

# 全固态双层芯结构色散补偿微结构光纤

王 伟<sup>1,2</sup>, 屈玉玮<sup>1,2</sup>, 左玉婷<sup>1,2</sup>, 王瑀琪<sup>1,2</sup>, 孟凡超<sup>1,2</sup>, 张春兰<sup>1,2</sup>, 韩 颖<sup>1,2</sup>, 侯蓝田<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>2</sup>河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 提出了一种全固态双层芯结构色散补偿微结构光纤。该光纤以纯石英材料为基底,通过引入一种掺锗高折射率石英柱和两种掺氟/硼的低折射率石英柱,对端面折射率分布进行调节,以形成双芯结构。在对此光纤模式演化及耦合特性理论分析的基础上,利用多极法对其模式耦合位置与强度随光纤结构参数变化的关系进行了分析,对色散特性与光纤结构参数之间的变化关系进行了研究。通过优化光纤结构参数,设计出两种光纤:光纤 1 在 1550 nm 处色散值达  $-8465 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,与 SMF-28 单模光纤熔接损耗仅为 1.89 dB,可对长度为其 500 倍的 SMF-28 单模光纤的色散值进行补偿;光纤 2 与 SMF-28 单模光纤的熔接损耗仅为 1.41 dB,可对长度为其 15.5 倍的 SMF-28 单模光纤在 C 波段的色散值进行补偿,最大残余色散绝对值仅为 1.38 ps/nm。与石英-空气孔微结构光纤相比,所提出的全固态色散补偿微结构光纤易制备且易与传统通信光纤熔接。

**关键词** 光纤光学; 微结构光纤; 色散补偿; 双层芯

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0806002

## All-Solid Dual-Concentric-Core Microstructure Fiber for Dispersion Compensation

Wang Wei<sup>1,2</sup>, Qu Yuwei<sup>1,2</sup>, Zuo Yuting<sup>1,2</sup>, Wang Junqi<sup>1,2</sup>, Meng Fanchao<sup>1,2</sup>,  
Zhang Chunlan<sup>1,2</sup>, Han Ying<sup>1,2</sup>, Hou Lantian<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** An all-solid dual-concentric-core microstructure fiber for dispersion compensation is proposed. In order to form dual-concentric-core structure, a high refractive index silica cylinder doped with Ge and two low refractive index silica cylinders doped with fluorine or boron are introduced in pure silica to adjust refractive index distribution of cross-section. The evolution and coupling characteristics of fiber mode are theoretical analyzed. The relationships among mode coupling position, intensity and fiber structure parameters are studied by multi-pole method, and the relationship between dispersion characteristic and fiber structure parameter is studied. Two kinds of optical fiber are designed when we optimize fiber structure parameters. Fiber 1 with dispersion value of  $-8465 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  at 1550 nm and its splicing loss with SMF-28 fiber is only 1.89 dB, and a dispersion value of SMF-28 single mode fiber with 500-fold length of fiber 1 can be compensated. The splicing loss is only 1.41 dB at 1550 nm, and a dispersion value of SMF-28 single mode fiber with 15.5-fold length of fiber 2 in the C band can be compensated. The maximum residual dispersion absolute value is only 1.38 ps/nm. Compared with silica-air microstructure fibers, the all-solid dispersion compensating microstructure fiber proposed is easier to fabricate and splice to the traditional communication fiber.

**Key words** fiber optics; microstructure fiber; dispersion compensation; dual-concentric-core

**OCIS codes** 060.4005; 060.2270; 060.2280; 060.2290; 060.4510

收稿日期: 2017-01-19; 收到修改稿日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(61405173,61405172)、河北省自然科学基金(F2014203194)、河北省教育厅科学研究计划(QN20131044)、燕山大学青年自主研究计划(13LGB017)、河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2017108)

作者简介: 王 伟(1982—),男,博士,副教授,主要从事微结构光纤设计及非线性方面的研究。

E-mail: wangwei@ysu.edu.cn

## 1 引 言

在现代高速光纤通信系统中,传输过程中的累积色散成为限制通信速率的主要因素。因此,对高速光纤通信系统进行色散补偿成为当前的研究热点。微结构光纤<sup>[1-2]</sup>包层含有许多周期或无序分布的微细空气孔<sup>[3]</sup>,这种特殊结构使此类光纤具有很高的设计自由度<sup>[4]</sup>,可以灵活地调节光纤的色散特性<sup>[5-8]</sup>。

1999年,Birks等<sup>[9]</sup>利用大空气孔和小纤芯对光的调控作用来增大波导色散的影响,得到了在1550 nm处色散值为 $-2000 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的具有色散补偿特性的微结构光纤。2004年,Gérôme等<sup>[10]</sup>提出双层芯色散补偿微结构光纤,并对利用双层芯的模式耦合现象实现大负色散的机理进行了研究。到目前为止,利用微结构光纤实现色散补偿特性<sup>[11-13]</sup>的设计均利用了具有空气孔或者液体填充空气孔微结构的光纤。Hsu等<sup>[14]</sup>设计的石英-空气孔结构色散补偿微结构光纤在1550 nm处的色散值达到了 $-51626 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ; Fujisawa等<sup>[15]</sup>设计的石英-空气孔微结构光纤可在1535~1565 nm范围内实现宽带色散补偿,其补偿倍数为标准单模光纤的10倍;Varshney等<sup>[16]</sup>设计的石英-空气孔微结构光纤可在1520~1570 nm范围内进行色散补偿,实现了19 dB的拉曼增益。2012年,Hsu等<sup>[17]</sup>在外芯和包层空气孔中分别填充不同折射率的液体,得到了在1550 nm处色散值为 $-40400 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的色散补偿微结构光纤;2014年,Maji等<sup>[18]</sup>设计的外芯空气孔填充液体的色散补偿微结构光纤在1550 nm处的色散值达到了 $-52100 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。但是,在制备过程中,石英-空气孔微结构光纤的空气孔容易产生形变,使实际制备的光纤与设计结构不符,从而影响最终的色散补偿效果。另外,空气孔填充液体属于光纤后处理技术,利用该方法实现长距离填充难度极大。2004年,Mangan等<sup>[19]</sup>制备出基于石英-空气孔结构的色散补偿微结构光纤,但从光纤端面图可以看出,该光纤空气孔产生明显的形变。空气孔微结构光纤的制备难度大、与传统通信光纤熔接困难等缺点极大限制了其在高速光通信领域中的应用。

本文对全固态双层芯色散补偿微结构光纤进行了研究。在纯石英基底材料中引入掺锗高折射率和掺氟/硼低折射率石英柱,形成双芯结构光纤,该双芯结构光纤可用于调节微结构光纤的端面折射率分布。在对此类光纤模式耦合特性研究的基础上,通过合理优化光纤结构参数设计出易制备、易与传统通信光纤熔接的全固态色散补偿微结构光纤。该研究为未来高速率、长距离光纤通信乃至全光网络的实现提供了理论基础和技术支持。

## 2 基本理论

光纤的总色散 $D(\lambda)$ 由材料色散 $D_m(\lambda)$ 和波导色散 $D_w(\lambda)$ 两部分组成,即

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

波导色散可表示为

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

式中 $c$ 为真空中的光速, $\lambda$ 为波长, $n_{\text{eff,Re}}$ 为基模模式的有效折射率的实部。

限制损耗可表示为

$$\alpha = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff,Im}} \times 10^9, \quad (3)$$

式中 $n_{\text{eff,Im}}$ 为基模模式的有效折射率的虚部。

有效模场面积可表示为

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

式中 $\mathbf{E}$ 为电场矢量, $S$ 为光纤模场面积。由 $A_{\text{eff}} = \pi\omega^2$ 可以计算出微结构光纤的有效模场半径 $\omega$ ,微结构光纤与标准单模光纤间的熔接损耗可表示为

$$L_{\text{splice}} = -20 \ln \left( \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right), \quad (5)$$

式中 $\omega_1$ 为标准单模光纤的模场半径, $\omega_2$ 为微结构光纤的有效模场半径。

### 3 结构设计和特性分析

所设计的全固态双层芯微结构光纤端面结构示意图如图 1 所示。整个光纤为全固态结构,基底材料为纯石英(折射率  $n_0=1.45$ ),端面含有 3 种不同尺寸与折射率的介质柱。内芯介质柱掺铈,其折射率  $n_1>n_0$ ,半径为  $r_1$ ;外层芯(第 4 层)介质柱掺氟/硼,其折射率  $n_2<n_0$ ,半径为  $r_2$ ;其余掺氟/硼介质柱与基底材料构成微结构包层,其折射率  $n_3<n_2$ ,半径为  $r_3$ ;柱间距均为  $\Lambda$ 。由光纤端面等效折射率分布可以看出,内芯等效折射率  $n_{\text{core0}}$  的范围为  $n_0<n_{\text{core0}}<n_1$ ,外层芯等效折射率  $n_{\text{core1}}$  的范围为  $n_2<n_{\text{core1}}<n_0$ ,包层等效折射率  $n_{\text{clad}}$  的范围为  $n_3<n_{\text{clad}}<n_2$ 。

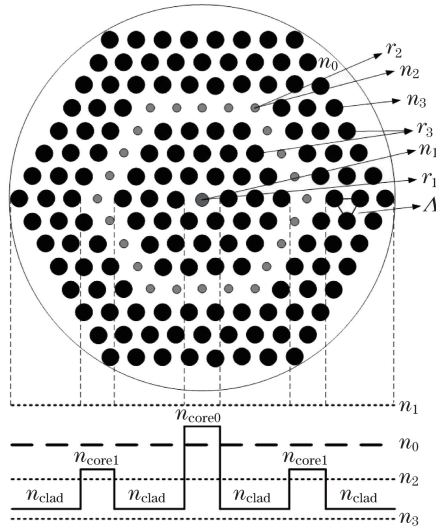


图 1 全固态双层芯微结构光纤端面结构及其等效折射率分布

Fig. 1 Cross-section structure and equivalent refractive index distribution of all-solid dual-concentric-core microstructure fiber

考虑到现有材料及光纤制备工艺水平,光纤初始参数设为  $n_1=1.480, n_2=1.445, n_3=1.430, r_1=0.650 \mu\text{m}, r_2=0.255 \mu\text{m}, r_3=1.200 \mu\text{m}, \Lambda=2.9 \mu\text{m}$ 。图 2 所示为基模和二阶模的有效折射率和色散随波长的变化以及不同波长下两个模式的模场分布。可以看出,当波长小于匹配波长  $\lambda_p$  时,内芯模式的有效折射率大于外层芯,基模和二阶模分别在内芯与外层芯中传播;当波长在匹配波长  $\lambda_p$  附近并向长波移动时,基模能量逐渐向外层芯扩散并最终转换到外层芯中传播;二阶模的模场分布随波长的变化趋势则与基模相反,随着波长像长波移动,二阶模的能量由外层芯耦合至内芯。因此,双层芯的特殊结构使得基模在匹配波长  $\lambda_p$  附近发生内芯至外层芯的耦合,导致有效折射率随波长变化的斜率在  $\lambda_p$  处产生折变,从而形成大负色散值。

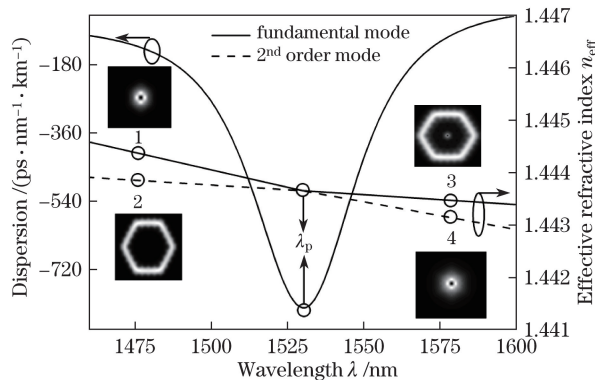


图 2 模式有效折射率和色散随波长的变化(插图为不同波长下两个模式的模场分布)

Fig. 2 Variations in effective refractive index and dispersion of mode with wavelength (illustration is mode field distributions of two modes under different wavelengths)

为了在 1550 nm 处得到大的负色散,分析了全固态双层芯微结构光纤结构参数对  $\lambda_p$  位置以及色散特性的影响。图 3(a)、(b)为当其他参数不变时,内芯掺锗介质柱的有效折射率  $n_1$  的改变对光纤基模模式耦合和色散的影响。由图 3(a)可以看出,当  $n_1$  增大时,光纤内芯平均折射率随之增大,而外层芯与包层平均折射率不变,导致内芯中模式有效折射率增大,外层芯中模式有效折射率不变。因此,在基模从内芯至外层芯的耦合过程中, $\lambda_p$  向长波方向移动。当  $\lambda_p$  变大后,内、外层芯之间的包层尺寸相对于  $\lambda_p$  变小,造成基模从内芯至外层芯的耦合过程变长,耦合强度降低。图 3(b)中光纤色散曲线谷值出现的位置随着  $n_1$  的增大发生红移,且幅度变小。当增大  $r_1$  时,相当于改变光纤内芯平均折射率而保持其他部分的折射率不变,其效果等同于增大  $n_1$ 。图 3(c)中光纤色散随  $r_1$  的变化规律与图 3(b)中光纤色散随  $n_1$  的变化规律一致。

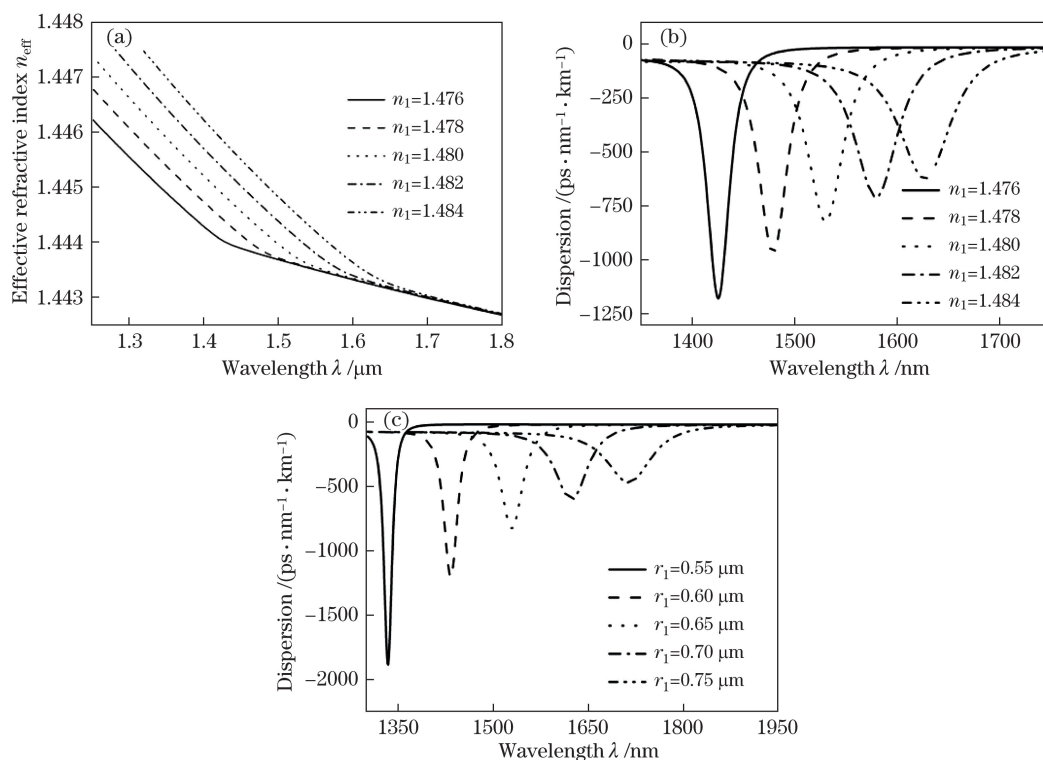


图 3 (a)基模模式有效折射率随  $n_1$  的变化;(b)色散随  $n_1$  的变化;(c)色散随  $r_1$  的变化

Fig. 3 (a) Variation in effective refractive index of fundamental mode with  $n_1$ ; (b) variation in dispersion with  $n_1$ ; (c) variation in dispersion with  $r_1$

图 4 为光纤基模模式有效折射率和色散随外层芯中介质柱参数的变化规律。随着  $n_2$  的减小,光纤外层芯的平均折射率也相应地减小,而其他部分折射率不变。从图 4(a)中可以看出,当内芯模式的有效折射率不变而外层芯模式的有效折射率变小时,若  $\lambda_p$  向长波方向移动,则基模从内芯至外层芯的耦合过程变长,增大  $r_2$  与减小  $n_2$  的效果相同。由图 4(b)、(c)可以看出,当  $n_2$  减小或  $r_2$  增大时,色散曲线的波谷位置发生红移、谷值幅度变小,与图 3 的变化规律一致。但是,外层芯结构参数对  $\lambda_p$  的位置及耦合强度的影响远小于内芯。

包层中掺氟/硼介质柱的折射率  $n_3$  及其半径  $r_3$  的变化对光纤特性的影响如图 5 所示。增大  $n_3$  或减小  $r_3$ ,相当于在内、外层芯折射率不变的前提下增大包层等效折射率,无论基模位于内芯还是外层芯中,其模式有效折射率均变大。由图 5(a)可以看出,基模模式有效折射率随着  $n_3$  的增大而增大。但是,波长大于  $\lambda_p$  时基模模式有效折射率增大的幅度大于波长小于  $\lambda_p$  时的增大幅度,最终效果为  $\lambda_p$  向长波方向移动,耦合强度降低。由图 5(b)、(c)可以看出,光纤色散曲线波谷位置随着  $n_3$  的增大或  $r_3$  的减小不断向长波方向移动,且幅度变小。

光纤特性随柱间距  $\Delta$  的变化趋势如图 6 所示。由图 6 可以看出,随着  $\Delta$  的增大,基模处于内芯( $\lambda < \lambda_p$ )时模式有效折射率的增大幅度小于基模处于外芯( $\lambda > \lambda_p$ )时的增大幅度。因此,光纤色散曲线波谷位置随  $\Delta$  的增大向长波方向移动,且幅度变小。

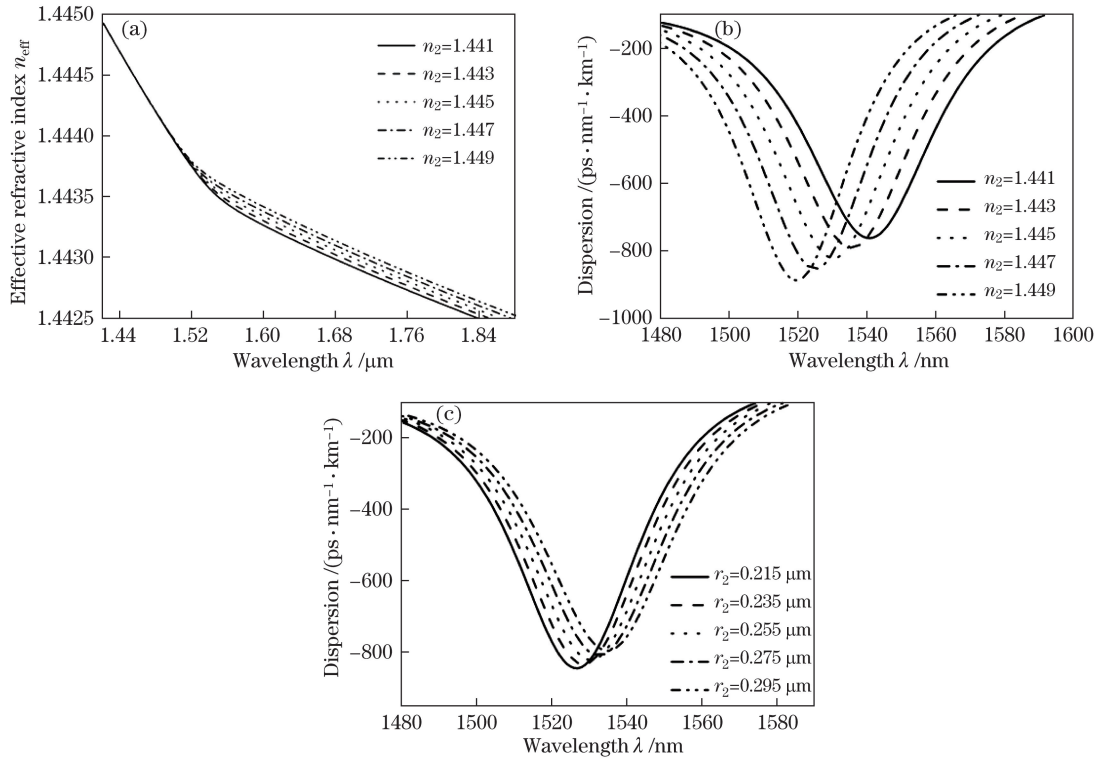


图 4 (a) 基模模式有效折射率随  $n_2$  的变化; (b) 色散随  $n_2$  的变化; (c) 色散随  $r_2$  的变化

Fig. 4 (a) Variation in effective refractive index of fundamental mode with  $n_2$ ; (b) variation in dispersion with  $n_2$ ; (c) variation in dispersion with  $r_2$

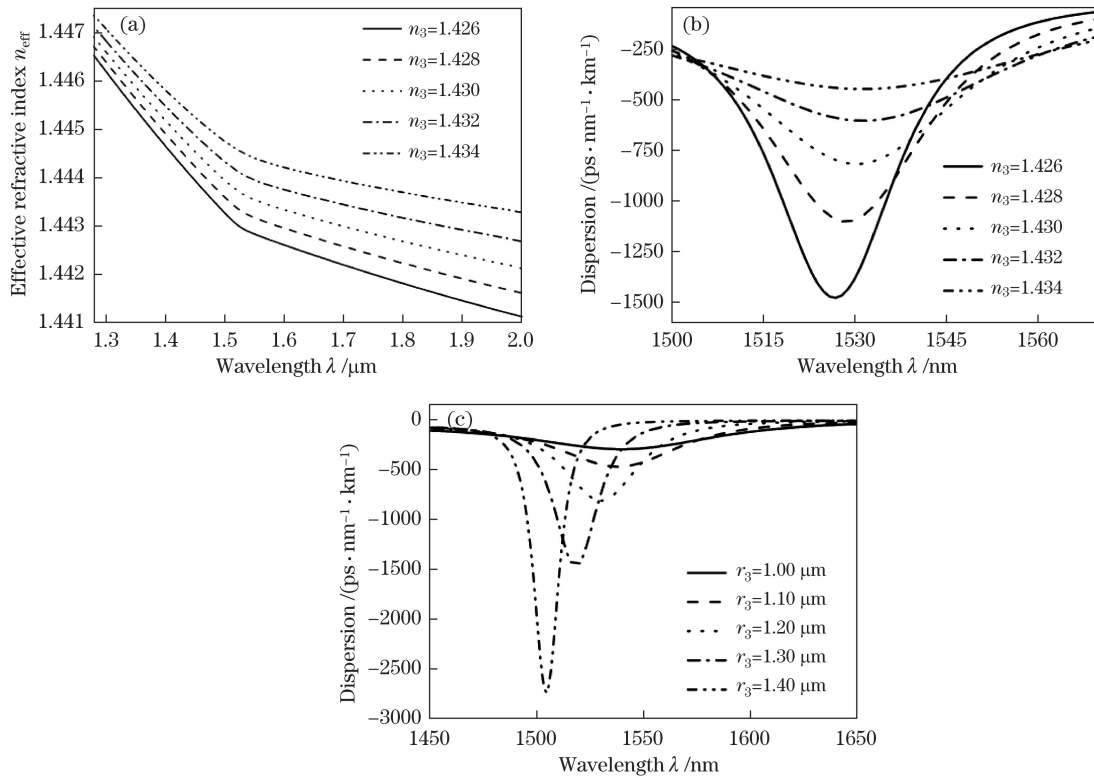


图 5 (a) 基模模式有效折射率随  $n_3$  的变化; (b) 色散随  $n_3$  的变化; (c) 色散随  $r_3$  的变化

Fig. 5 (a) Variation in effective refractive index of fundamental mode with  $n_3$ ; (b) variation in dispersion with  $n_3$ ; (c) variation in dispersion with  $r_3$



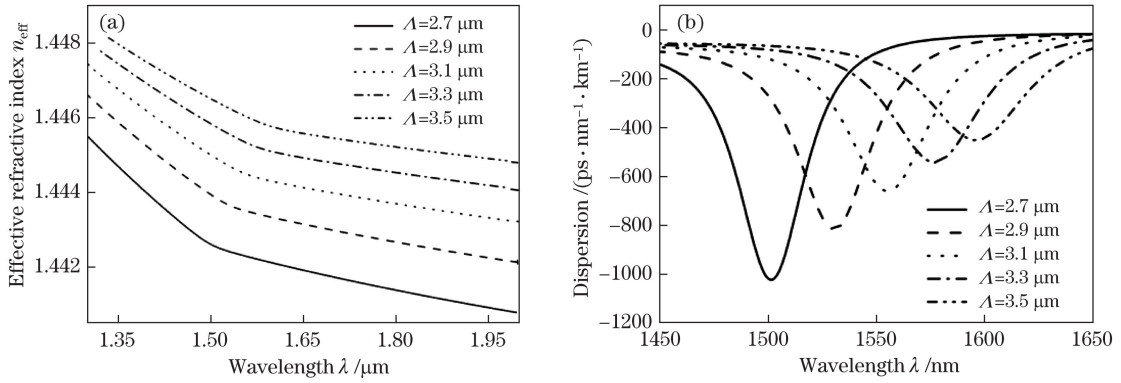


图 6 (a)基模模式有效折射率随  $\Lambda$  的变化;(b)色散随  $\Lambda$  的变化

Fig. 6 (a) Variation in effective refractive index of fundamental mode with  $\Lambda$ ; (b) variation in dispersion with  $\Lambda$

由图 3~6 可以看出,负色散斜率线性区域越宽,色散曲线谷值越小,二者相互制约。由此可知,单点色散补偿的倍数可以很大,但要实现宽带色散补偿,需在兼顾宽带的同时牺牲补偿倍数。根据全固态色散补偿光纤的各参数变化对匹配波长漂移及色散值大小的影响规律,对光纤结构进行优化设计,并提出两种光纤。光纤 1 用于 1550 nm 的色散补偿,其参数为: $n_1=1.480, n_2=1.445, n_3=1.430, r_1=0.650 \mu\text{m}, r_2=0.225 \mu\text{m}, r_3=1.700 \mu\text{m}, \Lambda=3.5 \mu\text{m}$ 。该光纤色散随波长的变化关系如图 7(a)所示,其在 1550 nm 处的色散值为  $-8465 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,利用 1 km 光纤即可实现对  $5\times 10^5 \text{ m}$  的 SMF-28 单模光纤色散的补偿,在 1550 nm 处的模式面积  $A_{\text{eff}}=12.8 \mu\text{m}^2$ ,与标准单模光纤的熔接损耗  $L_{\text{splice}}\approx 1.89 \text{ dB}$ 。光纤 2 用于 C 波段的宽带色散补偿,其参数为: $n_1=1.480, n_2=1.447, n_3=1.430, r_1=0.800 \mu\text{m}, r_2=0.295 \mu\text{m}, r_3=0.860 \mu\text{m}, \Lambda=1.9 \mu\text{m}$ 。该光纤在 C 波段的色散随波长的变化关系和补偿后的残余色散如图 7(b)所示,利用 1 km 光纤即可实现对 15.5 km 的 SMF-28 单模光纤在 C 波段色散的补偿,最大残余色散绝对值仅为 1.38 ps/nm,其在 1550 nm 处的模式面积  $A_{\text{eff}}=15.6 \mu\text{m}^2$ ,与标准单模光纤的熔接损耗  $L_{\text{splice}}\approx 1.41 \text{ dB}$ 。

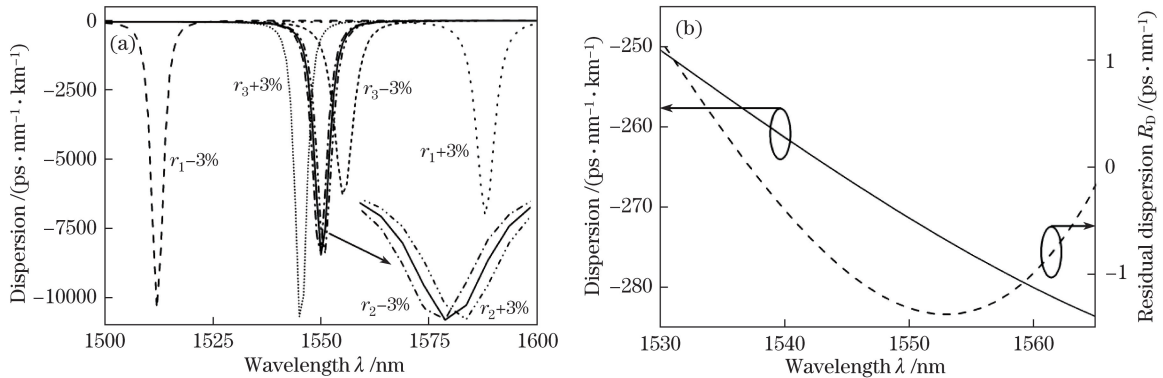


图 7 (a)光纤 1 介质柱的半径产生  $\pm 3\%$  形变时色散随波长的变化;

(b)光纤 2 在 C 波段色散随波长的变化和补偿后的残余色散

Fig. 7 (a) Variation in dispersion with wavelength when medium column radius of fiber 1 produces  $\pm 3\%$  distortion;

(b) variation in dispersion of fiber 2 in C band with wavelength and residual dispersion after compensation

考虑到现有工艺水平对掺杂材料折射率的控制比较精准,制备光纤时较易控制柱间距  $\Lambda$  随光纤外径等比例缩小。但是,采用堆积-拉制方法制备微结构光纤时,预制棒间隙孔熔死或者掺杂氧化物后介质柱熔点等物理性质的细微变化,导致拉制时拉伸不足或拉伸过度等都可能使介质柱产生形变。在光纤拉制过程中,熔融态介质柱在表面张力的作用下,其形状不易发生改变,因此介质柱半径的改变是引起所提光纤形变的主要因素。以光纤 1 为例,对介质柱半径产生  $\pm 3\%$  形变的情况进行分析,结果如图 7(a)所示。可以看出,当外层芯和包层介质柱半径  $r_2, r_3$  产生  $\pm 3\%$  形变时,匹配波长漂移与色散值变化均较小,在 1550 nm 处仍表现为较大负色散;当内芯介质柱半径  $r_1$  产生  $\pm 3\%$  形变时,补偿波长位置有较大变化,无法对 SMF-28 单模光纤在 1550 nm 处的色散进行补偿。因此,内芯的形变控制是制备此类光纤的关键。

## 4 结 论

提出了两种用于补偿通信光纤色散的全固态双层芯微结构光纤。通过理论分析光纤的基模在内、外层芯中模式的耦合特性,得到了匹配波长漂移与色散值大小随光纤结构参数变化的规律。以现有工艺水平为基础,通过优化参数,得到两种微结构光纤的最佳参数分别为: $n_1=1.480, n_2=1.445, n_3=1.430, r_1=0.650 \mu\text{m}, r_2=0.255 \mu\text{m}, r_3=1.700 \mu\text{m}, \Lambda=3.5 \mu\text{m}$ 和 $n_1=1.480, n_2=1.447, n_3=1.430, r_1=0.800 \mu\text{m}, r_2=0.295 \mu\text{m}, r_3=0.860 \mu\text{m}, \Lambda=1.9 \mu\text{m}$ 。光纤1在1550 nm处的色散值可达 $-8465 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,模式面积为 $12.8 \mu\text{m}^2$ ,限制损耗低于 $1\times 10^{-3} \text{ dB}/\text{km}$ ,与SMF-28单模光纤的熔接损耗为1.89 dB,可补偿长度为光纤1 500倍的SMF-28单模光纤的色散。光纤2可实现对长度为其15.5倍的SMF-28单模光纤在C波段色散的补偿,最大残余色散绝对值仅为 $1.38 \text{ ps}/\text{nm}$ ,其在1550 nm处的模式面积为 $15.6 \mu\text{m}^2$ ,限制损耗低于 $1\times 10^{-3} \text{ dB}/\text{km}$ ,与SMF-28单模光纤的熔接损耗为1.41 dB。与石英-空气孔结构色散补偿微结构光纤相比,所提出的全固态色散补偿微结构光纤具有易制备、易与传统通信光纤熔接等优点,在高速率光纤通信系统中具有重要应用。

## 参 考 文 献

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [2] Birks T A, Knight J C, Russell P S. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 961-963.
- [3] Shi Weihua, Wang Mengyan. Generation and control of supercontinuum in photonic crystal fiber with three-zero dispersion wavelengths[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 42(8): 0805009.  
施伟华, 王梦艳. 三零色散光子晶体光纤中超连续谱的产生与控制[J]. *光学学报*, 2015, 42(8): 0805009.
- [4] Zhang Jing, Jiang Haiming, Xie Kang, *et al.* Low-loss coupling between photonic crystal fibers and standard single-mode fibers based on air holes filling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406006.  
张 静, 姜海明, 谢 康, 等. 基于空气孔填充的光子晶体光纤与普通单模光纤低损耗耦合研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406006.
- [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. 双层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] Wang Honghua, Xue Wenrui, Zhang Wenmei. Negative dispersion properties of photonic crystal fiber with dual core and composite lattice[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 27-30.  
王红华, 薛文瑞, 张文梅. 双芯复合格点光子晶体光纤的负色散特性[J]. *光学学报*, 2008, 28(1): 27-30.
- [7] Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on the extreme characteristics of dispersion of photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0806001.  
关寿华, 于清旭, 郑建洲. 光子晶体光纤色散极值特性的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0806001.
- [8] Zhao Xingtao, Liu Xiaoxu, Wang Shutao, *et al.* Phase-matching characteristic of photonic crystal fiber with three zero-dispersion wavelengths[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0906007.  
赵兴涛, 刘晓旭, 王书涛, 等. 三个零色散波长光子晶体光纤及相位匹配特性[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0906007.
- [9] Birks T A, Mogilevtsev D, Knight J C, *et al.* Dispersion compensation using single-material fibers[J]. *Photonic Technology Letters*, 1999, 11(6): 674-676.
- [10] G r me F, Auguste J L, Blondy J M. Design of dispersion-compensating fibers based on a dual-concentric-core photonic crystal fibre[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2725-2727.
- [11] Liu Y, Wang J Y, Li Y Q, *et al.* A novel hybrid photonic crystal dispersion compensating fiber with multiple windows[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2076-2079.
- [12] 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*, 2015, 53(35): 8366-8373.
- [13] Han L H, Liu L M, Yu Z Y, *et al.* Dispersion compensation properties of dual-concentric core photonic crystal fibers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(1): 010603.
- [14] Hsu J M, Zheng W H, Lee C L, *et al.* Theoretical investigation of a dispersion compensating photonic crystal fibre with ultra-high dispersion coefficient and extremely low confinement loss[J]. *Photonics and Nanostructures-*

Fundamentals and Applications, 2015, 16: 1-8.

- [15] Fujisawa T, Saitoh K, Wada K, *et al.* Chromatic dispersion profile optimization of dual-concentric-core photonic crystal fibers for broadband dispersion compensation[J]. Optics Express, 2006, 14(2): 893-900.
- [16] Varshney S K, Fujisawa T, Saitoh K, *et al.* Design and analysis of a broadband dispersion compensating photonic crystal fibre Raman amplifier operating in S-band[J]. Optics Express, 2006, 14(8): 3528-3540.
- [17] Hsu J M, Ye G S. Dispersion ultrastrong compensating fiber based on a liquid-filled hybrid structure of dual-concentric core and depressed-clad photonic crystal fiber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(8): 2021-2028.
- [18] Maji P S, Chaudhuri P R. Design of ultra large negative dispersion PCF with selectively tunable liquid infiltration for dispersion compensation[J]. Optics Communications, 2014, 325(5): 134-143.
- [19] Mangan B J, Couny F, Farr L, *et al.* Slope-matched dispersion-compensating photonic crystal fibre[C]. Conference on Lasers & Electro-Optics, 2004: CPDD3.