

光子晶体光纤包层可见光及红外宽带色散波产生*

赵兴涛^{1)2)†} 郑义¹⁾ 韩颖²⁾ 周桂耀²⁾ 侯峙云²⁾ 沈建平¹⁾
王春¹⁾ 侯蓝田²⁾

1) (北京交通大学理学院激光研究所, 北京 100044)

2) (燕山大学电气学院, 河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 亚稳材料科学与技术国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2012年7月23日收到; 2012年9月28日收到修改稿)

对光子晶体光纤包层3个空气孔之间节区的传光特性进行了分析, 对比了纤芯与包层节区传光的模场面积、非线性系数及色散特性, 得到光子晶体光纤包层节区具有小芯、高非线性的特点. 在包层空气孔较大的情况下, 得到了双零色散曲线. 根据色散曲线, 分析了色散波产生的相位匹配特性, 得到了色散波中心波长随抽运波长及功率的变化规律. 制备出了所设计的光子晶体光纤, 实验得到了在可见光及红外大于300 nm的宽带色散波, 并给出了色散波随抽运波长及功率的变化规律. 实验和理论分析结果一致, 为波长变换及超连续宽带光源的研究奠定了基础.

关键词: 光子晶体光纤, 色散波, 相位匹配, 非线性

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 42.65.Tg

DOI: 10.7498/aps.62.064215

1 引言

在光纤的反常色散区, 光脉冲尤其是超短脉冲通常是以高阶孤子的形式传输的. 然而, 由于三阶色散或更高阶的色散扰动, 它会辐射出色散波^[1-3]. 色散波的波长相对于孤子的中心波长既可以是红移也可以是蓝移, 这种新的频谱成分的产生, 又称为契伦科夫辐射或非孤子辐射^[4]. 色散波的产生使频谱得到极大的展宽, 是超连续谱产生的重要物理机制之一^[5,6], 还可以用作波长变换技术, 可在锁模飞秒激光器达不到的新波段产生散射^[7,8], 基于此技术的激光光源在生物光子学、超短脉冲相位控制及高精度频率梳等方面有重要应用.

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 的出现为非线性光纤光学领域的研究注入了新的活力, 超短激光脉冲与光子晶体光纤的结合使得非线性光学频率转换和展宽产生了许多令人兴奋的成果^[5-8]. 目前大部分研究都是利用 PCF 纤芯传输, 而 PCF 包层三个空气孔之间的节区比纤芯面积

小很多, 相应的非线性系数大很多, 很容易得到双零色散曲线, 且两个零色散波长的距离较近, 所以包层节区可以产生良好的非线性效应^[9].

本文对比了 PCF 纤芯与包层节区传光的模场面积、非线性系数及色散特性. 分析了色散波产生的相位匹配特性, 得到了色散波中心波长随抽运波长及功率的变化规律. 另一方面实验得到了在可见光及红外的宽带色散波产生, 将实验结果和理论分析进行了对比, 找到了宽带色散波的产生条件.

2 PCF 包层节区的传光特性

2.1 PCF 的结构

本文研究的 PCF 端面如图 1 所示. 包层空气孔间距 $\Lambda = 4.2 \mu\text{m}$, 空气孔直径 $d = 3.77 \mu\text{m}$, 空气填充比 $d/\Lambda = 0.88$, 纤芯直径 $d_c = 3.82 \mu\text{m}$. 三个相邻空气孔之间的区域称为节区, 两个相邻空气孔之间的壁称为脉区.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327604)、国家自然科学基金 (批准号: 60978028, 61201110, 61205084) 和河北省自然科学基金 (批准号: F2010001313, F2012203122) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zxt-81@sohu.com

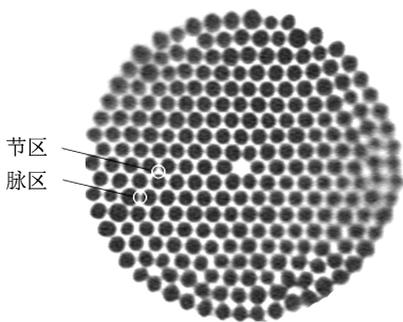


图1 PCF 端面图

2.2 PCF 纤芯和包层节区的模场面积及非线性系数

光纤有效模场面积的计算公式为^[10]

$$S_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |I(x,y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint |I(x,y)|^4 dx dy}, \quad (1)$$

非线性系数为

$$\gamma(\omega) = \frac{n_2 \omega_0}{c S_{\text{eff}}} = \frac{2\pi n_2}{\lambda S_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

其中, $I(x,y)$ 为光纤端面的光强分布, n_2 为石英的非线性折射率系数, 取值为 $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$. PCF 纤芯及包层节区传光时, 分别计算了有效模场面积及非线性系数如图 2 所示, 可以看出, 节区的有效模面积大约是纤芯的 1/10, 相应的非线性系数比纤芯高 10 倍. 所以在 PCF 非线性光学实验中, 选择包层节区进行传光, 能得到丰富的非线性效应.

2.3 PCF 纤芯和包层节区的色散特性

PCF 纤芯及包层节区传光时的色散曲线如图 3 所示. 纤芯传光时, 具有 1 个零色散波长, 在 1020 nm 附近; 节区传光时, 具有 2 个零色散波长, 分别在 710 nm 和 1460 nm 附近. 如果用纤芯传光想要得到这样的双零色散, 包层空气孔直径 d 需要在 $1 \mu\text{m}$ 以下^[11,12]. 而本文所用的 PCF 包层空气孔 $d = 3.77 \mu\text{m}$, 这样降低了 PCF 的制备难度.

2.4 PCF 包层节区的相位匹配特性

在给定光纤及光脉冲参数的情况下, 根据相位匹配条件, 即色散波和光孤子具有相同的波矢, 就可以计算出色散波的中心波长. PCF 反常色散区的

光能量能有效地转移到与抽运光相位匹配的色散波, 其中心波长在 PCF 的正常色散区, 可由以下相位匹配条件决定^[12-14]

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= \beta(\omega_p) - \beta(\omega_{\text{DW}}) \\ &= (1 - f_R) \gamma(\omega_p) P_p - \sum_{n \geq 2} \frac{(\omega_{\text{DW}} - \omega_p)^n}{n!} \beta_n(\omega_p) \\ &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

这里 ω_p 和 ω_{DW} 分别表示抽运光和色散波的角频率, $\beta(\omega_p)$ 和 $\beta(\omega_{\text{DW}})$ 分别表示 ω_p 和 ω_p 处的传播

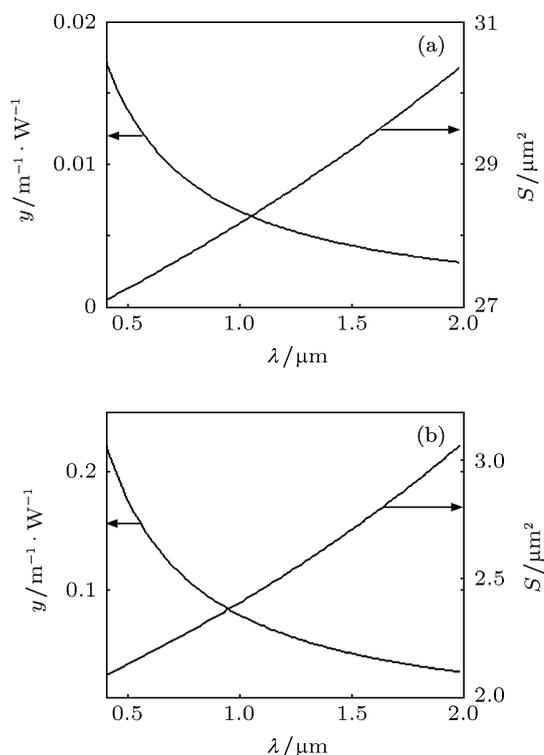


图2 PCF 的模场面积及非线性系数 (a) 纤芯; (b) 节区

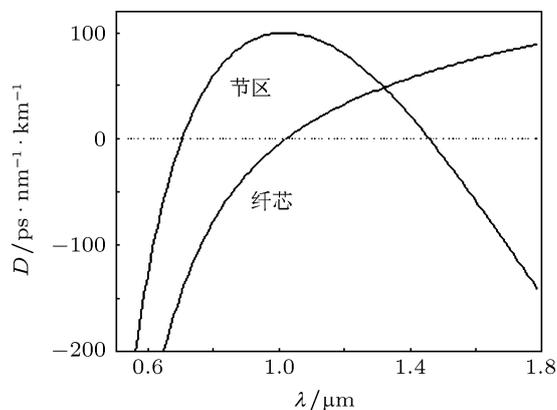


图3 PCF 纤芯及节区的色散曲线

常数, γ 是 PCF 的非线性系数, $\beta_n(\omega_p)$ 表示在 ω_p 附近泰勒展开式的 n 次项. f_R 表示光纤拉曼延时响应, P_p 表示脉冲的峰值功率. 对应于 $\Delta\beta = 0$ 的 ω_{DW} 就是色散波角频率的位置, 相位匹配发生时脉冲和色散波具有相同的波矢, 就会导致色散波的产生.

当抽运光峰值功率分别为 $P_p = 1, 10, 100$ kW 时, 计算的色散波中心波长随抽运波长的变化如图 4 所示. 当抽运波长在光纤的反常色散区, 方程 (3) 解的个数等于光纤的零色散波长个数. 根据本文所用的 PCF 包层节区传光时存在两个零色散波长, 所以色散波的中心波长也有两个, 一个在可见光 500 nm 附近的正常色散区, 称为蓝移色散波; 另一个在中红外 2000 nm 附近的正常色散区, 称为红移色散波. 两个色散波的中心波长都随抽运波长的增加而减小; 蓝移色散波中心波长随抽运功率的增加而减小, 红移色散波中心波长随抽运功率的增加而增加.

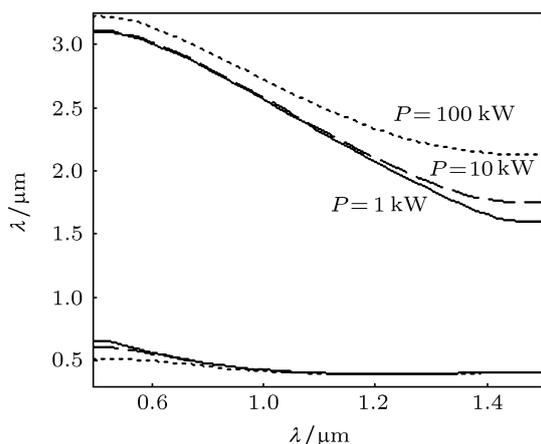


图 4 对于不同的抽运功率, 色散波的中心波长随抽运波长的变化

3 实验系统及结果讨论

PCF 非线性实验装置如图 5 所示. 光源是钛宝石飞秒激光器, 波长在 750—900 nm 之间连续可调, 重复频率为 76 MHz, 脉冲宽度为 120 fs. 飞秒激光经隔离器及 40 倍透镜耦合进 PCF, 通过 CCD 观察激光在光纤端面的入射位置, 经 PCF 的出射光谱通过两个光谱仪 (Avaspec-256 和 Avaspec-NIR-256) 进行测量, 光谱仪的测量范围分别为 200—1100 nm, 900—2500 nm.

在实验中通常测量激光器的平均功率, 光脉冲峰值功率与平均功率之间的关系如下

$$P_{av} = \nu_{fsr} T_{FWHM} P_0, \quad (4)$$

P_{av} 是平均抽运功率, ν_{fsr} 是脉冲重复频率, T_{FWHM} 是入射脉冲的脉宽, P_0 是抽运脉冲的峰值功率.

当抽运波长为 800 nm 不变时, 抽运光的平均功率分别为 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 W, PCF 的出射光谱如图 6 所示. 光谱中出现了四个波段, 根据上节相位匹配特性的分析, 这四个波段分别为 500 nm 附近的蓝移色散波、800 nm 的残余抽运光、1300 nm 附近的宽带孤子波、2000 nm 附近的红移色散波. 随着抽运功率的增加, 光孤子的能量增加, 光谱展宽, 蓝移色散波向短波段扩散, 红移色散波向长波段扩散, 实验结果与图 4 的理论分析一致.

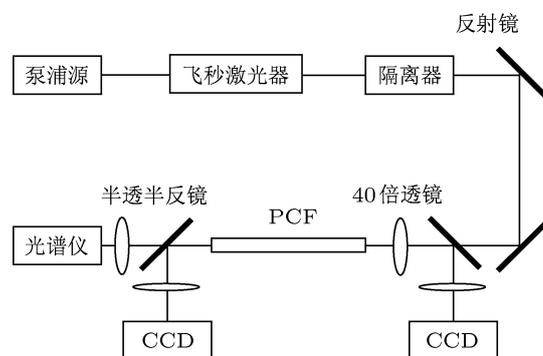


图 5 PCF 非线性波长变换测试装置示意图

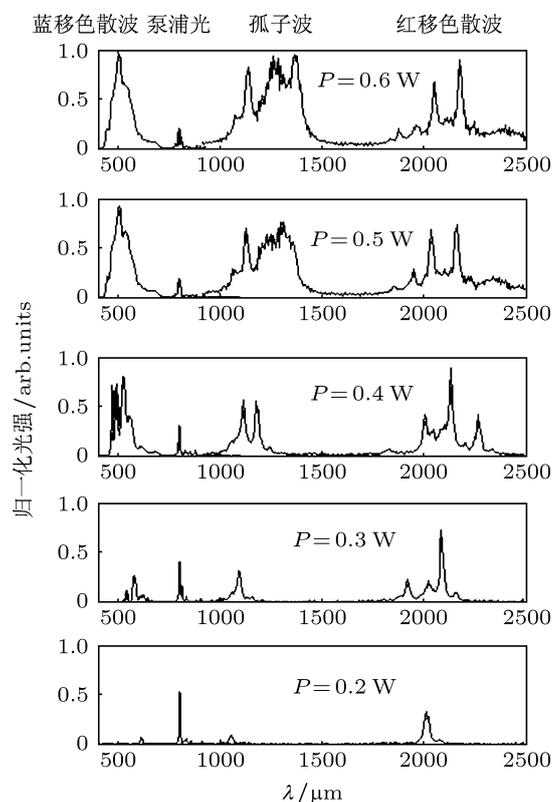


图 6 当抽运波长为 800 nm 不变时, 出射光谱随抽运功率的变化

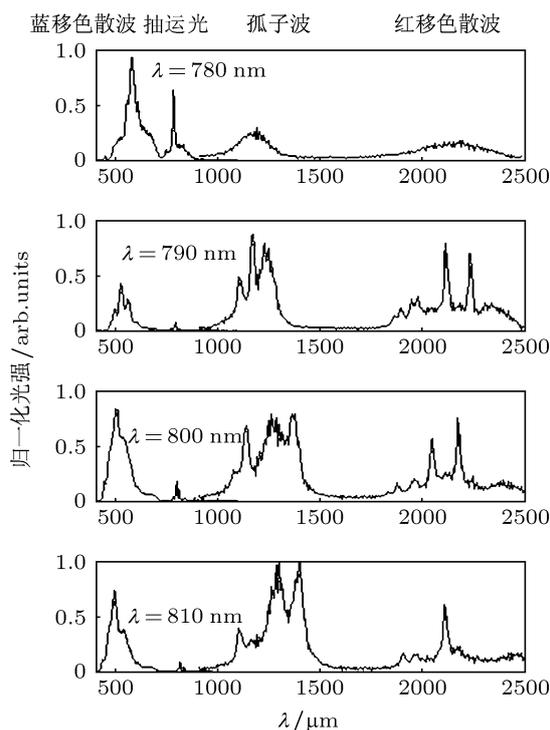


图7 当抽运功率不变时, 出射光谱随抽运波长的变化

当抽运光的平均功率为 0.6 W 时, 入射波长分别为 780, 790, 800, 810 nm, PCF 的出射光谱如图 7 所示. 随抽运波长的增加, 两个色散波的中心波长均向短波方向移动. 实验结果与图 4 的理论分析一致. 实验中短波段的蓝移色散波 20 dB 谱宽达到

了 300 nm, 长波段的红移色散波 20 dB 谱宽达到了 600 nm, 均为宽带色散波.

抽运光在 PCF 传输过程中, 反常色散区的群速度色散与自相位调制相互平衡时形成光孤子, 随抽运功率的增加, 受高阶色散、受激拉曼散射及自变陡效应的作用, 引起了高阶孤子分裂, 并伴随拉曼自频移效应, 从而扩展光谱宽度形成宽带孤子波^[15–18]. 从图 6 和图 7 中还可以看出, 随光功率及抽运波长的增加, 孤子波段的光谱在第二个零色散波长 1460 nm 处截止, 不再向长波段移动, 这与文献^[19, 20]关于孤子频移停止的分析一致.

4 结论

计算得到 PCF 包层节区的有效模面积大约是纤芯的 1/10, 相应的非线性系数比纤芯高 10 倍. 利用 PCF 包层具有小芯、高非线性、双零色散的特点, 实验得到了在可见光及红外的宽带色散波产生, 并给出了色散波随抽运功率及波长的变化规律. 蓝移和红移色散波 20 dB 谱宽分别达到了 300, 600 nm, 均为宽带色散波. 根据色散波的相位匹配理论对实验结果进行了分析, 实验和理论分析结果一致, 为波长变换及宽带光源的实现提供了新的途径.

- [1] Roy S, Bhadra S K, Agrawal G P 2009 *Opt. Lett.* **34** 2072
- [2] Cristiani I, Tediosi R, Tartara L 2004 *Opt. Express* **12** 124
- [3] Roy S, Bhadra S K, Agrawal G P 2009 *Phys. Rev. A* **79** 023824
- [4] Chang G Q, Chen L J, Kärtne F X 2010 *Opt. Lett.* **35** 2361
- [5] Frosz M H, Falk P, Bang O 2005 *Opt. Express* **13** 6181
- [6] Shen X W, Yu C X, Sang X Z, Yuan J H, Han Y, Xia C M, Hou L T, Rao L, Xia M, Yin X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 044203 (in Chinese) [申向伟, 余重秀, 桑新柱, 苑金辉, 韩颖, 夏长明, 侯蓝田, 饶芬, 夏民, 尹霄丽 2012 物理学报 **61** 044203]
- [7] Hilligsøe K M, Andersen T V, Paulsen H N, Nielsen C K, Mølmer K 2004 *Opt. Express* **12** 1045
- [8] Zhang D P, Hu M L, Xie C, Chai L, Wang Q Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 044206 (in Chinese) [张大鹏, 胡明列, 谢辰, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 044206]
- [9] Peng J H, Sokolov A V, Benabid F, Biancalana F, Light P S, Couny F, Roberts P J 2010 *Phys. Rev. A* **81** 0318031
- [10] Zhao X T, Zheng Y, Liu X X, Liu Z L, Li S G, Hou L T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194210 (in Chinese) [赵兴涛, 郑义, 刘晓旭, 刘兆伦, 李曙光, 侯蓝田 2012 物理学报 **61** 194210]
- [11] Zhao X T, Zheng Y, Liu X X, Han Y, Zhou G Y, Li S G, Hou L T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194210 (in Chinese) [赵兴涛, 郑义, 刘晓旭, 韩颖, 周桂耀, 李曙光, 侯蓝田 2012 物理学报 **61** 194210]
- [12] Genty G, Lehtonen M, Ludvigsen H, Kaivola M 2004 *Opt. Express* **12** 3471
- [13] Hao Z J, Zhao C J, Wen J G, Wen S C, Fan D Y 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 10060031 (in Chinese) [郝志坚, 赵楚军, 文建国, 文双春, 范滇元 2011 光学学报 **31** 10060031]
- [14] Li S G, Zheng Y, Yin G B, Zhang L, Zhou G Y, Hou L T 2009 *Chin. Sci.* **G 39** 1599 (in Chinese) [李曙光, 郑义, 尹国冰, 张磊, 周桂耀, 侯蓝田 2009 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学 **39** 1599]
- [15] Podlipensky A, Szarniak P, Joly N Y, Russell St P J 2008 *Opt. Soc. Am. B* **25** 2049
- [16] Fedotov A B, Voronin A A, Fedotov I V, Ivanov A A, Zheltikov A M 2009 *Opt. Lett.* **34** 851
- [17] Ji L L, Chen W, Cao Y C, Yang Z Y, Lu P X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5462 (in Chinese) [季玲玲, 陈伟, 曹迎春, 杨振宇, 陆培祥 2009 物理学报 **58** 5462]
- [18] Shen X W, Yuan J H, Sang X Z, Yu C X, Rao L, Xin X J, Xia M, Han Y, Xia C M, Hou L T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 074209
- [19] Skryabin D V, Luan F, Knight J C, Russell St P J 2003 *Science* **301** 1705
- [20] Biancalana F, Skryabin D V, Yulin A V 2004 *Phys. Rev. E* **70** 166151

Generation of visible and infrared broadband dispersive waves in photonic crystal fiber cladding*

Zhao Xing-Tao^{1)2)†} Zheng Yi¹⁾ Han Ying²⁾ Zhou Gui-Yao²⁾ Hou Zhi-Yun²⁾
Shen Jian-Ping¹⁾ Wang Chun¹⁾ Hou Lan-Tian²⁾

1) (*Laser Institute of Science College, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

2) (*Measurement Technology and Instrumentation Key Laboratory of Hebei Province, State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

(Received 23 July 2012; revised manuscript received 28 September 2012)

Abstract

The optical properties of photonic crystal fiber cladding knot among the three air holes are analyzed. The mode area, nonlinear coefficient and dispersion characteristics of the core and cladding knot are contrasted. Cladding knot of photonic crystal fiber has a small core and highly nonlinear characteristics. For larger cladding air holes, double zero dispersion curves are obtained. According to the dispersion curve, phase-matching features are analyzed for dispersive wave generation. Variation rules of the central wavelength of the dispersive wave with pump power and wavelength are achieved. The photonic crystal fiber designed is fabricated. The visible and infrared broadband dispersive waves above 300 nm are obtained in experiment. Experimental and theoretical results are completely consistent with each other. These are foundation for wavelength conversion and supercontinuum broadband light source.

Keywords: photonic crystal fiber, dispersive wave, phase-matching, nonlinear

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 42.65.Tg

DOI: 10.7498/aps.62.064215

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB327604), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978028, 61201110, 61205084), the Young Scientists Fund of the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F2010001313, F2012203122).

† Corresponding author. E-mail: zxt-81@sohu.com