

色散平坦光子晶体光纤的研究进展

戴能利 李洋 彭景刚 李进延*

(华中科技大学光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

摘要 光纤的色散管理与控制是设计光电子器件中必须考虑的重要因素。光子晶体光纤(PCF)作为一种新颖的光传输介质,由于其自由的结构设计,使它在色散控制与管理方面优于常规的通信光纤,因此在很多方面有巨大的应用前景。介绍了改变PCF的几何结构对其色散的控制以及实现平坦色散的实例,着重回顾了近年来PCF在色散平坦方面的结构设计,总结了色散平坦PCF在实际中的一些应用情况。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;色散特性;平坦色散

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.010602

Development of Dispersion-Flattened Photonic Crystal Fibers

Dai Nengli Li Yang Peng Jinggang Li Jinyan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The management and engineering of optical fiber is a necessary factor to be considered in the design of photoelectronic device. As a new kind of light transmission media, photonic crystal fiber (PCF) has an enormous application potential in many fields on account of its large configuration design freedom which makes its performance in the management and engineering of dispersion much more better than that of the conventional communication fibers. Firstly the management of dispersion by changing the geometric structure of PCF and the achievement of flattened dispersion is discussed. After that, the configuration designs of these years to realize flattened dispersion in PCF are emphatically presented, and the applications of its flattened dispersion is also summarized.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; dispersion feature; flattened dispersion

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.2310; 060.5295

1 引言

色散是光纤的固有特性之一。光通信系统和一些光纤器件中,光纤的色散必须得到合理的控制。不论是在一些线性光学还是非线性光学领域,总是希望光纤色散在应用波长窗口内大小合理且平坦。如在波分复用(WDM)系统中,只有色散平坦且适度低的光纤才能有效地减小四波混频(FWM)效应;在非线性系统尤其是超短孤子脉冲的传输中近零超平坦色散也起着关键作用,在超短光孤子色散管理系统中,不可忽略的三阶色散可导致强不稳定性,破坏孤子脉冲的传输特性;而在小的正色散和可忽略的三阶色散的情况下,可以产生平坦的宽带的超连续谱(SC)。总之,色散平坦光纤除可在波分复用通信系统以及光孤子的产生和传输中作为理想的传输介质外,在优化一些非线性器件的性能例如超连续光源产生平坦超连续光谱方面都有着重要的应用。

独特的包层结构使得光子晶体光纤(PCF)^[1]在控制光的行为方面比传统光纤更具灵活性,而这一点在色散控制方面表现得尤为突出。与传统光纤相比,PCF更易实现宽带的色散平坦化,而且可以通过改变光纤的结构参量使得中心波长可移,从而实现带宽的灵活调节。平坦色散值也可以根据需要提供正色散、负色散或零色散。

本文首先结合相关文献的模拟结果,归纳和介绍了几种PCF结构参数的改变对其色散特性的影响。然

收稿日期: 2010-07-19; 收到修改稿日期: 2010-10-14

作者简介: 戴能利(1970—),男,博士,副教授,主要从事光子晶体光纤技术、超宽带放大与高功率激光光纤、新型光纤器件等方面的研究。E-mail: dainl@mail.hust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ljy@mail.hust.edu.cn

后在此基础上,对通过合理设计孔间距和孔直径等结构参数实现平坦色散的 PCF 典型结构及其色散性能进行了总结。最后简单介绍了实际制备出来的色散平坦 PCF 的应用实例。

2 影响 PCF 色散特性的结构因素

PCF 的总色散可近似地表示为光纤材料色散与波导色散之和^[2]。由于 PCF 一般由单一基质材料如石英材料制备而成,所以在基质材料一定的情况下,材料色散是保持不变的。而波导色散与光纤的几何结构有关,会随着结构参数的改变而变化。对于传统阶跃光纤即与光纤的纤芯半径和纤芯与包层的折射率差等结构参数有关。PCF 的总色散表示为: $D(\lambda) \approx D_w(\lambda) + D_m(\lambda)$, 其中波导色散 $D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}$, 这里 n_{eff} 为不考虑材料色散的情况下导模的模式有效折射率,材料色散 $D_m(\lambda)$ 由 Sellmeier 公式计算。

与传统光纤相比,PCF 由于其具有空气孔排布的独特包层结构,使其在结构参数调节上具有更大的参数空间,因而在相应的调节光纤的波导色散方面具有更大的灵活性。在对色散的设计上,通过调节结构参数,如果 PCF 的波导色散与材料色散在很宽的波段范围内相互抵消^[2],就可以实现宽带的色散平坦的设计要求。

2000 年, Ferrando 等^[2,3]就对普通 PCF 的空气孔间距 Λ 和占空比 d/Λ 对波导色散的影响进行了研究。通过调节占空比 d/Λ ($d = 2a$, a 指空气孔半径) 在 $0.17 \sim 0.39$ 的范围下变化,分别选取两组不同的结构参数进行模拟计算得到两组波导色散曲线,如图 1 所示。从图 1 可以发现,空气孔间距 Λ 主要对波导色散曲线的走向起决定作用,对曲线的位置变化也有一定的影响。而空气填充率 $f = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{a}{\Lambda}\right)^2$ 主要影响的是波导色散的大小和曲线位置的变化。

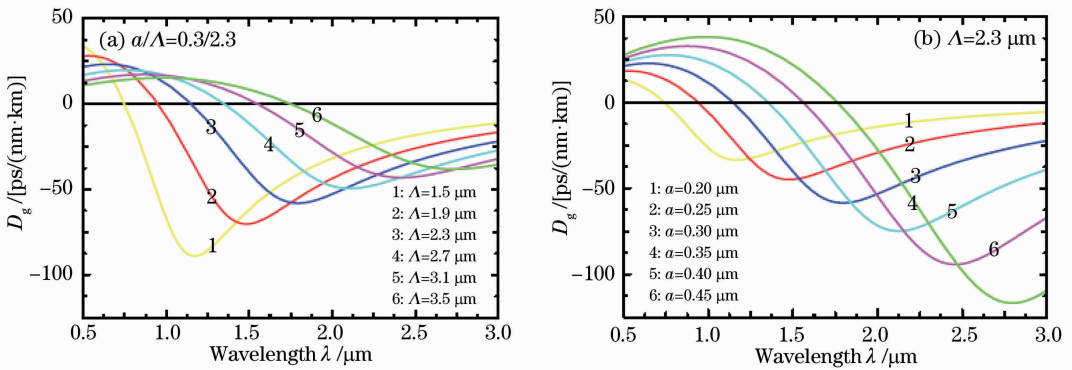


图 1 空气孔间距 Λ (a)与空气填充率 f (b)对波导色散曲线的影响

Fig. 1 Influence of air-hole pitch Λ (a), and air-filling fraction f (b) on waveguide dispersion curve

因为 PCF 独特的包层结构,因此通过逐层调节空气孔的大小或者有选择地改变某层空气孔的大小,对波导色散调节的自由度更大,调节更精细。在占空比较大的情况下,导模被极强地限制在纤芯区域,围绕纤芯的第一圈空气孔对导模光的色散特性有很大的影响。一般减小第一圈空气孔的大小,总色散曲线是趋于平坦的^[4],如图 2(a)所示。分别改变第二、三圈空气孔的大小对色散特性的影响不如第一圈空气孔。其中分别单独减小第二、三圈空气孔大小,色散都是减小的。而且相较于短波长,长波长范围减小得更大。随着空气孔的减小,对色散斜率的影响也不大,但是当空气孔减小到一定程度时,某个波长外的长波长范围的色散斜率变化很大。产生这种巨大变化的原因应该是一部分模式进入到减小的这圈空气孔中传输。在占空比不大的情况下,一般将最外面一圈或几圈空气孔的直径选取的很大,以降低限制损耗。

Saitoh 等^[5]对空气孔的直径沿半径方向逐渐增大对色散特性的影响进行了研究。发现通过单独调节某圈空气孔的大小可以对色散曲线的平坦度进行控制。图 2 (b)为逐层改变空气孔的直径,计算得出的一组色散曲线图^[5]。其中 $a \sim d$ 色散曲线对应的 PCF 各层孔直径分别为 $a: d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = 0.5 \mu\text{m}$, $b: d_1 = 0.5 \mu\text{m}, d_2 = d_3 = d_4 = 0.6 \mu\text{m}$, $c: d_1 = 0.5 \mu\text{m}, d_2 = 0.6 \mu\text{m}, d_3 = d_4 = 0.7 \mu\text{m}$, $d: d_1 = 0.5 \mu\text{m}, d_2 = 0.6 \mu\text{m}, d_3 = 0.7 \mu\text{m}, d_4 = 1.8 \mu\text{m}$ 。这组色散曲线表明通过优化每层空气孔的孔径大小可以对这种 PCF 的色散进行控制。

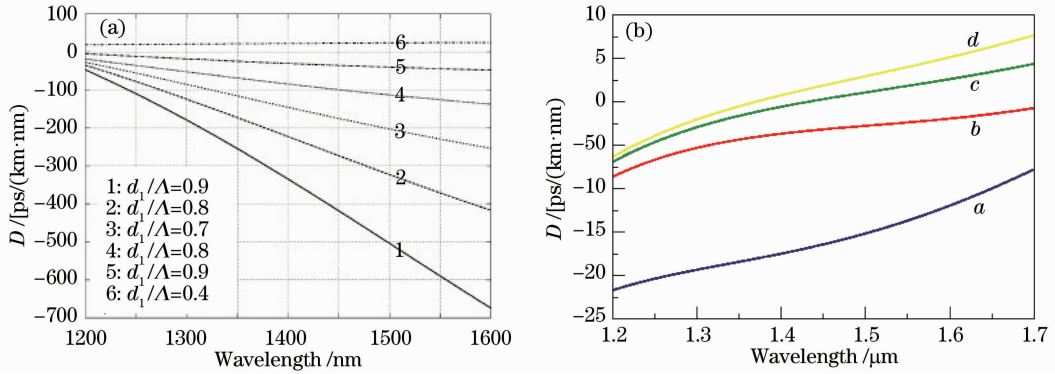


图2 改变包层某些层空气孔的大小对色散曲线的影响。(a) 第一圈空气孔直径 d_1 变化对应的色散曲线,其中 $d/\Lambda=0.9$ 和 $\Lambda=0.9 \mu\text{m}$, (b) 具有 4 层空气孔结构的 PCFs 逐层改变空气孔的大小对应的一组色散曲线,其中孔间距 $\Lambda=2 \mu\text{m}$

Fig.2 Influence of changing the size of some layer's air-hole on dispersion curve. (a) dispersion curve of changing first layer's air-hole diameter d_1 , in which $d/\Lambda=0.9$ and $\Lambda=0.9 \mu\text{m}$, (b) a set of dispersion curves of PCFs with four-layer air-hole cladding, the size of air-hole changed gradually layer by layer, in which the air-hole pitch $\Lambda=2 \mu\text{m}$

PCF 纤芯结构的改变,同样会对色散特性产生影响。对纤芯的大小或者形状进行设计,可以增加对色散特性调节的灵活性^[6],使色散性能如特定波长下的色散斜率和零色散点波长的位置得到优化。2005 年, Saitoh 等^[7]对普通实芯 PCF 的纤芯中心引入一个很小的缺陷空气孔对色散特性的影响进行了研究。中心小缺陷孔的引入降低了中心区域硅材料的比例,起到了补偿基质材料的固有色散的作用,从而提高了色散控制的灵活度。另外,基于 Hansen 等^[6,8]设计的混合纤芯的想法,通过减小相应位置空气孔的大小在全硅材料中实现的三角纤芯,由于其特殊的纤芯结构,可以使得色散曲线趋于平坦。图 3 为这种光纤的截面图。通过分析改变空气孔的大小对其色散曲线的影响发现,在占空比不大的情况下(在 0.3~0.4 之间变化),同普通三角格子包层 PCF 相同,在孔间距 Λ 不变的情况下,改变空气孔的直径 d 大小,色散曲线在所考虑波长范围上下移动,而色散斜率的变化很小。而孔间距 Λ 的改变,主要是调节色散曲线的斜率。三个直径较小的空气孔孔径的精细改变主要用来优化零色散点的位置。

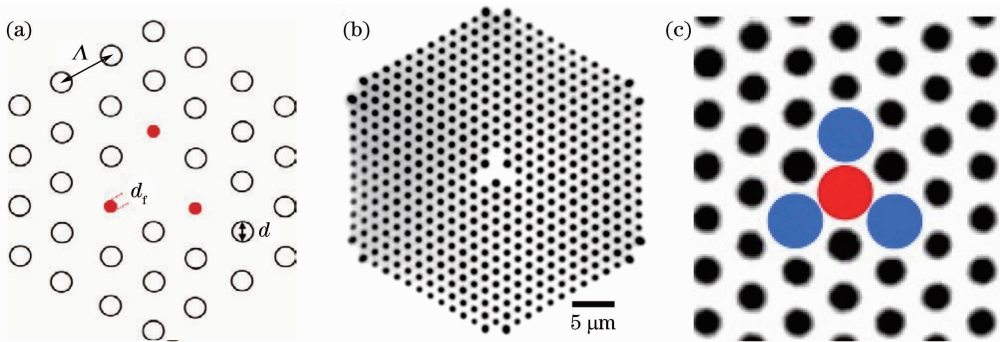


图3 两种改变纤芯结构的色散平坦 PCF 截面图。(a) 全硅材料-三角纤芯的截面, (b) 掺杂-三角纤芯 PCF 的显微镜图 ($\Lambda=1.5 \mu\text{m}$), (c) 掺杂-三角纤芯由抬高折射率的中心掺锗区域(红)、环绕它的 3 个降低折射率的掺氟区域(蓝)和三个空气孔组成

Fig.3 Schematic cross-sections of two dispersion-flattened PCFs with core-structure changing. (a) all-silicon material-triangular core structure, (b) microscope diagram ($\Lambda=1.5 \mu\text{m}$) of Ge/F doped-triangular core PCF, (c) triangular core consisting of Ge-doped central region (red), three surrounding fluorine-doped regions (blue) and other three air-hole

3 色散平坦 PCF 的典型结构与色散性能

由于 PCF 具有巨大的设计自由度的特点,到目前为止已经提出来了许多新颖的结构。这些结构在满足色散平坦性能的同时,往往还要在高非线性、高双折射以及极低的损耗等方面满足要求。虽然这些结构所达

到的具体色散性能不同,可以是不同波段的平坦色散,也可以是近零、正或者负色散值的平坦色散,甚至某些波长处的色散斜率也有特殊的要求值。但是大致可以将这些结构划分为四类:空气孔直径一致的 PCFs、空气孔直径变化的 PCFs、混合纤芯或纤芯结构变化的 PCFs 和其他结构的 PCFs。以下介绍几种比较新颖的色散平坦 PCF 结构。

3.1 混合纤芯结构

K. P. Hansen 等^[6]设计了一种具有三重对称性的混合纤芯的高非线性 PCF。其结构是在最接近纤芯的六个空气孔中,对称地将其中的三个孔替换为掺氟的石英棒,纤芯的芯棒由中心区域掺锗的石英棒代替。如图 3(c)所示。实验结果表明,通过改变孔间距和孔直径等结构参数,这种光纤色散的色散值和色散斜率包括零色散点和平坦度可以在 1400~1700 nm 范围进行调节。在很宽的波长范围可以保持低的色散斜率,色散值在超过 200 nm 范围内的波动不超过 1 ps/(km·nm)。获得的最小的色散斜率可以低到 10^{-3} ps/(km·nm²),比已报道的非线性光纤的最低的色散斜率低了一个数量级。这种结构的色散平坦高非线性 PCF 克服了普通高非线性 PCF 大于 -0.2 ps/(km·nm²)的高色散斜率对有用光谱波段的限制。另外,在 1.55 μm 处的非线性系数大于 $11(\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$,损耗可以低于 7.9 dB/km,和标准单模光纤的耦合损耗可以控制在 0.25 dB。所以这种结构的非线性 PCF 具有很高的应用潜力。

3.2 空气孔直径变化的结构

目前多数在 PCF 中设计平坦色散的方法是有选择地改变一层或几层空气孔的直径或者逐层改变空气孔的直径。图 4 所示为几种空气孔直径变化的色散平坦 PCF 结构^[4,5,9,10]。图 4(a)为逐层改变空气孔直径的结构^[5],当光纤空气孔层数为 5 层,结构参数为 $\Lambda=1.58 \mu\text{m}$, $d_1 \sim d_5$ 与孔间距 Λ 的比值分别为 0.31, 0.45, 0.55, 0.63 和 0.95 时,在波长范围 1.23~1.72 μm 之间,色散值在 $-0.4 \sim 0.4$ ps/(km·nm)附近波动。图 4(b),(c)都是具有较大占空比的情况下,实现平坦色散的同时满足高非线性要求的 PCF 结构^[4,9]。其中图 4(c)的 PCF 占空比为 $d/\Lambda=0.9$,孔间距 $\Lambda=0.9 \mu\text{m}$ 。 $d_1 \sim d_3$ 与孔间距 Λ 的比值分别为 0.43, 0.88 和 0.93 时,在 1425~1600nm 之间的波长范围内,色散值在 $-0.5 \sim 0.5$ ps/(km·nm)波动。图 4(d)的结构只有较少层数(4 层)的空气孔,光纤的 4 层空气孔具有两种尺寸^[10]。通过调整 Λ , d_1/Λ 和 d_2/Λ 这三个参数可以在不同的波长范围实现平坦色散。其中结构参数为 $\Lambda=1.76 \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda=0.29$, $d_2/\Lambda=0.8$ 时,可以在 1.22~1.625 μm 的波长范围内,实现色散值为 $-0.4 \sim 0.4$ ps/(km·nm)的平坦色散。

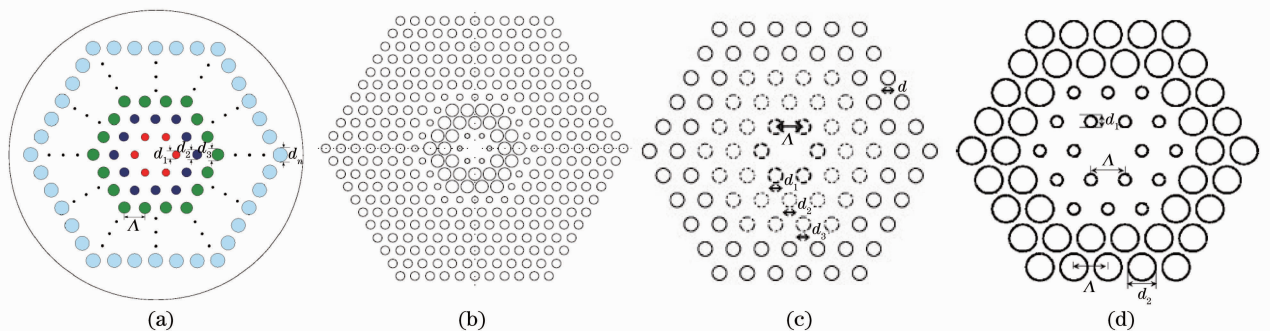


图 4 几种空气孔直径变化的色散平坦 PCF 的截面图

Fig. 4 Schematic cross-sections of some dispersion-flattened PCFs with air-hole's diameter changing

这几种空气孔直径变化的结构相比较可以发现,前三种结构空气孔直径改变的层数都较多,制备起来的难度是很大的。第四种结构采取了折衷,在将外两层空气孔设计的较大以保证较低的限制损耗的前提下,主要通过改变内两层空气孔的大小来对色散特性进行调整。相比孔径逐层改变的 PCF,虽然减低了调节的自由度,但调节色散的过程得到了一定的简化。对于这种结构的制备的难度大大减低了。

3.3 椭圆空气孔替代圆形空气孔的结构

将某些层的圆形空气孔用椭圆空气孔替代,改变椭圆孔的几何尺寸可以对光纤的色散特性进行设计,以实现平坦的色散。如图 5 所示^[11,12]。

Wang 等^[11]提出了图 5(a)这种椭圆孔代替圆孔的 PCF 结构,图中椭圆孔的长轴和短轴分别为 a 和 b 。

由于导模场被严格限制在纤芯区域,环绕纤芯的第一圈空气孔对光纤的色散特性有较大的影响。将第一圈圆形空气孔由椭圆孔代替,改变椭圆孔的长、宽或者面积,可以起到和圆形孔一样调节色散特性的作用。而由于椭圆孔的引入,这种结构 PCF 中出现了一些双折射方面的新颖行为,在设计实现某些具体双折射特性方面有一定的研究潜力。通过合理的调节参数,可以得到理想的平坦色散曲线。如当 $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$, $d=0.644 \mu\text{m}$, $a=0.64 \mu\text{m}$ 和 $b=0.538 \mu\text{m}$ 可以获得 $1330\sim 1610 \text{ nm}$ 波长范围,色散值在 $-0.5\sim 0.5 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 之间波动的平坦色散。 $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$, $d=0.644 \mu\text{m}$, $a=0.63 \mu\text{m}$ 和 $b=0.536 \mu\text{m}$, 可以获得 $1310\sim 1960 \text{ nm}$ 波长范围,色散值在 $-1.0\sim 1.0 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 波动的平坦色散。

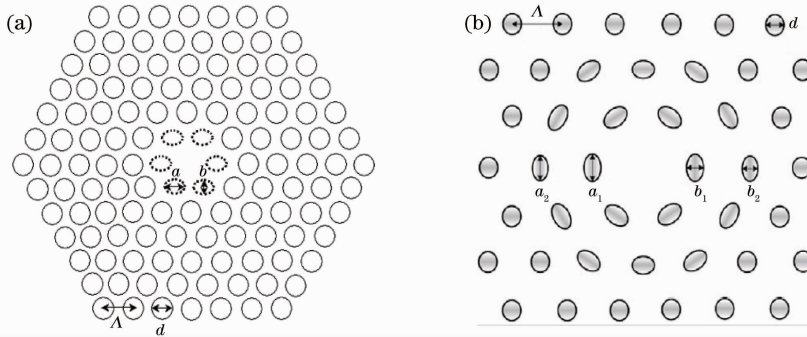


图 5 两种具有椭圆孔的色散平坦 PCF 的截面图

Fig. 5 Schematic cross-sections of two dispersion-flattened PCFs with some air-holes substituted for elliptical air-holes

2007 年, Liu 等^[12]也设计了一种将双包层空气孔的 PCF 的内包层圆形空气孔由椭圆孔替代,实现平坦色散的结构。如图 5(b)所示。这种结构的内两层孔为椭圆孔,外面的孔为圆形空气孔。圆孔和椭圆孔的中心连线是垂直于椭圆孔的长轴的,并且椭圆孔的面积和圆孔的面积相同。椭圆孔的这种排布,使得这种结构是旋转对称的结构,所以虽然有椭圆孔的引入,但双折射效应可以忽略。在结构参数为 $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$, $d=0.46 \mu\text{m}$, 第一层和第二层椭圆孔的长和宽分别为 $a_1=0.61 \mu\text{m}$, $b_1=0.35 \mu\text{m}$ 和 $a_2=0.52 \mu\text{m}$, $b_2=0.40 \mu\text{m}$ 时,在 $1000\sim 1900 \text{ nm}$ 的波长范围内,色散在 $0.6\sim 1.0 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 之间波动。而且,波长范围内的限制损耗低于 $0.2 \text{ dB}/\text{km}$ 。1550 nm 处的限制损耗更是低于 $0.025 \text{ dB}/\text{km}$ 。模场面积和传统单模光纤可比拟。因此,这种色散平坦光纤很利于在光通信系统中的应用。

4 色散平坦 PCF 的研究进展与应用

随着数值模拟方法的不断发展和完善,对色散平坦 PCF 在理论分析和实际制备方面的研究都有很大的进展。色散平坦 PCF 性能方面的提高也相应带动了对其应用方面研究的发展。2006 年, Gundu 等^[13]基于在具有相同尺寸空气孔的 PCF 中,通过在一些空气孔中填充一种具有合适折射率和色散的液体,设计出了一种在普通 PCF 中填充液体的色散平坦 PCF。填充的液体起到了改变孔尺寸的作用,从而对光纤的色散特性产生影响。虽然填充液体的材料色散会对总色散产生 10% 的贡献,因而需要选择合适的填充液体。但是实际拉制的光纤就是普通 PCF,所以制备方面的难度大大降低了。不同的填充液体下,可以在 $430, 490$ 和 505 nm 带宽分别获得 $-0.5\sim 0.5 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 的平坦色散。

Saitoh 等^[14]提出了一种色散平坦 PCF 结构,如图 6 所示,在普通三角格子 PCF 中心区域三个半径较小的空气孔为缺陷孔构成纤芯,另外,引入半径较小的一圈非正六边形的空气孔,相当于包层的第二层空气孔。通过合理的

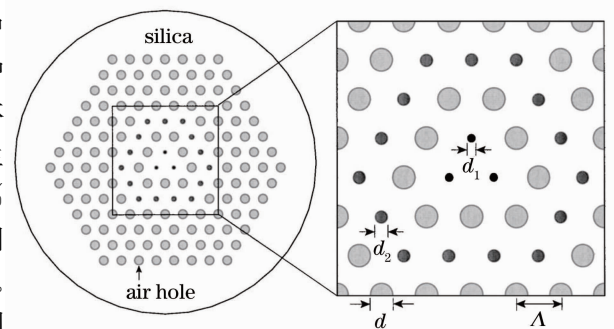


图 6 一种人为引入缺陷孔的色散平坦 PCF 的截面图

Fig. 6 Schematic cross section of a dispersion-flattened PCF with three additional air holes positioned in the core and a defective air-hole ring in the cladding

选择这两种不同尺寸空气孔的大小,在实现色散平坦特性的同时,满足大的模场面积和低的泄露损耗。该结构光纤的一组典型的性能参数为:在 $1.45\sim 1.65\ \mu\text{m}$ 的波长范围内,具有 $6.3\pm 0.5\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 的平坦色散,在这个波长范围的有效模场面积可以达到 $100\ \mu\text{m}^2$ 。

对这种结构的 PCF 的可行性和与传统光纤的相容性进行研究发现,在极端弯曲条件下(弯曲半径大约在 $3\ \text{cm}$)运行,相应的弯曲损耗可以保持在低于 $0.01\ \text{dB}/\text{km}$ 。表明这种结构的 PCF 不会受到很大宏弯损耗的影响。另外,这种结构的 PCF 和标准单模光纤的耦合损耗可以控制在 $0.6\ \text{dB}$ 的较低水平。在这种结构 PCF 的制备方面,发现除了包层缺陷环孔在制备过程中的大小波动会对有效模场面积这个性能参数产生一定的影响外,中心和包层缺陷孔直径大小在制备过程中的波动对光纤色散平坦度和模场面积的影响不大。在制备过程中参数相比目标值不超过 2% 的偏差下,色散值同理想值的偏差保持在 $\pm 0.5\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ ^[14]。

光子晶体光纤由于其独特的结构,表现出不同于传统光纤的无限截止单模传输特性、优良的色散可控特性和良好的非线性特性等,所以在很多方面可以有广泛的应用潜力。而具有高非线性的色散平坦光子晶体光纤,由于在满足高非线性要求的同时,具有良好的可控色散特性,在产生超连续谱方面有很好的应用。

2003 年, Yamamoto 等^[15]就报道了在色散平坦的偏振保持 PCF 中,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近波段产生的超连续谱。其中所使用的色散平坦偏振保持 PCF 的截面图及其色散曲线如图 7。在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的色散和色散斜率分别为 $-0.23\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 和 $0.01\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$ 。低的色散和色散斜率即近零平坦色散可以满足高效、均衡的超连续谱的产生。另外, $1.55\ \mu\text{m}$ 处模式的双折射系数为 1.3×10^{-3} ,非线性系数为 $19\ (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$,远大于色散位移光纤的 $2\ (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 。实验所用信号光源为锁模掺铒激光器,中心波长在 $1562\ \text{nm}$,脉宽为 $2.2\ \text{ps}$ 。激光器输出光源的信噪比(OSNR)大于 $35\ \text{dB}/\text{km}$ 。通过向色散平坦 PM-PCF 中注入 $40\ \text{GHz}$ 的光脉冲,获得了 $40\ \text{nm}$ 的展宽光谱。

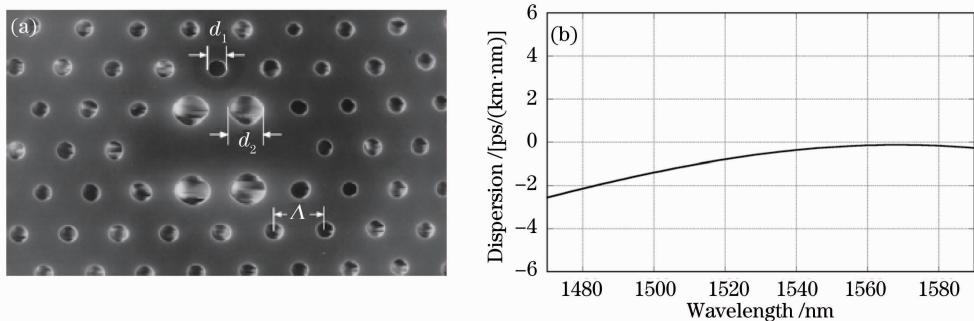


图 7 实验所用光纤截面及其色散曲线。(a) 色散平坦偏振保持 PCF 截面图, (b) 实际测得的 PM-PCF 的色散曲线

Fig. 7 Schematic cross-section of PCF used in the experiment and the PCF's dispersion curve.

(a) schematic cross-section of dispersion-flattened PM-PCF, (b) actual measured dispersion curve of the PCF

2006 年, Chow 等^[16]报道了在整个 S+C+L+U 通信波段,利用具有正常色散的色散平坦 PCF 产生超连续谱的情况。这里所用的色散平坦 PCF 就是前面提到的三重对称结构混合纤芯色散平坦 PCF,由 Crystal Fiber A/S 公司提供。纤芯直径为 $1.5\ \mu\text{m}$,在整个波段 $1500\sim 1600\ \text{nm}$ 波长范围的色散小于 $-3\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$,非线性系数达到 $11.2\ (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 。在 $1465\sim 1655\ \text{nm}$ 范围色散波动小于 $1\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$, $1550\ \text{nm}$ 波长附近的色散斜率低于 $10^{-3}\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$ 。利用 $10\ \text{mW}$ 的锁模抽运脉冲注入到 $64\ \text{m}$ 长的这种光纤中,在整个 $1470\sim 1655\ \text{nm}$ 波长范围之间,跨度 $185\ \text{nm}$ 的范围产生了平坦的均衡的超连续谱。

国内的许多研究单位也进行了大量色散平坦 PCF 中产生超连续谱的研究和实验。北京邮电大学等^[17,18]进行了 PCF 中超连续谱产生的实验,将脉宽 $1.6\ \text{ps}$,重复频率 $10\ \text{GHz}$,中心波长 $1552\ \text{nm}$ 的脉冲耦合进长度为 $80\ \text{m}$ 的色散平坦微结构光纤中,得到了 $1531\sim 1593\ \text{nm}$ 范围的平坦超连续谱输出。

在其他的非线性方面的应用,有基于色散平坦 PCF 产生 FWM 的研究^[19],以及基于色散平坦 PCF 中产生的 FWM 效应在波长转换方面的应用^[20~24]。其中北京邮电大学在 2007 年报道了基于色散平坦 PCF 中的 FWM 效应实现了 $10\ \text{Gb}/\text{s}$ 且可调谐的波长转换实验^[20]。图 8(a)为实验所用色散平坦 PCF 的色散曲线图。

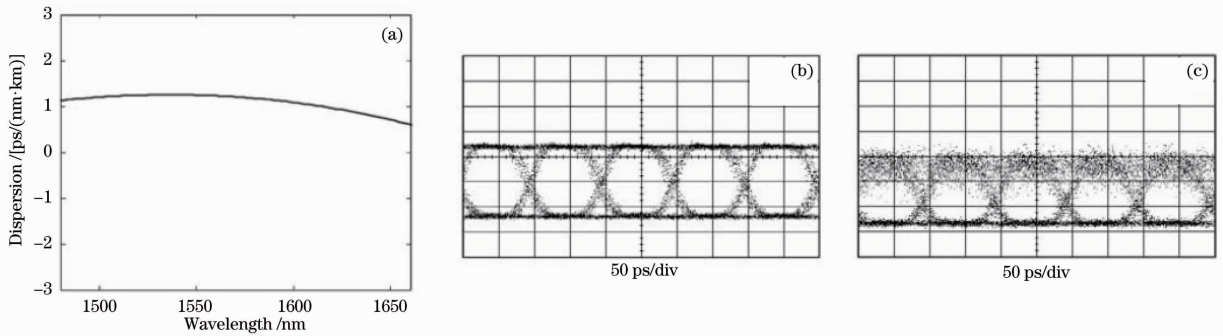


图8 实验所用光纤色散曲线及实验中原始信号和波长转换信号眼图。(a) 实验所用 DF-PCF 的色散曲线图, (b) 眼图: 波长为 1550.05 nm 的 10 Gb/s 初始信号, (c) 眼图: 波长转换为 1540 nm 的信号

Fig.8 Dispersion curve of the DF-PCF used in experiment and eye diagrams of original signal and the converted signal in experiment. (a) dispersion curve diagram, (b) eye diagrams: original 10 Gb/s signal at 1550.05 nm, (c) eye diagrams: the converted signal at 1540 nm

实验使用的光纤是长度为 30 m 的商用 Crystal-Fiber A/S (NL-1550-POS-1) 高非线性色散平坦 PCF。它在 1550 nm 处的非线性系数为 $11 (\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$ 。从色散曲线图可以看到, 在 1480~1620 nm 范围具有低的正色散 $0.5 \sim 1.5 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。实验中 PCF 和标准的单模光纤尾纤连接, 会产生 2 dB 的连接损耗。实验测得的转换效率在 -19.5 dB 附近的波动不超过 1.4 dB, 覆盖的可调谐带宽为大约 20 nm。实验结果和理论曲线吻合的较好。而且如图 8(b), (c) 所示, 对于波长为 1550.05 nm 的 10 Gb/s 非归零码型输入信号, 实验得到的转换信号的眼图较好。Wang 等^[21]的研究, 从实验上说明了在具有高非线性和平坦低正色散 PCF 中实现宽带的波长转换对于光变换在全光网络系统中的应用是很有希望的。

其他基于色散平坦 PCF 中四波混频效应的光波长转换实验如: 周会丽等^[23]采用长度为 80 m, 具有小的正常色散值的色散平坦高非线性 PCF 进行了波长转换实验: 当输入功率为 26 dBm 时, 平均转换效率为 -17.4 dB, 幅度变化小于 $\pm 2.9 \text{ dB}$, 可调谐带宽为 20 nm。邵潇杰等^[24]采用长度为 25 m 的色散平坦高非线性 PCF 进行的波长转换实验, 当抽运功率为 19.8 dBm 时, 可实现 100 nm 的转换带宽和 -20 dB 的最大转换效率。

另外, 由于制备工艺上的限制, 目前色散平坦 PCF 作为良好的传输介质大量应用到 WDM 通信系统还是代价比较大的。而在孤子传输系统中作为传输介质, 色散平坦 PCF 具有巨大的应用前景。

5 结 论

随着高速 WDM 技术的发展, 以及对各种非线性光器件如超连续光源、波长转换器和全光开关等的性能提出更高的要求, 作为其中传输媒质和重要部件的光纤的色散平坦特性越来越为人们所关注。传统光纤由于其性能方面的局限已经越来越不能满足在这些方面应用的要求, 而 PCF 由于其独特的包层结构, 具有灵活可控的色散特性和非线性特性。通过调节孔间距和空气孔的大小, 或者有选择地改变某些层空气孔的大小, 这也可以通过填充某种合适的液体实现, 还可以掺入杂质或人为引入缺陷孔改变纤芯结构等等, 可以在较宽的波长范围实现色散平坦, 同时满足对高非线性、较低的损耗等方面的要求。所获得的平坦色散性能可以明显的优于传统光纤。因此, 色散平坦光子晶体光纤在诸多领域有非常大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endless single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 2 A. Ferrando, E. Silvestre, J. J. Miret *et al.*. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11): 790~792
- 3 A. Ferrando, E. Silvestre, P. Andres *et al.*. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers[J].

- Opt. Lett.*, 2001, **9**(13): 687~697
- 4 F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri *et al.*. Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1065~1067
- 5 K. Saitoh, M. Koshiba, T. Hasegawa *et al.*. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers; application to ultra-flattened dispersion[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **11**(8): 843~852
- 6 K. P. Hansen. Dispersion flattened hybrid-core nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **11**(13): 1503~1509
- 7 K. Saitoh, N. Florous, M. Koshiba *et al.*. Ultra-flattened chromatic dispersion controllability using a defected-core photonic crystal fiber with low confinement losses[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **43**(21): 8365~8371
- 8 S. Selleri, A. Cucinotta, F. Poli *et al.*. Optical parametric amplification in dispersion-flattened highly nonlinear photonic crystal fibers[C]. *SPIE*, 2005, **5950**: K.1~K.10
- 9 K. Saitoh, M. Koshiba. Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **12**(10): 2027~2032
- 10 T. L. Wu, C. H. Chao. A novel ultraflattened dispersion photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 67~69
- 11 J. Y. Wang, C. Jiang, W. S. Hu *et al.*. Modified design of photonic crystal fibers with flattened dispersion[J]. *Optics and Laser Technology*, 2006, **38**(3): 169~172
- 12 Z. L. Liu, X. D. Liu, S. G. Li *et al.*. A broadband ultra flattened chromatic dispersion microstructured fiber for optical communications[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **273**(1): 92~96
- 13 K. M. Gundu, M. Kolesik, J. V. Moloney *et al.*. Ultra-flattened-dispersion selectively liquid-filled photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **14**(15): 6870~6878
- 14 K. Saitoh, N. J. Florous, M. Koshiba. Theoretical realization of holey fiber with flat chromatic dispersion and large mode area; an intriguing defected approach[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(1): 26~28
- 15 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
- 16 K. Chow, Y. Takushima, C. Lin *et al.*. Flat supercontinuum generation in a dispersion-flattened nonlinear photonic crystal fiber with normal dispersion[C]. Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, 2006. 1~6
- 17 Y. Xu, X. Ren, Z. Wang *et al.*. Flat super-continuum generation at 1550 nm in a dispersion-flattened microstructure fiber using picosecond pulse[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(3): 734~737
- 18 Y. Xu, X. Ren, Z. Wang *et al.*. Flatly broadened super-continuum generation at 10 Gbit/s using dispersion flattened photonic crystal fibre with small normal dispersion[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(2): 87~88
- 19 C. S. Arismar, J. D. Marconi, A. A. Rieznik *et al.*. Multiple four-wave mixing in ultra-flattened dispersion photonic crystal fibers[C]. Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. Vol-s: 1~8
- 20 X. Zhang, X. M. Ren, Z. N. Wang *et al.*. Four-wave mixing based 10-Gb/s tunable wavelength conversion in dispersion-flattened microstructure fibers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 386~388
- 21 Wang Qiuguo, Zhang Hu, Zhang Xia *et al.*. Experiment demonstration of four-wave mixing in photonic crystal fiber[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(3): 415~417
王秋国,张 虎,张 霞等. 光子晶体光纤中的四波混频实验研究[J]. 半导体光电, 2008, **29**(3): 415~417
- 22 Zhang Lan, Yang Bojun, Wang Qiuguo *et al.*. All-optical wavelength conversion based on photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2203~2205
张 岚,杨伯君,王秋国等. 基于光子晶体光纤的全光波长变换研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(11): 2203~2205
- 23 Zhou Huili, Zhang Xia, Gao Jian *et al.*. Theoretical and experiment analysis of wavelength conversion in dispersion-flattened photonic crystal fiber[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
- 24 Shao Xiaojie, Yang Dongxiao, Gen Dan. Wavelength conversion based on four-wave mixing in photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 652~655
邵潇杰,杨冬晓,耿 丹. 基于光子晶体光纤四波混频效应的波长转换研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 652~655