

基于光子晶体光纤和飞秒激光源的近红外波段 宽带孤子和可见区高效色散波产生的实验

杨建菊^{1,2}, 周桂耀^{1,2*}, 韩颖^{1,2}, 侯蓝田^{1,2},
李曙光^{1,2}, 王伟^{1,2}, 赵兴涛^{1,2}, 苑金辉³

(1. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
3. 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 将钛宝石激光器产生的飞秒激光脉冲泵浦实验室自制的高非线性双折射光子晶体光纤, 脉冲的中心波长为 820 nm, 位于光子晶体光纤的接近于零色散的反常色散区. 实验结果表明: 随着泵浦功率的增加, 一阶孤子的中心波长发生了红移, 同时产生的色散波的中心波长则发生蓝移进入可见光区. 当泵浦功率达到 0.45 W 时, 色散波与残余泵浦的输出功率比为 42.67, 色散波的带宽达到 81 nm, 而处于近红外波段的红移孤子带宽可达 231 nm. 利用高非线性光子晶体光纤产生近红外波段宽带孤子和可见区高效色散波实验对飞秒激光频率转换和光谱展宽具有很好的借鉴意义.

关键词: 高非线性光子晶体光纤; 飞秒激光频率转换; 色散波; 红移孤子
中图分类号: TN252 **文献标识码:** A

Experiment on the generation of broad band soliton and visible region highly efficient dispersion wave using photonic crystal fiber and femtosecond laser source

YANG Jian-Ju^{1,2}, ZHOU Gui-Yao^{1,2*}, HAN Ying^{1,2}, HOU Lan-Tian^{1,2},
LI Shu-Guang^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, ZHAO Xing-Tao^{1,2}, YUAN Jin-Hui³

(1. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China;
3. Beijing University of Posts and Telecommunications, the Key Laboratory of Information Photonics
and Optical Communications, Beijing 100876, China)

Abstract: A high-linear birefringence photonic crystal fiber is pumped by a femtosecond laser pulse generated by Ti: sapphire laser. The center wavelength of the pulse is 820 nm, which is located in the anomalous dispersion region of the photonic crystal fiber near zero dispersion. Experimental results show that the central wavelength of soliton is red shifted while that of dispersion wave is blue shifted into the visible wavelength with the increase of pump power. When the average power of the pump is increased to 0.45 W, the ratio of the dispersive wave to the residual pump intensity can be up to 42.67, while the spectral width of dispersion wave is broadened to 81 nm as well as the soliton bandwidth to 231 nm. Near infrared broad soliton and the highly efficient dispersive wave in the visible region was generated in the high nonlinear photonic crystal fiber, which provides an important reference for the frequency conversion and spectral broadening of the femtosecond laser.

收稿日期: 2015-10-25, 修回日期: 2016-04-01

Received date: 2015-10-25, revised date: 2016-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61377100, 61205084, 61405173), 河北省自然科学基金(F2012203122, F2014203194)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61377100, 61205084, 61405173), Natural Science Foundation of Hebei Province(F2012203122, F2014203194)

作者简介(Biography): 杨建菊(1986-), 女, 河南南阳人, 博士, 主要从事光子晶体光纤的非线性特性研究. E-mail: yangjianju521@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: zguiyao@163.com

Key words: high nonlinear photonic crystal fiber, femtosecond laser frequency conversion, dispersion wave, redshift soliton

PACS: 42. 65. Tg, 42. 81. Dp, 42. 81. -i

引言

光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 具有高非线性、高双折射以及可调的色散等特性, 在非线性光学领域尤其是在超连续谱产生方面具有极大的优势^[1-4]. 色散波 (Dispersive Wave, DW) 又名切伦科夫辐射 (Cherenkov Radiation, CR) 或非孤子辐射 (Nonsolitonic Radiation, NSR), 作为超连续谱可见波段的重要组成部分, 是 PCF 反常色散区的孤子受到高阶色散和拉曼散射的扰动, 在满足相位匹配的正常色散区产生的^[5]. 色散波的产生可用于波长转换, 克服了四波混频转换带宽窄^[6]、脉冲走离效应造成的转换效率低等缺点^[7], 在自由空间通信、生物光子学^[8]、光谱学及超快科技^[9]等方面有广泛的应用.

2002 年 Herrmann 等人在 PCF 超连续谱中发现了色散波^[10]. 2003 年 Tartara 等人实现了转换效率为 24%, 但是带宽仅有 10 nm 的色散波^[11]. 2010 年 Chang 等人提出大多数实验在泵浦脉冲大于 100fs 时可见波段同时仅能形成窄带和低转换效率的色散波^[12]. 2011 年 Yuan 等人使用脉宽大于 100fs 的激光器泵浦单零色散 PCF 得到可见色散波带宽为 54 nm^[13]. 2012 年 Shen 等人通过使用脉宽为 120fs 的激光器在功率为 0.7 W 泵浦 PCF 的包层得到色散波与残余泵浦的输出峰值功率比达到 24.32, 带宽为 62.1 nm^[14]. 2015 年陈其杰采用中心波长为 1 032 nm 脉宽为 140fs 的光纤飞秒激光器作为抽运源, 获得了 36 nm 的近红外色散波^[15]. 由于 PCF 具备灵活的设计结构, 可通过设计双折射结构实现色散波波长调谐. 目前, 国内外对于双折射结构光纤产生色散波的研究较多^[16-19], 但是利用双折射光纤在泵浦脉冲大于 100 fs 产生高效和宽带色散波的报道较少.

本文采用有限元法对实验室自制的 PCF 进行数值分析, 得到此 PCF 具有高非线性、双折射、双零色散等特性. 使用脉宽为 120 fs 钛宝石飞秒激光器在反常色散区泵浦该 PCF, 通过实验分析了泵浦功率和偏振方向对色散波的影响. 此次实验使用适中功率得到宽带 (>80 nm) 和高效 (>40) 的可调色散波, 同时实现了近红外波段宽带孤子展宽和可见区

高效率的频率转换.

1 理论基础与计算

PCF 的色散系数定义为

$$D(\lambda) = (-\lambda/c) \left(\frac{d^2 n_{\text{eff}}(\lambda)}{d\lambda^2} \right), \quad (1)$$

c 是光在真空中的传播速度, λ 是波长, n_{eff} 为有效折射率.

PCF 的模式双折射度 $B(\lambda)$ 可以表示为

$$B(\lambda) = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|, \quad (2)$$

n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别是基模的两个正交偏振态对应的模式有效折射率.

PCF 的有效模场面积和非线性系数的计算公式分别为

$$A_{\text{eff}} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2 / \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^4 dx dy, \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}. \quad (4)$$

E 为横向电场分布, n_2 为石英非线性折射率系数, 取值 $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$.

图 1 是本实验室设计并拉制的 PCF 端面图, 纤芯慢轴长度为 $2.8 \mu\text{m}$, 快轴长度为 $1.74 \mu\text{m}$. 为了精确, 根据图 1 端面所给参数, 通过 CAD 描点法得到图形并导入有限元计算软件中, 计算了 PCF 的色散、双折射、模场面积 (非线性系数) 曲线分别如图 2、图 3、图 4 所示. 从图 2 可看出 PCF 快轴和慢轴的第一个零色散点分别是 780 nm、795 nm, 第二个零色散点为 1 980 nm、2 100 nm. 根据式 (2) 计算 PCF 的双折射度曲线如图 3 所示, 在 820 nm 处双折射度为 5.72×10^{-4} . 该 PCF 具有较小的双折射度, 快慢轴模场面积与非线性系数变化不大, 本文只绘出快轴模场面积与非线性系数随波长变化关系图. 从图 4 可看出模场面积随波长从 $2.36 \mu\text{m}^2$ 增加到 $4.73 \mu\text{m}^2$, 增大幅度达到 1 倍. 在泵浦波长为 820 nm 处, 模场面积仅为 $2.6 \mu\text{m}^2$, 由此可知在泵浦波长处有极强的非线性. 根据式 (4) 计算出 PCF 在 820 nm 的非线性系数为 $8.81 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$.

2 实验结果与讨论

实验装置如图 5 所示, 实验所用光源为美国

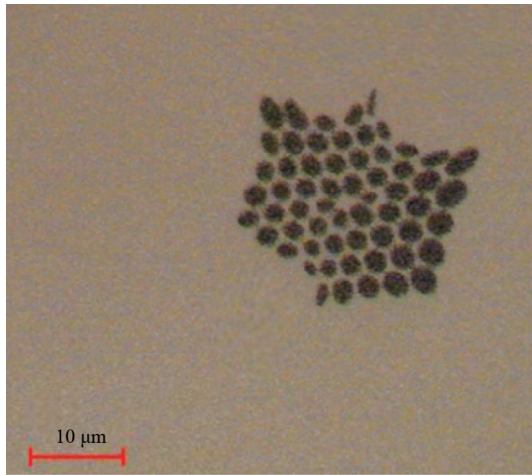


图1 PCF 的端面
Fig. 1 The cross section of PCF

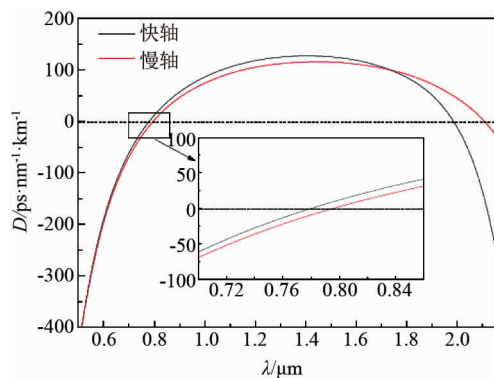


图2 PCF 色散系数随波长的变化;内插图是局部色散放大图
Fig. 2 Dispersion of PCF as a function of wavelength. Inset is the amplification of a local

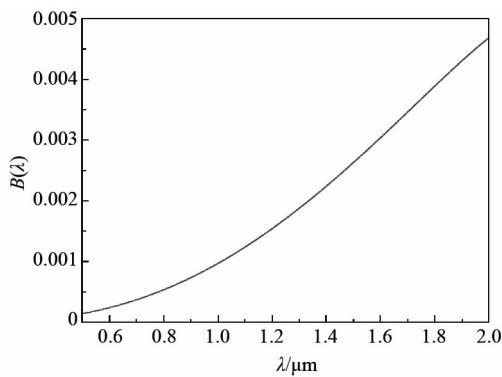


图3 PCF 的双折射度 $B(\lambda)$ 随波长的变化
Fig. 3 Birefringence degrees of PCF as a function of wavelength

Coherent 公司生产的型号为 Mira900 的钛宝石飞秒激光器,其输出脉冲类型为双曲正割型,脉宽为 120 fs,重复频率 76 MHz,中心波长在 760 ~ 980 nm 可调.飞秒激光经隔离器,可调衰减片,半波片和 40 ×

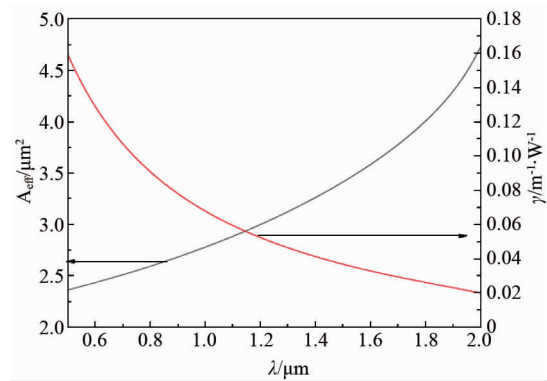


图4 PCF 的模场面积及非线性系数随波长的变化
Fig. 4 Effective mode area and nonlinear coefficient of PCF as a function of wavelength

透镜耦合到 1 m 长 PCF 的纤芯.衰减片用来控制入射光的平均功率,半波片用来控制入射光的偏振方向.输出光谱经半透半反镜一部分进入 CCD,便于观察光斑位置,另一部分进入光谱分析仪(Avaspec-256 和 Avaspec-NIR-256)进行测量.光谱仪的测量波长范围分别是 200 ~ 1 100 nm,900 ~ 2 500 nm.

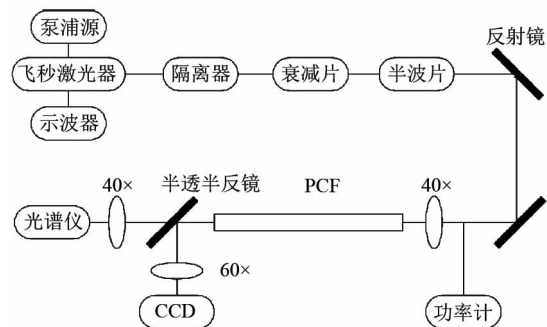


图5 实验装置示意图
Fig. 5 Experiment setup

当泵浦波长为 820 nm,抽运功率从 0.15 W 增加到 0.45 W,随功率变化的 PCF 输出光谱如图 6 所示.从图 2 的色散曲线可知,泵浦波长为 820 nm 时位于 PCF 的反常色散区.从图 6 可看到在近红外长波处出现了第一个一阶光孤子,这是色散和自相位调制的互相作用产生的.在近红外短波段产生的第二个一阶孤子是由残余泵浦产生的.由于高阶色散和脉冲内拉曼散射的作用,脉冲频谱呈现不对称展宽.当功率从 0.15 W 向 0.45 W 增加,从图中可看到第一个一阶孤子中心波长从 1 845 nm 红移到 1 859 nm,第二个一阶孤子中心波长从 994 nm 红移到 1 097 nm,产生的色散波中心波长从 612 nm 蓝移到 581 nm.这是因为拉曼效应的影响,孤子频谱持

续红移,基于孤子色散波的相位匹配条件,在可见波段产生色散波且随孤子的红移而不断蓝移. 泵浦功率从 0.35 W 增加至 0.45 W,长波处一阶孤子往长波方向移动很小,峰值功率强度小幅增加,色散波向短波方向移动并不明显,然而峰值强度却有大幅提升. 主要是随波长增大的纤芯模场面积以及硅材料内在本征损耗导致飞秒脉冲与纤芯非线性作用减弱,拉曼效应导致孤子自频移减弱,因此中红外孤子的移动变缓. 另外,孤子中心波长逐渐靠近第二个零色散点,由于频谱反冲效应孤子频移停止,与之相匹配的色散波也不再向短波方向移动,这与文献[20]~[22]关于孤子频移停止的分析一致. 更高功率的孤子会形成一个更强的势场,对色散波的捕获作用将越大,从而使增加的泵浦功率更多的转移给与红移孤子相匹配的蓝移色散波,色散波的转换效率变高. 由此可看出色散波是反常色散区的孤子向正常色散区的短波段进行能量转换的一种非线性现象.

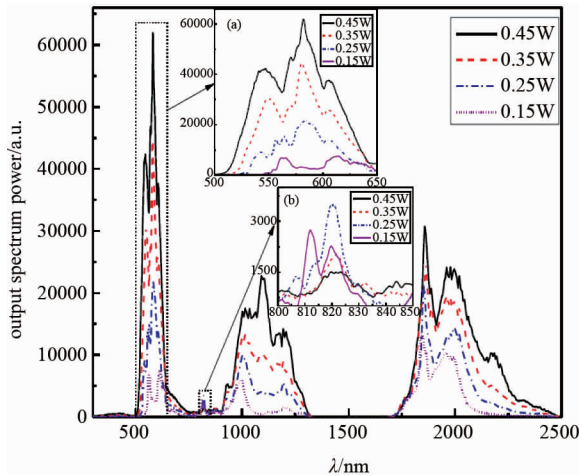


图6 泵浦波长为 820 nm,抽运功率从 0.15 W 增加到 0.45 W 的输出光谱图;插图 [a] 和 [b] 分别是色散波和泵浦脉冲局部放大图
Fig. 6 Output spectra with the pump at 820 nm and the input average power from 0.15 W to 0.45 W. Insets (a) and (b) show the magnified output spectra of DW and the residual pump

图7 给出泵浦波长为 820 nm,长波处孤子波、色散波的带宽随抽运功率从 0.15 W 增加到 0.45 W 的变化趋势. B_{dw} 、 B_{ls} 分别表示色散波与长波处一阶孤子的均方根带宽,可用以下式精确描述^[23]:

$$B = [\langle \lambda^2 \rangle - \langle \lambda \rangle^2]^{1/2},$$

$$\langle \lambda^n \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \lambda^n P(\lambda) d\lambda}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

式中角括号表示输出谱功率曲线上求平均, $P(\lambda)$ 表示某一波长下的输出功率. 从图7可看到随着功率增加,孤子的带宽从 186 nm 增加到 231 nm,色散波的带宽从 41 nm 增加到 81 nm. 当功率从 0.35 W 增加到 0.45 W 时,孤子的带宽小幅增加,这是因为随着功率增加,孤子向长波方向移动受到拉曼频移作用减弱以及第二个零色散附近对孤子频谱的反冲. 色散波的带宽大幅增加,这是因为转化为色散波的能量越来越多.

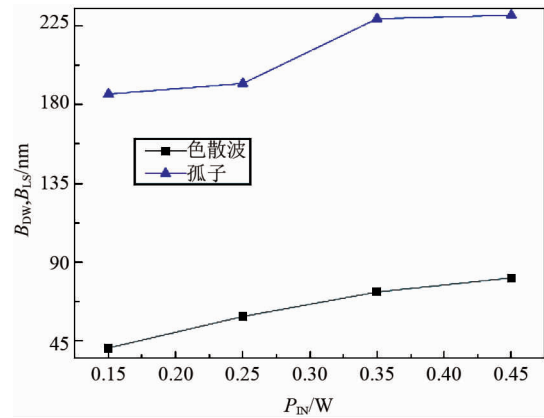


图7 泵浦波长为 820 nm,抽运功率从 0.15 W 增加到 0.45 W 的色散波、长波处孤子波的带宽
Fig. 7 Bandwidths of DW and long wave soliton with pump at 820 nm and input average power increases from 0.15 W to 0.45 W

图8 展示泵浦波长为 820 nm 抽运功率从 0.15 W 向 0.45 W 增加时色散波、短波处孤子波、长波处孤子波与残余泵浦的输出功率比,分别用 η_{dw} 、 η_{ss} 、 η_{ls} 表示. 其中 $\eta_{dw} = \frac{P_{DW}}{P_{RP}}$ 、 $\eta_{ss} = \frac{P_{SS}}{P_{RP}}$ 、 $\eta_{ls} = \frac{P_{LS}}{P_{RP}}$. P_{DW} 表示色散波输出功率, P_{SS} 表示短波处孤子波输出功率, P_{LS} 表示长波处孤子波输出功率, P_{RP} 表示残余泵浦的输出功率. 从图8可看出随着功率增加, η_{dw} 、 η_{ss} 、 η_{ls} 具有一致的增大趋势,在功率为 0.45 W 时, η_{dw} 、 η_{ss} 、 η_{ls} 的值分别是 42.67, 15.61, 21.27, 该光纤实现了高效的色散波转换. 从图中可看出功率从 0.35 W 增大到 0.45 W,相比近红外孤子和长波处孤子,色散波的转换效率获得大幅提高. 这是因为随着更大的功率,处于反常色散区的自频移孤子能快速俘获具有相同群速度的蓝移辐射,使能量转移至色散波.

图9 表示泵浦波长为 820 nm 抽运功率为 0.4 W 下光脉冲的偏振方向与 PCF 快轴形成不同夹角的输出光谱图. 当偏振方向与快轴方向分别成 0° 到

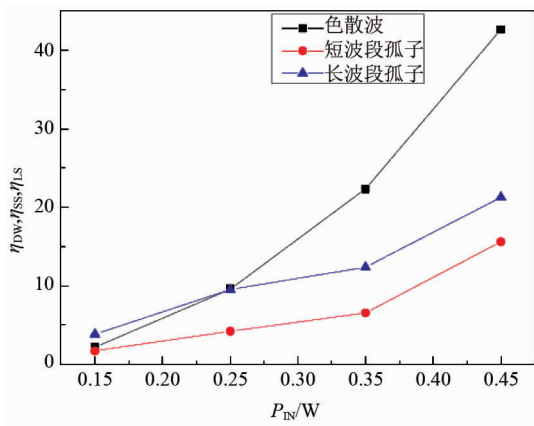


图8 泵浦波长为 820 nm,抽运功率从 0.15 W 增加到 0.45 W 的长波段孤子波、色散波和短波段孤子波与残余泵浦的输出功率比

Fig.8 Ratios of the output power of the long wave soliton, the DW and the short wave soliton to the output power of the residual pump as a function of P_{IN} at 820 nm

90°夹角时,可看到长波处一阶孤子中心波长从 1 823 nm 红移到 1 854 nm,近红外孤子中心波长也向长波方向移动,色散波的中心波长从 583 nm 蓝移到 543 nm.其主要原因是不同偏振状态下,光纤两种模式具有不同的色散曲线,孤子自频移匹配过程产生了不同中心波长的色散波.当偏振角度为 45°时,两偏振模之间的交叉相位调制及相干耦合会导致脉冲俘获,使得蓝移方向的频谱展宽受到抑制.色散波的峰值功率相比沿光纤单一轴偏振方向传播的功率要低是因为脉冲功率分配到 PCF 的快轴和慢轴上,能量分散,色散波转换效率低.当偏振方向与快轴成 90°夹角时,可得色散波的带宽为 33 nm,色散波与泵浦脉冲的输出功率比为 33.52.通过实验可看到,入射脉冲偏振方向的调节可以有效地控制 PCF 中蓝移辐射的位置,可调色散波的范围可达 40 nm,为设计高非线性高双折射光纤产生更大可调范围的宽带高效色散波奠定了基础.

3 结论

本文通过使用脉宽为 120 fs 的钛宝石飞秒激光器泵浦实验室自制的高非线性双折射 PCF 产生了宽带近红外孤子波和高效频率转换的色散波.通过分析发现随着泵浦功率从 0.15 W 增加到 0.45 W,近红外长波处的孤子波中心波长从 1 845 nm 红移到 1 859 nm,产生的色散波中心波长从 612 nm 蓝移到 581 nm,孤子波的带宽从 186 nm 增加到 231 nm,色散波的带宽从 41 nm 增加到 81 nm.在功率为 0.45

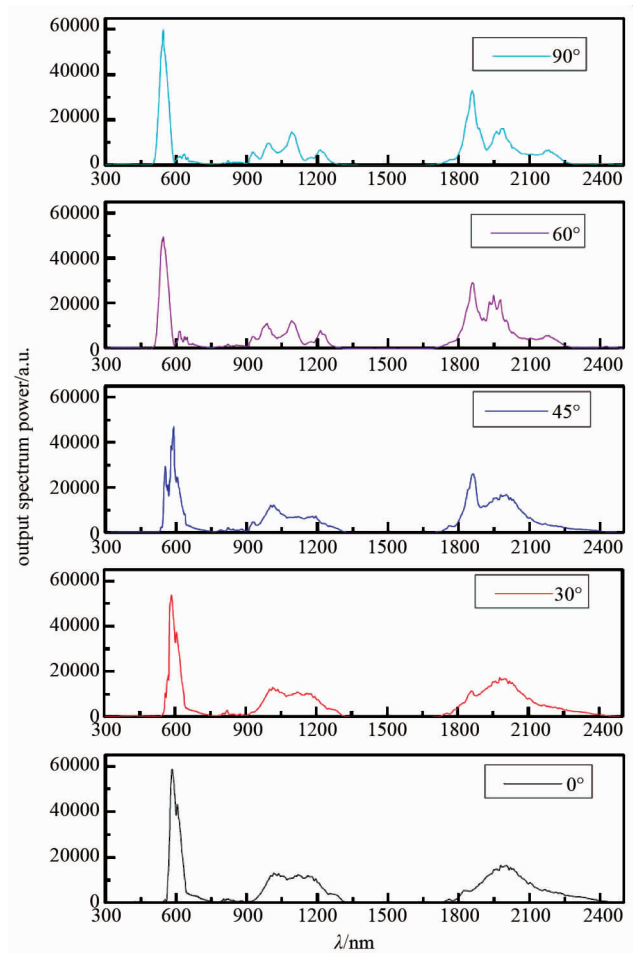


图9 泵浦波长为 820 nm,抽运功率为 0.4 W 下输出光谱随半波片旋转而变化

Fig.9 Output spectra with the pump at 820 nm and 0.4 W at different of polarization along half plate

W 的情况下,色散波和孤子波与残余泵浦的输出功率比 η_{DW} , η_{LS} 的值分别是 42.67, 21.27, 实现了宽带高效的色散波转换.当偏振方向与快轴方向分别形成 0°到 90°夹角时,可看到近红外长波处一阶孤子的中心波长从 1 823 nm 红移到 1 854 nm,色散波的中心波长从 583 nm 蓝移到 543 nm.通过光纤的双折射效应,得到可调色散波范围达到 40 nm,为生物光子学和红外光谱学等应用提供了新的方法.光纤非线性过程与脉冲宽度、峰值功率、泵浦波长以及光纤本身的参数有关,下一步可通过优化泵浦波长,光纤参数等条件产生所需的色散波.

References

- [1] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of modern physics*, 2006, **78**(4):1135.
- [2] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**

- (5605): 358 – 362.
- [3] CUI Hai-Yan, HOU Lan-Tian, HAN Ying. Generation of infrared ultra-wide band continuum spectrum with photonic crystal fibre[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (崔海燕, 侯蓝田, 韩颖. 光子晶体光纤红外超宽带连续谱的研究. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(6): 445 – 447.
- [4] Knight J C. Photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2003, **424** (6950): 847 – 851.
- [5] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics, Fifth Edition* [M]. (贾东方, 葛春风, 等译. *非线性光纤光学*. 第五版, 北京: 电子工业出版社), 2014: 347 – 351.
- [6] Chen A Y H, Wong G K L, Murdoch S G, *et al.* Widely tunable optical parametric generation in a photonic crystal fiber[J]. *Optics letters*, 2005, **30**(7): 762 – 764.
- [7] Zhang L, Yang S G, Han Y, *et al.* Simultaneous generation of tunable giant dispersive waves in the visible and mid-infrared regions based on photonic crystal fibers [J]. *Journal of optics*, 2013, **15**(7): 075201.
- [8] Liu X P, Kuyken B, Roelkens G, *et al.* Bridging the mid-infrared-to-telecom gap with silicon nano photonic spectral translation [J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(10): 667 – 671.
- [9] Yuan J H, Sang X Z, Wu Q, *et al.* Efficient red-shifted dispersive wave in a photonic crystal fiber for widely tunable mid-infrared wavelength generation [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, **10**(4): 045405.
- [10] Herrmann J, Griebner U, Zhavoronkov N, *et al.* Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers [J]. *Physical Review Letters*, 2002, **88**(17): 173901.
- [11] Tartara L, Cristiani I, Degiorgio V. Blue light and infrared continuum generation by soliton fission in a microstructured fiber [J]. *Applied Physics B*, 2003, **77**(2): 307 – 311.
- [12] Chang G Q, Chen L J, Kartne F X. Highly efficient Cherenkov radiation in photonic crystal fibers for broadband visible wavelength generation [J]. *Optics letters*, 2010, **35** (14): 2361 – 2363.
- [13] Yuan J H, Sang X Z, Yu C X, *et al.* Highly efficient and broadband Cherenkov radiation at the visible wavelength in the fundamental mode of photonic crystal fiber [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2011. **23**(12): 786 – 788.
- [14] Shen X W, Yuan J H, Sang X Z, *et al.* Highly efficient Cherenkov radiation generation in the irregular point of hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(11): 114102.
- [15] CHEN Qi-Jie, ZHOU Gui-Yao, SHI Fu-Kun, *et al.* Study of near-infrared dispersion wave generation for microstructured fiber [J]. *Acta Physica Sinica* (陈其杰, 周桂耀, 石富坤, 等. 微结构光纤近红外色散波产生的研究. *物理学报*), 2015, **64**(3): 034215.
- [16] Mitrofanov A V, Linik Y M, Buczynski R, *et al.* Highly birefringent silicate glass photonic-crystal fiber with polarization-controlled frequency-shifted output: A promising fiber light source for nonlinear Raman microspectroscopy [J]. *Optics express*, 2006, **14**(22): 10645 – 10651.
- [17] Ivanov A A, Alfimov M V, Zheltikov A M, *et al.* Polarization-controlled vectorial spectral transformations of femtosecond pulses in a birefringent photonic-crystal fiber [J]. *JOSA B*, 2006, **23**(5): 986 – 991.
- [18] LI Shu-Guang, ZHENG Yi, YIN Guo-Bing, *et al.* Generation and controlling of dispersive wave by femtosecond pulse propagating in the normal dispersion regimes of birefringent photonic crystal fiber [J]. *Chin. Sci. G* (李曙光, 郑义, 尹国冰, 等. 飞秒脉冲在双折射光子晶体光纤正常色散区传输时色散波的产生机理及控制. *中国科学 G 辑*), 2009, **39**(11): 1599 – 1605.
- [19] Yuan J H, Sang X Z, Yu C X, *et al.* Widely wavelength-tunable two-colored solitons and small spectral component for broadband mid-infrared wavelength generation in a highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2012, **24**(8): 670 – 672.
- [20] Skryabin D V, Luan F, Knight J C, *et al.* Soliton self-frequency shift cancellation in photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **301**(5640): 1705 – 1708.
- [21] Biancalana F, Skryabin D V, Yulin A V. Theory of the soliton self-frequency shift compensation by the resonant radiation in photonic crystal fibers [J]. *Physical Review E*, 2004, **70**(1): 016615.
- [22] ZHAO Xing-Tao, ZHENG Yi, HAN Ying, *et al.* Generation of visible and infrared broadband dispersive waves in photonic crystal fiber cladding [J]. *Acta Physica Sinica* (赵兴涛, 郑义, 韩颖, 等. 光子晶体光纤包层可见光及红外宽带色散波产生. *物理学报*), 2013, **62**(6): 064215.
- [23] Marcusec D. Pulse distortion in single-mode fibers [J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(10): 1653 – 1660.