realize broadband dispersion-flattened SPSM operation.

Key words fiber optics; single-polarization single-mode; finite element method; photonic crystal fiber; semiminor-axis-decreasing elliptical air-hole; dispersion-flattened

OCIS codes 060.2280; 060.2330; 060.2310

收稿日期: 2011-04-07; 收到修改稿日期: 2011-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(60778017, 61077048, 60877057)、北京市自然科学基金(4092031)、山东省自然科学基金(ZR2011FM015)、山东省教育厅项目(J05C09)和北京交通大学、聊城大学项目资助课题。

作者简介: 郑宏军(1970—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信系统与器件、光波导与光纤光学、ROF等方面的研究。

E-mail: hjzheng@yahoo.com

导师简介: 吴重庆(1944—),男,硕士,教授,主要从事光纤通信系统与器件、光波导与光纤光学等方面的研究。

E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn(中国光学学会会员号: S0404200675)

1 引言

光子晶体光纤(PCF)也称多空气孔光纤或者微结构光纤,是光子晶体^[1,2]最重要、最成功的应用之一。光子晶体光纤就结构而言,可以分为实芯光纤^[3]和空芯光纤^[4]。实芯光纤是将石英玻璃毛细管以周期性规律排列在石英玻璃棒周围的光纤。空芯光纤是将石英玻璃毛细管以周期性规律排列在石英玻璃管周围的光纤。光子晶体光纤导光机理可以分为两类^[3,4]:折射率导光机理(实芯光纤)和光子能隙导光机理(空芯光纤)。光子晶体光纤结构设计很灵活,具有各种各样的小孔结构,导致光子晶体光纤具有奇异的特性,与普通单模光纤相比有着突出的优点:1)单模传输带宽非常宽;2)灵活可控的模场面积和非线性系数;3)可灵活地设计光子晶体光纤色散和限制损耗;4)优良的双折射效应。1996年Knight等^[3]研制出世界上第一根新型光波导——光子晶体光纤。1998年,Knight等^[4]又研制出另一种新型光波导——光子带隙光子晶体光纤(PBG-PCF)。此后,光子晶体光纤具有的奇异特性引起了世界科技工作者的普遍关注和广泛研究^[5~12],使得光子晶体光纤广泛应用于原子和粒子引导捕获、非线性光学、超连续光谱产生、脉冲压缩与整形、高次谐波产生和四波混频、波长变换、激光产生、短脉冲变换与控制、传感等领域,应用前景非常广阔。

近年来,通过恰当地设计光子晶体光纤,在一定的人射光波长范围内可以成功实现单模单偏振运作。文献[13]研制出具有椭圆芯和双圆空气孔包层的光子晶体光纤,在1550 nm波段附近50 nm带宽范围内实现了单模单偏振运用;文献[14]报道了具有三环圆空气孔包层的单模光子晶体光纤在波长727 nm附近220 nm带宽范围支持单偏振运作;文献[15]以完美匹配层为边界条件采用全矢量有限元方法研究了具有三角形点阵的圆空气孔包层单模单偏振光子晶体光纤,在1300 nm波段和1550 nm波段附近分别实现了84.7 nm带宽和103.5 nm带宽的单模单偏振运作;文献[16]设计了具有两排大中心空气孔的矩形格子点阵光子晶体光纤,实现了1200~1660 nm波长范围内的单模单偏振运作;文献[17]提出了一种具有正方形格子点阵的宽带宽单模单偏振光子晶体光纤,实现了1475~2035 nm波长范围内的单模单偏振运作;文献[18]设计了具有三角形格子点阵椭圆空气孔包层和圆空气孔芯的光子晶体光纤,实现了1350~1600 nm波长范围内的单模单偏振运作;文献[19]采用全矢量有限元方法

研究了具有六角形格子点阵小圆空气孔外包层和大圆空气孔内包层的光子晶体光纤,低损耗单模单偏振运用带宽达到120 nm。单模单偏振光子晶体光纤能够有效消除偏振模色散和偏振模式耦合,在高功率光纤激光器、光纤陀螺、传感和光通信等各种领域得到了密切关注和广泛应用^[13~19]。

本文提出了一种新型的具有四排短轴渐减椭圆空气孔点阵包层的光子晶体光纤,旨在实现更宽带宽、色散平坦的单模单偏振运作,从而为光纤偏振器、光子晶体传输光纤等实用化提供支持,以补充上述文献研究在带宽方面和未涉及色散等方面的不足;以完美匹配层为边界条件采用全矢量有限元方法研究了所提出的单模单偏振光子晶体光纤的各种特性及各种参量随入射波长变化规律。研究表明,提出的光子晶体光纤结构是实现更宽带宽、色散平坦、单模单偏振运用的有效方案。文献[20]表明椭圆空气孔光纤能够较容易地制备。

2 单模单偏振光子晶体光纤的横截面与理论模型

图1是所提出的单模单偏振光子晶体光纤的横截面示意图。该光纤整体上是五环六角形格子椭圆空气孔点阵,其中中间包层具有三排大椭圆空气孔点阵,外包层具有两个四排短轴渐减椭圆空气孔点阵。六角形格子椭圆空气孔点阵使得光纤具有单模双折射特性,中间包层具有三排大椭圆空气孔点阵确保了 x 偏振模的限制损耗足够小,外包层的四排短轴渐减椭圆空气孔点阵有效地增加了 y 偏振模的限制损耗,使 y 偏振模得到足够的衰减,从而实现单模单偏振运用。图中灰色区域是纯二氧化硅,椭圆

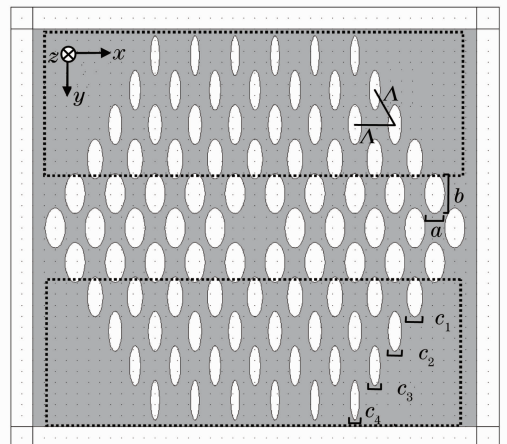


图1 单模单偏振光纤的横截面示意图

Fig. 1 Cross section of the proposed SPSM-PCF

表示空气孔,外围的实线矩形区域表示完美匹配层边界,虚线矩形区域内是两个四排短轴渐减椭圆空气孔点阵。大椭圆空气孔沿 x 轴和 y 轴的直径分别表示为 a 和 b ,空气孔的间隔为 $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$,椭圆比率为 $\eta = b/a = 2$ 。其中 $a = 0.5\Lambda = 0.9 \mu\text{m}$, $b = 2a = 1.8 \mu\text{m}$ 。二氧化硅和空气孔的折射率分别是 1.45 和 1。短轴渐减椭圆空气孔沿 x 轴的直径分别表示为 c_1, c_2, c_3 和 c_4 ,沿 y 轴的直径表示为 d ,其中 $c_1 = 0.7 \mu\text{m}$, $c_2 = 0.6 \mu\text{m}$, $c_3 = 0.5 \mu\text{m}$, $c_4 = 0.4 \mu\text{m}$ 和 $d = b = 1.8 \mu\text{m}$ 。在光纤中传输电磁场的模场特性可以通过改变这些空气孔的形状和空间分布来改变。

由麦克斯韦方程组可以得到光子晶体光纤中光波电场亥姆霍兹方程^[19]

$$\nabla \times (\boldsymbol{\mu}_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \boldsymbol{\varepsilon}_r \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空波数, λ 为入射光的波长, $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y) \exp(i\beta z)$ 为入射光的电场, β 为传播常数, $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ 和 $\boldsymbol{\mu}_r$ 分别是介质的相对电容率张量和相对磁导率张量。采用全矢量有限元方法理论,由(1)式得到复本征值方程为

$$\mathbf{A}\mathbf{E} = k_0^2 n_{\text{eff}}^2 \mathbf{B}\mathbf{E}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为有限元系数矩阵, \mathbf{E} 为离散的电场本征矢量, n_{eff} 为复有效折射率。所提出的单模单偏振光子晶体光纤的模式双折射 B 由两个正交偏振模有效折射率实部之差得到^[21,22],模式双折射的拍长定义为 $L_B = \lambda/B$ 。单模单偏振光子晶体光纤的限制损耗定义为^[23]

$$\alpha_{\text{dB}} = 1000 \times 40\pi \times \text{Im } n_{\text{eff}} / [(\ln 10)\lambda], \quad (3)$$

式中 $\text{Im } n_{\text{eff}}$ 为有效折射率 n_{eff} 的虚部。色散作为光纤的重要参量之一,包括材料色散和波导色散两部分。材料色散(二氧化硅)可以从 Sellmeier 方程^[24]

$$n^2 = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2}, \quad (4)$$

和群速度色散参量方程^[24]

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}, \quad (5)$$

计算得到,式中 n 是传输介质的折射率, λ 是入射光波长, $m = 3$, $B_1 = 0.6961663$, $B_2 = 0.4079426$, $B_3 = 0.8974794$, $\lambda_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 9.896161 \mu\text{m}$, $\lambda_j = 2\pi c/\omega_j$, ω_j 是介质的谐振角频率, c 是真空中光速, D 是群速度色散参量,是在工程应用中非常有用的实际测量参量。波导色散可以从(5)式和有效折射率 n_{eff} 实部随入射光波长的变化得到。单模单偏振光子晶体光纤的有效模场面积定义为^[24,25]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint_{\text{core}} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint_{\text{core}} |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (6)$$

非线性系数定义为^[26]

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (7)$$

式中 n_2 为光纤的非线性折射率系数。由(7)式可以得到,光纤的非线性系数反比于有效模场面积,可以通过改变光纤设计减小光纤的模场面积来增强非线性效应。数值孔径是表征光子晶体光纤收集入射光的能力,与模场面积有关。数值孔径近似为^[26]

$$NA \approx (1 + \pi A_{\text{eff}}/\lambda^2)^{-1/2}. \quad (8)$$

光子晶体光纤的复有效折射率、模场分布可以采用全矢量有限元方法求解(1)和(2)式得到。光子晶体光纤限制损耗、色散、模场面积、非线性系数和数值孔径可以通过分别求解(3)~(8)式得到。

3 单模单偏振光子晶体光纤的特性

首先采用全矢量有限元方法计算了三环圆空气孔包层的光子晶体光纤的限制损耗,计算结果与文献^[27]给出的结果吻合,表明采用的全矢量有限元方法是正确、可靠的。

3.1 单模单偏振光子晶体光纤电场分布

图 2 是入射光波长为 $1.550 \mu\text{m}$ 时 x 和 y 偏振模的电场分布,箭头表示偏振方向;横向箭头表征 x 偏振模电场,纵向箭头表征 y 偏振模电场。由图 2 可以得到, x 和 y 偏振模的电场关于光纤中心 x 和 y 轴是对称分布的, y 偏振模电场向包层的扩展比 x 偏振模电场向包层的扩展更明显。这表明 x 偏振模的限制损耗比 y 偏振模的限制损耗小,也进一步表明采用四排短轴渐减椭圆空气孔点阵增加 y 偏振模衰减的有效性。在入射光波长为 $1.550 \mu\text{m}$ 时,模式双折射为 2.752×10^{-3} ,拍长为 0.564mm ; x 和 y 偏振模的限制损耗分别是 0.139dB/km 和 16.890dB/km ;若按照目前常规通信系统跨距 80km 、发射功率 0dBm 计算,经过该光纤传输 80km 后, x 偏振模功率衰减至 -11.120dBm , y 偏振模功率衰减到 -1351.200dBm ,而常规光谱仪等探测器件的实际背景噪声为 -60dBm 左右,这样, x 偏振模可以被探测并再放大, y 偏振模在光纤传输中被衰减掉,从而实现单模单偏振运用;或者,经过该光纤传输 4km 后, x 偏振模功率衰减至 -0.556dBm , y 偏振模功率衰减到 -67.560dBm , y 偏振模被衰减掉,从而实现单模单偏振运用。当该光纤用于超连续谱产生

实验时,可以适当控制入射光的耦合条件,并对 y 偏振模式进行一些增大衰减的措施,或者对超连续谱切片后,经过合适长度的光纤将 y 偏振模式传输衰减掉,进而实现单模单偏振运用。 x 偏振模的数

值孔径为 0.415,有效模场面积为 $3.667 \mu\text{m}^2$,非线性系数为 $28.740 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 。随着入射波长的增加, y 偏振模在更短的光纤传输后被衰减掉,可广泛应用于不同的光纤器件中。

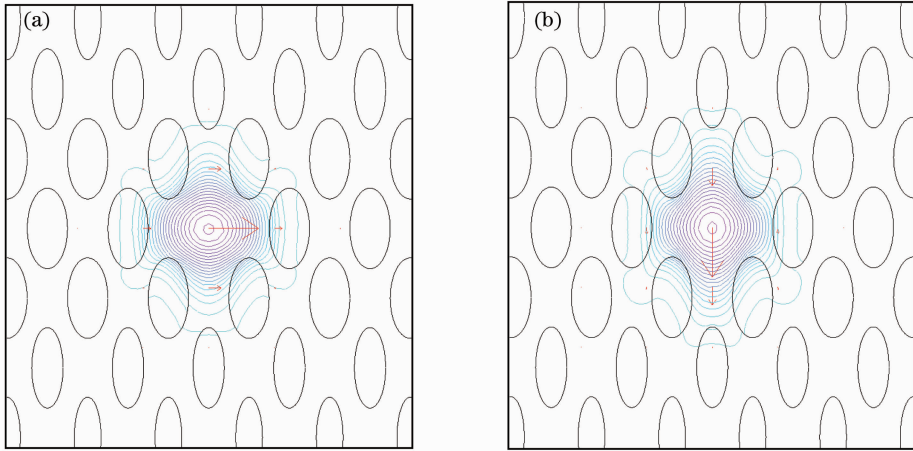


图 2 x 偏振模(a)和 y 偏振模(b)的电场分布

Fig. 2 Electric-field distributions of x -polarization (a) and y -polarization (b) modes

3.2 有效折射率和模式双折射随入射光波长的变化

图 3 是单模单偏振光子晶体光纤的有效折射率和模式双折射随入射光波长的变化。图 3(a) 中带小圆圈和小方块的实线分别表示 x 和 y 偏振模的有效折射率随入射光波长的变化,图 3(b) 中带小圆圈的实线表示模式双折射(即 y 和 x 偏振模的有效折射率之差)随入射光波长的变化。由图 3 可以得到,单模单偏振光子晶体光纤的 x 和 y 偏振模的有效折射

率随入射光波长的增加而减小;在图 3 所示入射光波长范围内, x 偏振模的有效折射率随波长增加由 1.422 减小到 1.360, y 偏振模的有效折射率随波长增加由 1.423 减小到 1.366;对应同一入射光波长, y 偏振模的有效折射率比 x 偏振模的有效折射率要大,两者之差随入射光波长的增加而增加,也就是说模式双折射随入射光波长的增加而增加,当入射光波长为 $2 \mu\text{m}$ 时,模式双折射可高达 5.840×10^{-3} 。

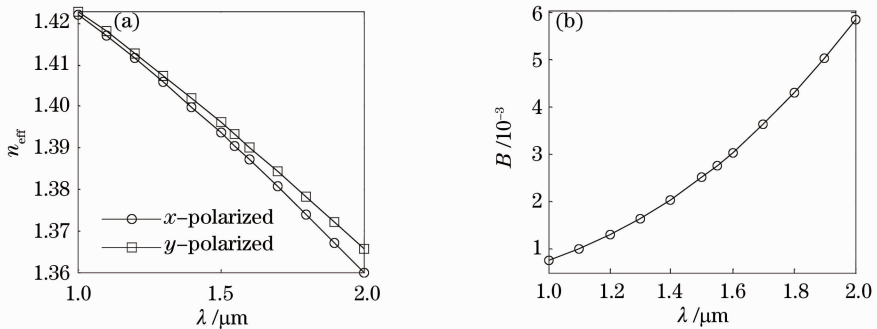


图 3 有效折射率(a)和模式双折射(b)随入射光波长的变化

Fig. 3 Variations of effective refractive index (a) and modal birefringence (b) with wavelength of incident light

3.3 限制损耗及其差值随入射光波长的变化

图 4 是限制损耗及其差值随入射光波长的变化。图 4(a)中带小圆圈和小方块的实线分别是 x 和 y 偏振模的限制损耗随入射光波长的变化,图中采用半对数坐标;图 4(b)中实线是 y 偏振模和 x 偏振模的限制损耗差值随入射光波长的变化,图中限制损耗差值采用半对数坐标。由图 4 可得, x 和 y 偏振模的限制损耗随入射光波长增加迅速增加;在图 4 所示入

射光波长范围内, x 偏振模的限制损耗随波长增加由 $6.470 \times 10^{-6} \text{ dB/km}$ 增加到 $1.257 \times 10^2 \text{ dB/km}$, y 偏振模的限制损耗随波长增加由 $3.747 \times 10^{-4} \text{ dB/km}$ 迅速增加到 $2.167 \times 10^4 \text{ dB/km}$ 。对应同一入射光波长, y 偏振模的限制损耗比 x 偏振模的限制损耗明显要大; y 偏振模的限制损耗与 x 偏振模的限制损耗的差值随入射光波长的增加而呈指数迅速增加,由入射光波长 $1 \mu\text{m}$ 时对应的损耗差值 $3.682 \times$

10^{-4} dB/km增加到入射光波长为 $2 \mu\text{m}$ 时对应的 2.155×10^4 dB/km。该光纤是折射率引导型光子晶体光纤,其导光机制与传统光纤的全内反射机制类似。通过在包层中引入空气孔,降低包层的有效折射率 n_{clad} ,使得纤芯折射率 n_{core} 大于包层折射率 n_{clad} ,其导光模式折射率 n_{mode} 满足 $n_{\text{core}} > n_{\text{mode}} > n_{\text{clad}}$,从而光纤对导光模式形成全内反射。当入射光波长小于包层中空气孔尺寸时,空气孔阻碍入射光向包层的泄漏作用加强,光纤的限制损耗减小;当入射光

波长大于包层中空气孔尺寸时,入射光经过空气孔向包层的衍射作用加强,空气孔阻碍入射光向包层的泄漏作用减弱,光纤的限制损耗增大;同时,在 y 方向的外包层四排短轴渐减椭圆空气孔点阵有效地增加了 y 偏振模的限制损耗,使 y 偏振模得到足够的衰减,从而实现单模单偏振运用。按照 3.1 节关于单模单偏振运用的讨论,可在入射光波长在 $1.4 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围内容易地实现单模单偏振运用。

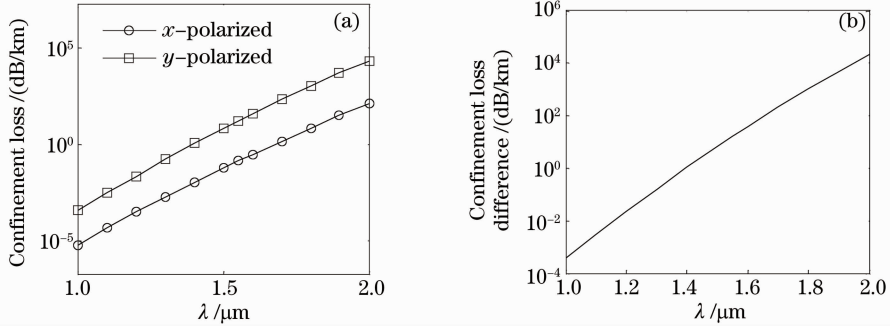


图 4 限制损耗(a)及其差值(b)随入射光波长的变化

Fig. 4 Variations of confinement losses (a) and the difference (b) with wavelength of incident light

3.4 色散、有效模场面积、数值孔径和非线性系数随入射光波长的变化

图 5 是单模单偏振光子晶体光纤色散(a)、有效模场面积(b)、数值孔径(c)和非线性系数(d)随入射光波长的变化。图 5(a)中点线为材料色散,点划线是波导色散,实线所示是单模单偏振光子晶体光纤的总色散。光纤色散在光通信系统中具有重要作用,色散平坦特性是波分复用系统一个重要特性。由图 5 可以得到,材料色散随入射光波长增加逐渐增加,波导色散在入射光波长 $1.1 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 范围内随波长增加而减小,导致光纤总色散在入射光波长在 $1.347 \sim 1.691 \mu\text{m}$ 的 344 nm 范围内非常平坦;在 $1.347 \mu\text{m}$ 处的色散值为 $117.835 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$,在 $1.585 \mu\text{m}$ 处光纤具有色散最大值 $119.827 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$,在 $1.691 \mu\text{m}$

处的色散值为 $117.846 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$;该光纤在 $1.347 \sim 1.691 \mu\text{m}$ 范围内的色散平坦度(研究波段范围内最大值与最小值之差)为 $1.992 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$,优于文献[28]的 $0.83 \sim 1.02 \mu\text{m}$ 范围内的色散平坦度 $9 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$,比文献[29]的 $1.480 \sim 1.620 \mu\text{m}$ 范围内的色散平坦度 $1.8 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 稍差,比文献[30]的 $1.480 \sim 1.580 \mu\text{m}$ 范围内的色散平坦度 $2 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 要好;该光纤的色散平坦范围 344 nm 远大于文献[28]的 190 nm 、文献[29]的 140 nm 和文献[30]的 100 nm 。这种宽带宽的色散平坦特性使得该光纤在通信系统中具有重要应用价值,如脉冲传输和超连续谱产生等。光纤的有效模场面积随入射光波长增加由波长 $1 \mu\text{m}$ 时对应的 $3.008 \mu\text{m}^2$ 增加到 $2 \mu\text{m}$ 时对应的 $4.493 \mu\text{m}^2$ 。光纤的数值孔径随入射光波长增加由

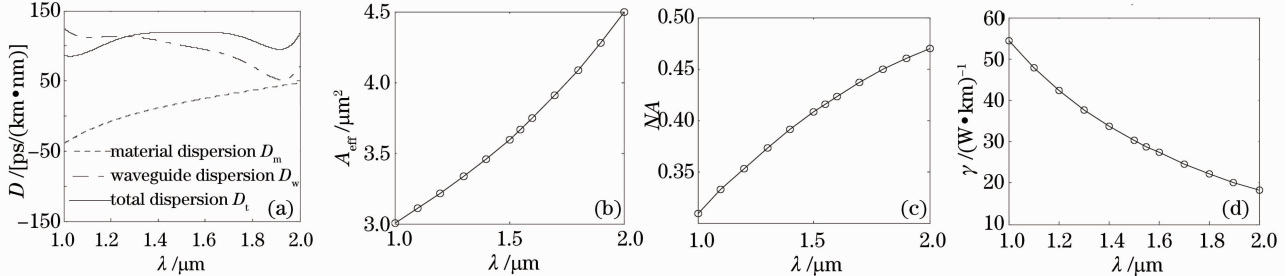


图 5 光纤色散(a),有效模场面积(b),数值孔径(c)和非线性系数(d)随入射光波长的变化

Fig. 5 Variations of the fiber's dispersion (a), effective mode-field area (b), numerical aperture (c) and nonlinear coefficient (d) with wavelength of incident light

波长 $1\ \mu\text{m}$ 时对应的 0.309 增加到 $2\ \mu\text{m}$ 时对应的 0.470 。光纤的非线性系数随入射光波长增加由波长 $1\ \mu\text{m}$ 时对应的 $54.313\ (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 减小到 $2\ \mu\text{m}$ 时对应的 $18.180\ (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 。

4 结 论

研究表明,提出的光子晶体光纤结构是实现更宽带宽、色散平坦和单模单偏振运用的有效方案。在入射光波长为 $1.550\ \mu\text{m}$ 时,单模单偏振光子晶体光纤的模式双折射高达 2.752×10^{-3} ,拍长为 $0.564\ \text{mm}$; x 偏振模的限制损耗是 $0.139\ \text{dB/km}$, y 偏振模的限制损耗为 $16.890\ \text{dB/km}$; 对比 x 偏振模损耗情况, y 偏振模可以在很短的光纤中被衰减掉,从而实现单模单偏振运用; x 偏振模的数值孔径为 0.415 ,有效模场面积为 $3.667\ \mu\text{m}^2$,非线性系数为 $28.740\ (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 。在入射光波长 $1.347\sim 1.691\ \mu\text{m}$ 范围内,该光纤呈现出宽带、色散平坦特性,使其在超连续谱产生、脉冲传输等领域具有广阔应用前景。该光纤能够在入射光 $600\ \text{nm}$ 的较宽范围内实现单模单偏振运用。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 4 J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. *Science*, 1998, **282**(5393): 1476~1478
- 5 P. St. J. Russell. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 6 Fang Xiaohui, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. Hundreds of megawatts peak power multi-core photonic crystal fiber laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2365~2370
方晓惠, 胡明列, 刘博文等. 百兆瓦峰值功率的多芯光子晶体光纤飞秒激光放大系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2365~2370
- 7 Rao Yunjiang, Li Hong, Zhu Tao *et al.*. High temperature strain sensor based on in line Fabry-Perot interferometer formed by hollow core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1484~1487
饶云江, 黎宏, 朱涛等. 基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉式高温应变传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1484~1487
- 8 Sun Tingting, Wang Zhi, Li Chuanqi. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber by using quasi-continuous pump[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 154~159
孙婷婷, 王志, 李传起. 准连续光抽运光子晶体光纤产生超连续谱[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 154~159
- 9 Zhang Xin, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Bound state operations in stretched-pulse mode locking large mode area photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2243~2247
张鑫, 胡明列, 宋有建等. 大模场面积光子晶体光纤激光开展宽脉冲锁模域的束缚态运转[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2243~2247
- 10 Sun Bing, Chen Mingyang, Zhou Jun *et al.*. Design of a broadband mode converter based on an asymmetric dual-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1581~1585
孙兵, 陈明阳, 周骏等. 非对称双芯光子晶体光纤宽带模式转换器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1581~1585
- 11 Zhang Zhihua, Shi Yifei, Bian Baomin *et al.*. Study on coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 228~232
张智华, 石一飞, 卞保民等. 混合导光机制光子晶体光纤双芯耦合研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 228~232
- 12 Wen Ke, Wang Rong, Wang Jingyuan *et al.*. A novel wavelength-division demultiplexer based on hybrid photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1088~1091
文科, 王荣, 汪井源等. 基于混合导光型光子晶体光纤的波分解复用器研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1088~1091
- 13 D. A. Nolan, G. E. Berkey, M. J. Li *et al.*. Single-polarization fiber with a high extinction ratio[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16): 1855~1857
- 14 J. R. Folkenberg, M. D. Nielsen, C. Jakobsen. Broadband single-polarization photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(12): 1446~1448
- 15 J. Ju, W. Jin, M. S. Demokan. Design of single-polarization single-mode photonic crystal fiber at 1.30 and $1.55\ \mu\text{m}$ [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(2): 825~830
- 16 F. D. Zhang, M. Zhang, X. Y. Liu *et al.*. Design of wideband single-polarization single-mode photonic crystal fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(5): 1184~1189
- 17 M. Y. Chen, B. Sun, Y. K. Zhang. Broadband single-polarization operation in square-lattice photonic crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(10): 1443~1446
- 18 D. J. J. Hu, P. Shum, C. Lu *et al.*. Holey fiber design for single-polarization single-mode guidance[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(20): 4038~4043
- 19 K. Saitoh, M. Koshiba. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10): 1384~1386
- 20 N. A. Issa, M. A. van Eijkelenborg, M. Fellew *et al.*. Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1336~1338
- 21 L. An, Z. Zheng, Z. Li *et al.*. Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss using four airholes in the core[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(15): 3175~3180
- 22 T. J. Yang, L. F. Shen, Y. F. Chau *et al.*. High birefringence and low loss circular air-holes photonic crystal fiber using complex unit cells in cladding [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(17): 4334~4338
- 23 M. Y. Chen, R. J. Yu, A. P. Zhao. Confinement losses and optimization in rectangular-lattice photonic-crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(9): 2707~2712
- 24 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Singapore: Elsevier Pte Ltd., 2009. 1~528
- 25 M. Moenster, Steinmeyer, R. Iliev *et al.*. Analytical relation between effective mode field area and waveguide dispersion in microstructure fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3249~3251
- 26 N. A. Mortensen. Effective area of photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 341~348
- 27 M. Koshiba, K. Saitoh. Polarization-dependent confinement losses in actual holey fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5): 691~693
- 28 Yuan Jinhui, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Experiment and fabrication of photonic crystal fiber with flattened dispersion and

- high nonlinearity[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(8): 1007~1010
- 苑金辉, 侯蓝田, 周桂耀 等. 平坦色散高非线性光子晶体光纤的制备与实验[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(8): 1007~1010
- 29 Zhou Huili, Zhang Xia, Gao Jian *et al.*. Theoretical and experimental analysis of wavelength conversion in dispersion-flattened photonic crystal fibers[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(1): 28~31
- 周会丽, 张霞, 高健 等. 色散平坦光子晶体光纤中实现光波变换的研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(1): 28~31
- 30 T. Yamamoto, H. Kubota, S. Kawanishi *et al.*. Supercontinuum generation at 1.55 μm in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(13): 1537~1540