

doi:10.3788/gzxb20184705.0506003

# 温度可控极高负色散光子晶体光纤的研究

吴宵宵, 张晓, 范万德, 李乙钢, 曹学伟

(南开大学 物理科学学院, 天津 300071)

**摘 要:**设计了一种温度调控的液晶填充光子晶体光纤,利用有限元法对光子晶体光纤的色散补偿特性进行数值模拟.从理论上分析了各结构参数对光子晶体光纤色散产生的影响,并进行结构参数优化.通过调节液晶折射率,将色散补偿位置精确调节至 1 550 nm 处,负色散峰值为  $-426\ 000\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ . 2 m 长液晶填充光子晶体光纤可以补偿 50 000 m 的标准单模光纤(G652).模拟结果显示,色散补偿波长随填充液晶有效折射率指数发生变化,通过温度调节可以实现 1 533 nm~1 552 nm 波长内的定量控制.

**关键词:**光纤光学;光子晶体光纤;温度可控;色散补偿;双芯光纤;有限元法;数值模拟;液晶填充;模式耦合

中图分类号:O437

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)05-0506003-7

## Study on the Temperature Tuning Ultra-high Negative Dispersion Photonic Crystal Fiber

WU Xiao-xiao, ZHANG Xiao, FAN Wan-de, LI Yi-gang, CAO Xue-wei

(School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** A temperature-controlled liquid crystal filling photonic crystal fiber was designed. The dispersion compensation characteristics of photonic crystal fiber were numerically simulated by using the finite element method. The effects of various structural parameters on the photonic crystal fiber dispersion were theoretically analyzed. And the structure parameters were adjusted. By adjusting the liquid crystal's refractive index, dispersion compensation location can be precisely adjusted to 1 550 nm, the peak of negative dispersion is  $-426\ 000\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ . A 2-meter-long designed fiber can compensate a 50 000-meter-long standard single-mode fiber (G652). The simulation results show that the dispersion compensation wavelength changes with the effective refractive index of the filled LC, and it might be quantitatively controlled by the temperature adjustment in the wavelength range from 1 533 nm to 1 552 nm.

**Key words:** Fiber optics; Liquid crystal fiber; Temperature tuning; Dispersion compensation; Two-core fiber; Finite element method; The numerical simulation; Liquid crystal-filled; Mode coupling

**OCIS Codes:** 060.2280; 060.5295; 130.2035

## 0 引言

在光纤通信技术高速发展的背景下,数据传输速度亟待提高.随着掺铒光纤放大器(Erbium-doped optical Fiber Amplifier, EDFA)的出现<sup>[1]</sup>,色散已经代替损耗成为限制高速率光纤传输的主要因素<sup>[2]</sup>.同一介质中不同波长光的传播速度不同引起的脉冲展宽产生了色散.

光学相位共轭<sup>[3]</sup>、啁啾技术<sup>[4]</sup>、电子色散补偿等技术<sup>[5]</sup>均可以解决色散问题.但是,光学相位共轭技术在

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos.11474170, 11074131)和天津市自然科学基金(No.16JCYBJC16900)资助

**第一作者:**吴宵宵(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向为现代光纤光学. Email:987719247@qq.com

**导师(通讯作者):**范万德(1966—),男,副教授,博士,主要研究方向为现代光通信与光纤传感. Email:wdfan@nankai.edu.cn

**收稿日期:**2017-12-13; **录用日期:**2018-02-06

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

调整相位时会存在误差,啁啾技术则只适用于短距离传输.色散补偿光纤(Dispersion Compensating Fiber, DCF)<sup>[6]</sup>是通过在光纤内加负色散,以抵消传输光纤的色散积累,可实现在没有电力支持的情况下减少传输数据的速度限制,改善信号质量.光子晶体光纤(Liquid Crystal Fiber, PCF)又名微结构光纤,因具有突出的传输特性<sup>[7-9]</sup>,例如灵活可调的色散特性、可控的限制性损耗特性,适用于色散补偿器.

近年来,国内外对于色散补偿光子晶体光纤已有研究<sup>[10-12]</sup>.传统的色散补偿光子晶体光纤负色散值为 $10^3$ 数量级,且需要很长的色散补偿光子晶体光纤,限制了色散补偿器件的发展. Sircilli 等人设计了准晶体双芯光子晶体光纤<sup>[13]</sup>,在 $1\ 544\ \text{nm}$ 处得到 $-39\ 000\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的负色散值. Matloub 等人通过在双芯光子晶体光纤中引入十二角对称结构<sup>[14]</sup>,在 $1\ 550\ \text{nm}$ 处得到了 $-44\ 000\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的负色散值.已有研究虽然比传统的双芯光子晶体光纤提高了一个数量级,但是所涉及光子晶体光纤的结构较复杂,拉制难度极大.同时,在色散值方面仍存在提升的空间.另一方面,没有关于动态调整光子晶体光纤色散补偿波长的研究,限制了色散补偿光子晶体光纤应用的灵活性.在波分复用系统中,一种方法是利用宽带负色散光纤进行多通道的色散补偿,但补偿光纤的负色散值较低,通常为 $10^2$ 数量级<sup>[15]</sup>,补偿光纤较长,且各通道补偿效果不一致;另一种方法是通过极高负色散光纤进行补偿,可用较短的光纤实现长距离通信系统的补偿.通过温度控制可调节色散补偿波长,实现波分复用系统的色散精确动态补偿功能.

液晶因温控折射率的特性<sup>[16]</sup>吸引了广泛的关注.液晶和光子晶体光纤的结合能够产生许多新的非凡的特性.现已有对液晶填充光子晶体光纤的高敏感热开关特性、滤波特性等的理论和实验研究<sup>[17-18]</sup>,对于光子晶体光纤液体选择填充与控制技术已有成功应用<sup>[6,19-20]</sup>.但是尚未见关于液晶光子晶体光纤色散补偿的研究.本文设计了一种温控色散补偿双芯光子晶体光纤,光纤由 MLC-6241-000 液晶选择填充<sup>[21]</sup>,采用 COMSOL MULTIPHYSICS 软件对设计光纤色散性质进行数值模拟,软件基于全矢量有限元法(Finite Element Method, FEM)<sup>[22]</sup>.在电磁波频域模态下,将求解域划分为相互连接的网格单元,利用有限元法求解单元插值函数,通过引入完美匹配条件得出 PCF 有效折射率等参数.通过温度调节,将色散补偿波长确定在 $1\ 550\ \text{nm}$ 处,负色散峰值为 $-426\ 000\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,比以往研究提高了一个数量级,具有极强的色散补偿能力.本文设计的 PCF 能补偿光纤长距离传输的色散积累,且色散峰值位置在 $1\ 533\ \text{nm}$ 至 $1\ 552\ \text{nm}$ 波长范围内随液晶折射率指数变化.该工作不仅对精确调整色散补偿位置和多通道色散补偿有意义,还有助于实现器件小型化

## 1 光纤设计

液晶选择填充光子晶体光纤结构截面图见图 1. 空气孔包层按照六边形结构排列,基底采用  $\text{SiO}_2$  材料.内包层空气孔直径为  $d_1$ ,内包层第二层空气孔由液晶填充,外包层空气孔直径为  $d_3$ .光纤的中心区域形成内芯,直径为  $d_2$  的空气孔环形成外芯.

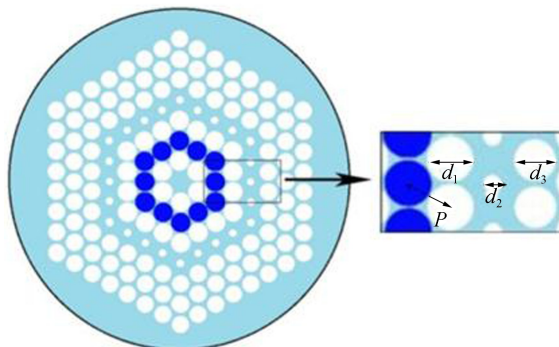


图 1 液晶光子晶体光纤截面  
Fig.1 Cross section of the proposed PCF

## 2 理论基础

光子晶体光纤的总色散  $D(\lambda)$  为波导色散  $D_w(\lambda)$  与材料色散  $D_m(\lambda)$  之和<sup>[23]</sup>,即

$$D(\lambda) = D_w(\lambda) + D_m(\lambda) \quad (1)$$

波导色散  $D_w(\lambda)$  取决于光子晶体光纤的波导结构,材料色散相比于波导色散数值很小,可以忽略,因此光子晶体光纤的色散系数可以表示为<sup>[24]</sup>

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2} \quad (2)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为光子晶体光纤基模的有效折射率,  $\text{Re}[n_{\text{eff}}]$  是基模有效折射率的实部,  $\lambda$  是光的波长,  $c$  是光在真空中的速度.

如图 2 所示,光子晶体光纤的内、外纤芯可以看作两个平行的波导,可以传输两种不同的模式.由于两纤芯的距离较近,容易产生耦合,尤其在匹配波长  $\lambda_p$  附近.在短波区域,光主要在光纤内芯传播.在匹配波长附近,能量开始从内芯耦合到外芯.在此情况下,有效折射率曲线出现了一个突然的变化<sup>[25]</sup>,由于有效折射率变化的二阶导数决定了色散曲线,由此出现了一个大的负色散值.在长波长附近,能量主要集中在外芯区域传播.

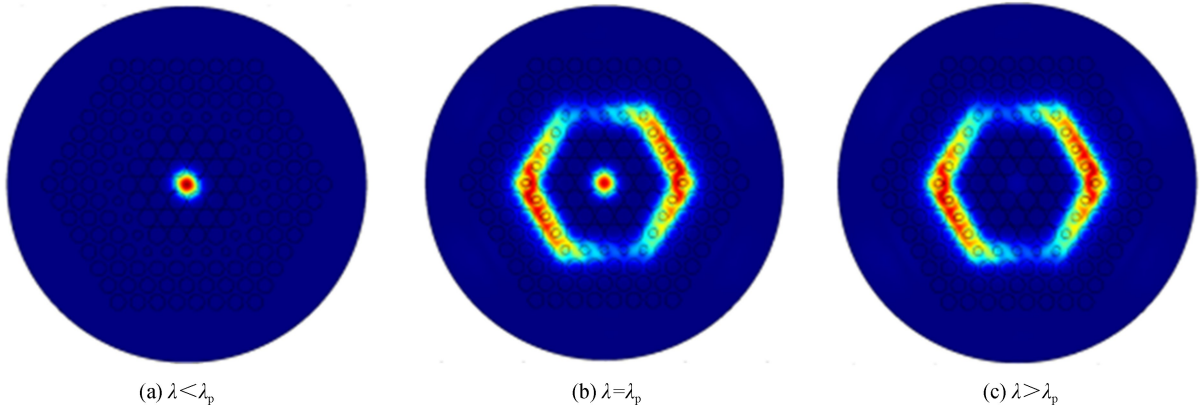


图 2 液晶填充光子晶体光纤的模场分布

Fig.2 Field distributions of the fundamental mode of the UHND-PCF

根据耦合理论<sup>[26]</sup>,双芯准晶体结构光纤的色散系数可以表示为

$$D(\lambda) = -\frac{\pi}{2c\kappa} \left( \frac{dn_1}{d\lambda} - \frac{dn_2}{d\lambda} \right)^2 \times \left[ \frac{\pi^2 (\lambda - \lambda_p)^2}{\kappa^2 \lambda_p^2} \left( \frac{dn_1}{d\lambda} - \frac{dn_2}{d\lambda} \right)^2 + 1 \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (3)$$

式中,  $\kappa$  表示内、外纤芯的耦合常数,  $\lambda_p$  代表匹配波长,  $dn_{1,2}/d\lambda$  表示内、外纤芯中的光波独立传播时,各自模式有效折射率随波长的变化率.当  $\lambda = \lambda_p$  时,色散系数达到峰值可以表示为

$$D_{\text{max}} = -\frac{\pi}{2c\kappa} \left( \frac{dn_1}{d\lambda} - \frac{dn_2}{d\lambda} \right)^2 \quad (4)$$

二氧化硅基底折射率  $n_1$  由 Sellmeier 方程<sup>[27]</sup> 给出,即

$$n_1(\lambda) = \left[ 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i^2 \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \right] \quad (5)$$

式中  $a_i^2, b_i^2$  为材料的折射率系数.

将液晶分子沿着光纤的方向称为  $z$  方向,  $x$  和  $y$  方向的是寻常偏振光方向,则有  $n_x = n_y = n_o$ ,  $n_e = n_z$ ,  $n_o$  和  $n_e$  分别为寻常光和非寻常光的有效折射率.  $n_o, n_e$  和液晶平均折射率  $n$  随温度的变化可以由以下公式导出<sup>[21 28]</sup>

$$n_o(T) = A - BT + \frac{(\Delta n)_0}{3} \left( 1 - \frac{T}{T_c} \right)^\beta \quad (T < T_c) \quad (6)$$

$$n_e(T) = A - BT + \frac{2(\Delta n)_0}{3} \left( 1 - \frac{T}{T_c} \right)^\beta \quad (T < T_c) \quad (7)$$

$$n(T) = A - BT \quad (8)$$

$A$  和  $B$  是温度系数,  $\beta$  是材料系数,  $(\Delta n)_0$  是在绝对零度时的双折射率,  $T_c$  是相变温度<sup>[29]</sup>.

对于液晶 MLC-6241-000,  $A = 1.6623$ ,  $B = 4.00 \times 10^{-4}$ ,  $(\Delta n)_0 = 0.1224$ ,  $\beta = 0.2234$ ,  $T_c = 373.7$  K.

随着温度的变化,液晶的有效折射率的范围为 1.513 至 1.560<sup>[22]</sup>.

光子晶体光纤限制性损耗  $L_c$  可以表示为<sup>[30]</sup>

$$L_c = \frac{20}{\ln 10} k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (9)$$

式中,  $k_0$  是只有空间波长的波数,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  是有效折射率的虚部.

### 3 数值模拟

#### 3.1 参数优化

为研究温度对所提出的液晶光子晶体光纤色散补偿的影响,需要得到在通讯波段具有高负色散值的合适光纤结构参数.本文数值模拟研究了常温(300 K)时  $P$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  对液晶填充光子晶体光纤的色散补偿影响,通过结构优化设计了在 1 550 nm 附近具有高负色散值的液晶填充光子晶体光纤,参数如表 1.

表 1 优化结构参数

$P$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
1.285 $\mu\text{m}$	0.917P	0.463P	0.770P

图 3 展示了优化后光子晶体光纤的色散曲线与有效折射率曲线,有效折射率在 1 550 nm 附近曲线发生明显弯折,产生了  $420\ 000\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的负色散值,限制性损耗为  $2.9 \times 10^{-9}\ \text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$

图 4(a) 展示了色散曲线随着  $P$  的变化 ( $d_1/P = 0.917, d_2/P = 0.463, d_3/P = 0.770$ ),随着  $P$  的增大,负色散对应波长向右移动.因当光在内芯传播时,光子晶体光纤的有效折射率随着  $P$  的增大而增大,当光在外芯传播时,光子晶体光纤的有效折射率随着  $P$  的增大而减少,所以有效折射率的转折点向右移动,即匹配波长向右移动,色散补偿波长相应向右移动.图 4(b) 显示了内包层空气孔对负色散的影响 ( $P = 1.285\ \mu\text{m}, d_2/P = 0.463, d_3/P = 0.770$ ),随着  $d_1/P$  的增大,相位匹配波长向长波长移动.因当能量限制在内芯传播时,有效折射率因内包层空气孔占比的增大而总体下降,且内包层参数的变化对内芯影响比对外芯的大,使得有效折射率交叉点向左移动,即匹配波长向左移动.图 4(c) 展示了外芯空气孔直径对光子晶体光纤色散补偿的影响 ( $P = 1.285\ \mu\text{m}, d_1/P = 0.917, d_3/P = 0.770$ ),外芯空气孔的增大使得能量在外芯传播时有效折射率降低,有效折射率转折点向右移动,即匹配波长向右移动.图 4(d) 展示了匹配波长随外包层空气孔增大向长波长移动的影响 ( $P = 1.285\ \mu\text{m}, d_1/P = 0.917, d_2/P = 0.463$ ),  $d_3$  的增大使外包层的等效折射率减小,外包层对能量在外芯传播时有效折射率影响较大,导致光在外芯传播时有效折射率曲线整体下降,匹配波长右移.

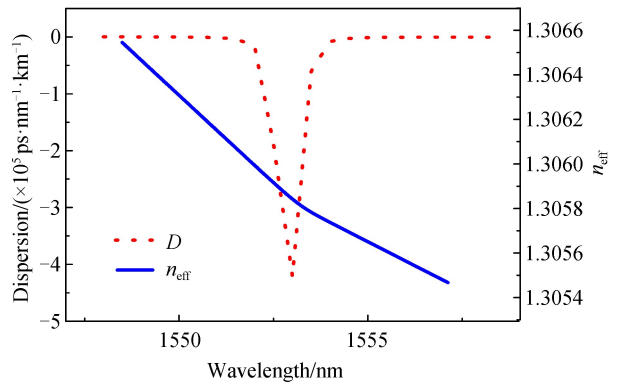
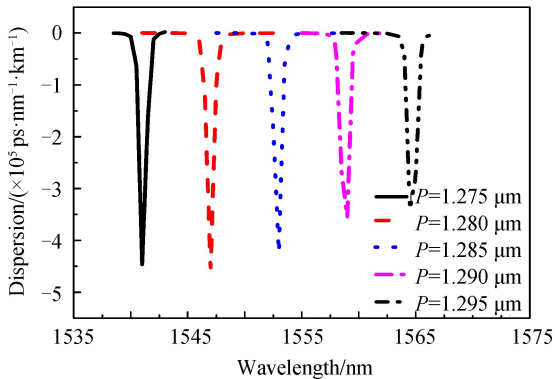
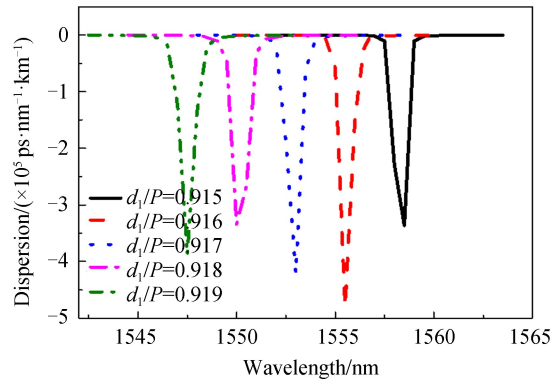


图 3 优化结构液晶光子晶体光纤有效折射率和色散曲线  
Fig.3 Effective refractive index curve and negative dispersion curve of optimized structure PCF



(a) Lattice pitch



(b) Air holes diameter of air-holes in inner cladding

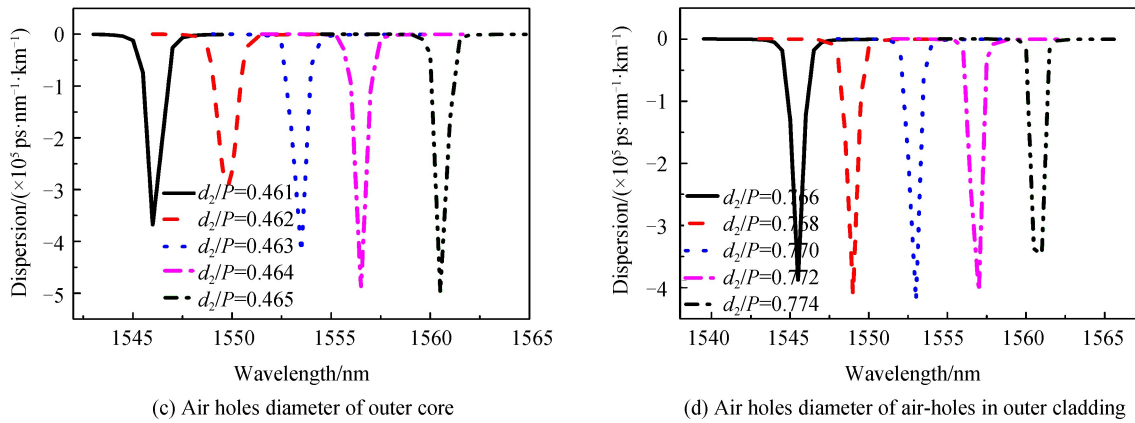


图4 常温下结构参数对光子晶体光纤色散的影响

Fig.4 Influence of different parameters for the proposed PCF on dispersion at 300 K

### 3.2 温控研究

温度对液晶折射率起着重要影响作用.光在液晶中传播时会产生寻常光(o光)与非寻常光(e光),其光学性质主要通过折射率 $n_o$ 和 $n_e$ 表示.随着温度升高, $n_o$ 和 $n_e$ 的表现不同, $n_e$ 的微分 $\partial n_e/\partial T$ 总是负值,而 $\partial n_o/\partial T$ 随着温度上升由负值转为正值.液晶平均折射率可以表示为<sup>[10]</sup>

$$n = \sqrt{\frac{n_e^2 + 2n_o^2}{3}} \quad (10)$$

结合式(6)~(9),可以通过温度精确调节液晶折射率,进而调节色散补偿波长.

采用结构参数为 $P = 1.287 \mu\text{m}$ , $d_1/P = 0.917$ , $d_2/P = 0.463$ , $d_3/P = 0.767$ 的光子晶体光纤在常温下可以在1550 nm附近得到极高的负色散值,文章进一步调节液晶折射率以为精确补偿1550 nm处色散累积.

如图5所示,色散补偿位置随着液晶折射率变化而微小变化.随着液晶折射率的增大,色散补偿波长向长波长移动.由方程8可知,随着温度的增加,液晶折射率降低.在温度从294.8 K变化至296.8 K的过程中,液晶折射率变化 $8 \times 10^{-4}$ ,由方程5可知,在图中匹配波长变化范围内,二氧化硅基底折射率变化相比于液晶折射率可忽略,即匹配波长的移动主要是由液晶折射率变化引起的.液晶折射率的降低导致内包层有效折射率的降低,内包层对能量在内芯传播时光子晶体光纤的有效折射率影响较大,所以光在内芯传播时有效折射率曲线整体下移,使得有效折射率交叉点左移,匹配波长向左移动.从表2可知,当液晶折射率为1.5438,即温度为296.3 K时,光子晶体光纤色散补偿位置精确达到1550.00 nm,此时色散补偿值为 $-426.316 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,标准单模光纤(G652)的色散值为 $17 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ .经简单计算可知2 m的液晶填充光子晶体光纤可以补偿一根50 000 m的G652标准光纤产生的色散累积.

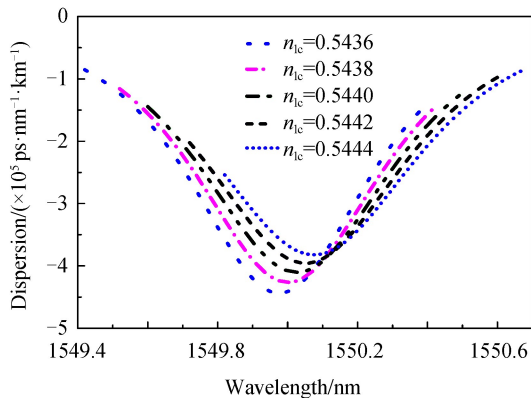
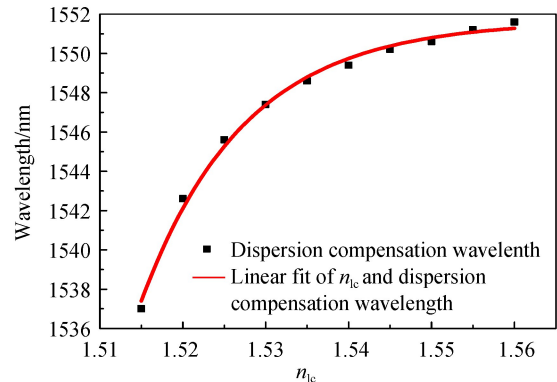

 图5 液晶填充光子晶体光纤色散特性随液晶折射率变化  
 Fig.5 Influence of  $n_{ic}$  for the proposed PCF on dispersion

 图6 色散补偿波长对应波长与液晶折射率的拟合曲线  
 Fig.6 The fitted curve between the dispersion compensation position and  $n_{ic}$

表 2 提出的液晶填充光子晶体光纤性质与液晶折射率的变化  
Table 2 Properties of the proposed PCF at different wavelength in different  $n_{lc}$  cases

$n_{lc}$	Temperature/K	Wavelength/nm	Dispersion/(ps · nm <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> )	Im( $n_{eff}$ )	$L_c$ /(dB · km <sup>-1</sup> )
1.543 6	296.8	1 549.98	-443 639	$1.77 \times 10^{-20}$	$6.2 \times 10^{-10}$
1.543 8	296.3	1 550.00	-426 316	$7.04 \times 10^{-21}$	$2.5 \times 10^{-10}$
1.544 0	295.8	1 550.03	-410 320	$4.42 \times 10^{-22}$	$1.6 \times 10^{-11}$
1.544 2	295.3	1 550.05	-395 679	$2.96 \times 10^{-20}$	$1.0 \times 10^{-9}$
1.544 4	294.8	1 550.08	-382 060	$2.76 \times 10^{-21}$	$9.7 \times 10^{-11}$

本工作对于由光子晶体光纤拉直工艺限制引起的色散补偿位置偏差具有重要意义,通过温度调节控制液晶折射率,可以将负色散峰值位置调整回目标波长处。

表 3 提出的液晶填充光子晶体光纤色散补偿波长与液晶折射率的关系  
Table 3 Relationship between  $n_{lc}$  and dispersion compensation wavelength

$n_{lc}$	1.515	1.520	1.525	1.530	1.535	1.540	1.545	1.550	1.555	1.560
Wavelength/nm	1 537	1 542.6	1 545.6	1 547.4	1 548.6	1 549.4	1 550.2	1 550.6	1 551.2	1 551.6

通过线性拟合,得到拟合方程为

$$W_d = -8.509 \times 10^{53} e^{-\frac{n_{lc}}{0.012}} + 1551.661 \quad (11)$$

式中, $W_d$ 表示色散补偿波长。

结合式(8)与式(11),在波长 1 533 nm 和 1 552 nm 范围内,可通过改变温度调控液晶折射率,从而控制色散补偿波长的数值。

根据式(11),对应的温度值可以被确定

$$W_d = -8.509 \times 10^{53} e^{-\frac{1.662-4 \times 10^{-4} T}{0.012}} + 1551.661 \quad (12)$$

从式(12)可知,文章提出的液晶填充光子晶体光纤可以实现温控选择色散补偿波长,与调节波长范围对应的温度调节范围为 255.7 K 至 373.7 K,可实现以单个色散补偿器动态补偿多个通道。

## 4 结论

本文提出了一种温控液晶填充光子晶体光纤,通过优化设计与温度调节,可将色散补偿波长精确调节到 1 550.00 nm 处,负色散峰值保持在  $-426\ 000\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  左右,比以往研究提高了一个数量级,意味着补偿标准单模光纤 G652 产生的色散只需要比其短 25 000 倍的液晶填充光子晶体光纤,节约材料的同时实现了色散补偿器的小型化.另外,根据拟合方程,色散补偿对应波长可以通过温度灵活调控.精确动态地选择色散补偿位置对实际中出现的色散补偿位置误差、多通道色散补偿技术具有现实意义。

### 参考文献

- [1] KALER R S. Performance investigation of Raman erbium-doped fiber amplifier hybrid optical amplifier in the scenario of high-speed orthogonal-modulated signals[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(3): 036102-036106.
- [2] QIU Wei, MA Ying-chi, LV Pin, *et al.* Slowdown of group velocity of light pulse in erbium-doped optical fiber amplifier under no absorption loss at a room temperature[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(9): 1321-1323.  
邱巍, 马英驰, 吕品, 等. 温室掺铒光纤放大器中实现参量控制无损光速减慢传输[J]. *物理学报*, 2012, **61**(9): 1321-1323.
- [3] YARIV A, FEKETE D, PEPPER D M. Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation[J]. *Optics Letters*, 1979, **4**(2): 52-54.
- [4] LI Sha, WANG Jian-ping, KANG Zhe, *et al.* Optimizational 6-bit all-optical quantization with soliton self-frequency shift and pre-chirp spectral compression techniques based on photonic crystal fiber[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **22**(8): 381-385.
- [5] GAO Zhen-bin, SHI Yong, WANG Bo, *et al.* Design of a transversal equalizer for electronic dispersion compensation in optical communication links[J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, **7**(1): 37-40.
- [6] ZHANG S, FAN M, WANG S, *et al.* Dispersion compensation fiber: US, US9140851B2[P]. 2015-9-22.
- [7] ZHANG Ya-ni. Optimization of highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fiber for supercontinuum generation [J]. *Chinese Physics B*, 2013, **22**(1): 298-302.
- [8] BAO Ya-lei, LI Shu-guang, ZHANG Wan, *et al.* Designing of a polarization beam splitter for the wavelength of 1 310 nm on dual-core photonic crystal fiber with high birefringence and double-zero dispersion[J]. *Chinese Physics B*, 2014, **23**

- (10): 224-228.
- [9] HAMEED M F O, OBAYYA S S A, EL-MIKATI H A. Highly nonlinear birefringent soft glass photonic crystal fiber with liquid crystal core[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(20): 1478-1480.
- [10] QU Yu-wei, ZHANG Chun-lan, GUO Chang-jiang, *et al.* Research and design of all-solid dual-concentric-core photonic crystal fiber for dispersion compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(7): 0706005.  
屈玉玮, 张春兰, 郭长江, 等. 全固双层芯色散补偿光子晶体光纤的研究与设计[J]. *光子学报*, 2017, **46**(7): 0706005.
- [11] LI Yuan, FAN Wan-de, CHEN Jun, *et al.* Dispersion slope compensating photonic quasi-crystal fiber over S+C+L band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **43**(11): 1261-1266.  
李园, 范万德, 陈君, 等. S+C+L波段色散斜率补偿光子准晶体光纤[J]. *光子学报*, 2013, **42**(11): 1261-1266.
- [12] HAN Li-hong, LIU li-min, YU Chong-yuan, *et al.* Dispersion compensation properties of dual-concentric core photonic crystal fibers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(1): 13-16.
- [13] SIRCILLI F, FRANCO M A R, SERRAO V A. Dispersion properties of microstructured optical fiber with 12-fold quasicrystal lattice of holes[C]. New York: IEEE, 2007: 1263-1268.
- [14] MATLOUB S, HOSSEINI S M, ROSTAMI A. Analysis and optimization of a dual-core dispersion compensation fiber based on a 12-fold photonic quasicrystal structure[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(35): 8366-8373.
- [15] WAGHMARE M, REDDY K T V. Design and modal analysis of photonic crystal fiber for dispersion compensation over broadband range[J]. *Journal of Microwaves Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2016, **15**(4): 365-379.
- [16] MATHEWS S, FARRELL G, SEMENOVA Y. Liquid crystal infiltrated photonic crystal fibers for electric field intensity measurements[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(17): 2628-2635.
- [17] WANG Dou-dou, LI Bai-hong, QI Bing, *et al.* Design for liquid crystal photonic crystal fiber and thermal tuning characteristic analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **54**(3): 88-94.  
王豆豆, 李百宏, 齐兵, 等. 液晶光子晶体光纤的设计及热调谐特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, **54**(3): 88-94.
- [18] LIU Zhao-lun, AN Jing, HAN Ying, *et al.* Liquid crystal infiltrated tellurite photonic crystal fiber polarization rotator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(11): 1106003.  
刘兆伦, 安静, 韩颖, 等. 液晶填充碲酸盐光子晶体光纤偏振旋转器[J]. *光子学报*, 2016, **45**(11): 1106003.
- [19] PENG Yang, HOU Jing, ZHANG Yang, *et al.* Temperature sensing using the bandgap-like effect in a selectively liquid-filled photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(3): 263-265.
- [20] GENG You-fu, LI Xue-jin, TAN Xiao-ling, *et al.* Compact and ultrasensitive temperature sensor with a fully liquid-filled photonic crystal fiber mach-zehnder interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **14**(1): 167-170.
- [21] TANG Jie. Study on dual-core photonic crystal fiber temperature sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011.  
汤劼. 双芯光子晶体光纤温度传感器的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011.
- [22] ODEN J. Finite element method[J]. *Dictionary Geotechnical Engineering /wörterbuch Geotechnik*, 2010, **73**(4Suppl1): 3-13.
- [23] ZHANG Ya-ni. Design and optimization of low-loss low-nonlinear high negative-dispersion photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(8): 000261-000267.  
张亚妮. 低损耗低非线性高负色散光子晶体光纤的优化设计[J]. *物理学报*, 2012, **61**(8): 000261-000267.
- [24] DONG Bo, WEI Li, ZHOU Da-peng. Coupling between the small-core-diameter dispersion compensation fiber and single-mode fiber and its applications in fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(9): 1363-1367.
- [25] SUBBARAMAN H, LING Tao, JIANG Yong-qiang, *et al.* Design of a broadband highly dispersive pure silica photonic crystal fiber[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(16): 3263-3268.
- [26] FLEMING J W. Dispersion in GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(24): 4486-4493.
- [27] QIAN Xiang-zhong. Effect of temperature on transmission properties in photonic crystal fibers infiltrated with liquid crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 988-991.  
钱祥忠. 温度对液晶填充光子晶体光纤传输特性的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 988-991.
- [28] ABDULKAREEM L, ABDALAH S F, NAIMEE K A, *et al.* Temperature effect on nonlinear refractive indices of liquid crystals in visible and NIR[J]. *Optics Communications*, 2016, **37**(2): 188-194.
- [29] STERKE C M D, BOTTEN L C, STEEL M J, *et al.* Confinement losses in microstructured optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(21): 1660-1662.
- [30] ARIF M F H, BIDDUT M J H. A new structure of photonic crystal fiber with high sensitivity, high nonlinearity, high birefringence and low confinement loss for liquid analyte sensing applications[J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2017, **12**(C): 8-14.