

doi:10.3788/gzxb20184711.1106004

双零色散光子晶体光纤中可见及红外宽带 高效色散波

赵兴涛, 蒋国辉, 程吉瑞, 华露, 熊强

(燕山大学 河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:利用 Ti 宝石激光器生成的飞秒激光脉冲入射高非线性双零色散光子晶体光纤, 进行非线性光谱实验. 抽运脉冲的中心波长为 800 nm, 位于接近零色散点的反常色散区, 在正常色散区观测到双零色散光子晶体光纤产生的超宽带连续光谱输出, 相对于单零色散光子晶体光纤, 转换效率更高、谱带稳定而平滑, 不仅获得了高效宽带蓝移色散波, 还获得了长波段正常色散区的宽带红移色散波. 实验结果与理论分析的相位匹配条件一致, 阐明了色散波产生的物理机理. 随泵浦功率的增大, 长波段红移色散波发生明显红移, 可见波段蓝移色散波强度显著增长, 当泵浦功率为 0.68 W 时, 泵浦光几乎全部转化, 蓝移色散波与残余泵浦的输出功率之比大于 257 : 1, 光谱转换效率极高, 达到 99.6% 以上. 蓝移色散波的宽带达到了 309 nm, 近红外波段的红移色散波与孤子波相连, 形成超连续谱, 带宽可达 628 nm. 实验结果对超短脉冲激光频率转换和宽带光源的研究具有参考价值.

关键词:光子晶体光纤; 非线性光学; 相位匹配; 色散波; 喇曼散射; 高效频率转换

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1106004-7

Visible and Infrared Broadband High Efficiency Dispersion Wave in Photonic Crystal Fiber with Two Zero Dispersion Wavelength

ZHAO Xing-tao, JIANG Guo-hui, CHENG Ji-rui, HA Lu, XIONG Qiang

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

Abstract: The nonlinear spectroscopic experiments were carried out that femtosecond laser pulses generated by Ti: sapphire laser are used to pump high nonlinear double zero dispersion photonic crystal fibers. When the central wavelength of the pump pulse is 800 nm, in the anomalous dispersion region, the ultra-wide bandwidth continuous spectral output from the double zero dispersive photonic crystal fiber is observed. Compared with that of the single zero dispersive photonic crystal fiber, double zero dispersive photonic crystal fiber has higher conversion efficiency, stable and smooth spectral band. Both the high efficiency blue shifted dispersive waves and the broadband red shifted dispersion wave in the normal dispersion region at long wavelength are obtained. Consistent with the phase matching condition of theoretical analysis, the physical mechanism of the phase matching is clarified. With the increase of pump power, the long-band dispersion wave has a significant shift to long-wave band and the short (visible) band dispersion wave intensity increases significantly. When the pump power is 0.68 W, the pump is almost completely converted. The ratio of blue shift dispersion wave to residual pump output power is 257 : 1, and the efficiency of spectral conversion is as high as 99.6%. The blue shift dispersive waves has a wide band of 309 nm, and the red shift dispersive waves in near infrared band is connected with the soliton wave to form a supercontinuum spectrum with a bandwidth of 628 nm. The experiment results

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61405172, 61640408), 河北省自然科学基金 (No.F2018203346) 和国家重点基础研究发展计划 (No.2010CB327604) 资助

第一作者: 赵兴涛 (1981-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光子晶体光纤的制备和应用. Email: zxt-81@sohu.com

收稿日期: 2018-06-27; **录用日期:** 2018-09-12

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

have reference value for the study of ultrashort pulse laser frequency conversion and broadband light source.

Key words: Photonic crystal fibers; Nonlinear optics; Phase matching; Dispersive waves; Raman scattering; High-efficiency frequency conversion

OCIS Codes: 060.5295;060.4370;260.2030;300.6450

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)^[1]具有灵活的结构设计、可调的色散特性^[2],通过准确的结构设计可以控制零色散波长的位置,使飞秒激光脉冲泵浦波长处于不同的色散区域^[3-4],从而可以获得自相位调制、受激喇曼散射、交叉相位调制以及参量四波混频^[5]等多种非线性光学现象,实现超短光脉冲传输有效的频率转换^[6-8].近年来在 PCF 中发现一种高效频率转换是通过孤子与色散波效应实现的,在光纤的反常色散区,光脉冲尤其是超短脉冲是以高阶孤子的形式传输的,高阶孤子受到高阶色散扰动以及其他非线性效应的共同影响而向外辐射能量,在满足相位匹配条件的正常色散区产生色散波,色散波是超连续谱展宽的主要物理机制之一,可应用于波长转换,具备转换带宽宽、效率高等优点.色散波的产生极大地丰富了非线性光纤光学领域,通过对常见波段的激光进行频率变换,可获得宽波段、可调谐的激光光源^[9].

2002 年 HERRMANN J 等出色散波孤子分裂促进了 PCF 超连续谱的展宽^[10].2003 年 TARTARA L 等获得了 10 nm 带宽、转换效率仅为 24% 的色散波^[11].2008 年苑金辉等通过脉宽为 120 fs 的激光器泵浦单零色散 PCF 得到反斯托克斯波带宽为 54 nm,转换效率达到了 80%^[12].2012 年,赵兴涛等把超短脉冲耦合进 PCF 包层 3 个空气孔之间的节区得到了可见光及红外大于 300 nm 的宽带色散波^[13].2015 年陈其杰采用中心波长为 1032 nm、脉宽为 140 fs 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^[14].目前在光纤非线性频率转换实验中,大多使用纤芯面积较大的单零色散 PCF,对于双零色散光纤产生红移色散波的研究相对较少.具有双零色散波长的 PCF 相对于单零色散 PCF 在高效频率转换方面具有更加明显的优势,且转换效率更高、谱带稳定而平滑.基于 PCF 的灵活结构设计,制备双零色散高非线性 PCF,可实现宽带色散波调谐,对高效宽带频率变换具有重要研究意义^[15].

本文利用脉宽为 120 fs、重复频率为 76 MHz 的 Ti 宝石飞秒激光在 PCF 反常色散区泵浦,实验得到了高效蓝移色散波和宽带红移色散波,找到了色散波随功率的变化规律.同时分析了双零色散光纤两个波段色散波产生的相位匹配条件,论证高效宽带光谱产生的物理机理.

1 理论基础与计算

PCF 的色散公式为

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

式中, c 为光真空中的传播速度, λ 为波长, n_{eff} 指光纤在波长为 λ 时基膜的有效折射率实部.

PCF 的有效模场面积和非线性系数的推导公式为

$$A_{\text{eff}} = \left\{ \iint_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right\}^2 / \iint_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^4 dx dy \quad (2)$$

$$\gamma = 2\pi n_2 \lambda^{-1} A_{\text{eff}}^{-1} \quad (3)$$

式中, $F(x, y)$ 指横向电场分布, $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$,表示石英非线性折射率系数.

实验所用 PCF 为 NKT 公司产品 NL-PM-750,端面结构如图 1 所示,通过在高倍显微镜下测量得到孔间距为 1.24 μm ,空气孔直径为 0.82 μm ,利用有限元方法计算 PCF 的色散、模场面积、非线性系数随波长的变化,如图 2、3.双零色散波长分别为 0.72 μm 和 1.35 μm ,双零色散特性为两个波段宽带色散波的产生提供了条件.有效模式面积伴随波长

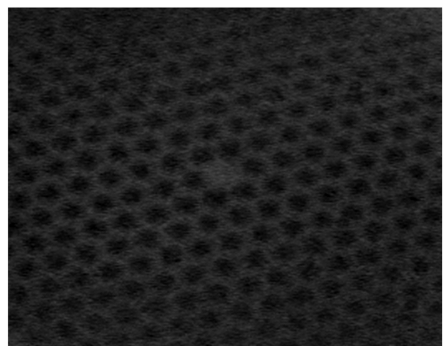


图 1 PCF 端面图
Fig.1 Cross-section of PCF

的增大而逐渐增大^[16],光纤对长波段的光限制能力减弱,非线性系数与波长 λ 成反比关系.在泵浦波长为800 nm处,光纤的纤芯面积很小,模场面积仅 $3.19 \mu\text{m}^2$,有利于增大光场的能量密度;在泵浦波长800 nm处非线性系数为 $0.079 \text{ m}^{-1} \text{ W}^{-1}$,有极强的非线性,为高效、宽带频率变换非线性实验提供了条件.

色散波又可称为契伦科夫辐射,是超连续谱重要的组成部分,是由于PCF反常色散区的高阶孤子受到了高阶色散、喇曼散射扰动以及其他非线性效应的多种影响,在满足相位匹配的正常色散区产生的.色散波的中心波长相对于孤子的中心波长不仅能够向长波段红移,还能向短波段蓝移,它的产生很大程度上促进了超连续谱的展宽.光纤中传输的光孤子能量转移到色散波满足的相位匹配公式为^[13]

$$\Delta\beta = \beta(\omega_p) - \beta(\omega_{\text{DW}}) = (1 - f_R)\gamma(\omega_p)P_p - \sum_{n \geq 2} \frac{(\omega_{\text{DW}} - \omega_p)^n}{n!} \beta_n(\omega_p) = 0 \quad (4)$$

式中, $\beta(\omega_p)$ 和 $\beta(\omega_{\text{DW}})$ 分别是泵浦光和色散波中心波长的传播常数, γ 是光纤的非线性系数, $\beta_n(\omega_p)$ 是在 ω_p 附近泰勒级数的 n 次项, f_R 是喇曼延时响应, P_p 是光孤子的峰值功率.当光孤子与色散波具有相等的传播常数时,达到相位匹配,在相位匹配条件下可得孤子在低零色散波长附近辐射出蓝移色散波;对于本文采用的双零色散PCF(如图2),当孤子红移至高零色散波长附近时则辐射出红移色散波.根据图2及图3计算的色散及非线性参数,代入式(4),可计算出色散波中心波长随传输孤子波长的变化情况,如图4.说明此波段的光孤子能在 $0.55 \mu\text{m}$ 及 $1.5 \mu\text{m}$ 波段分别产生相位匹配的蓝移及红移色散波^[17].

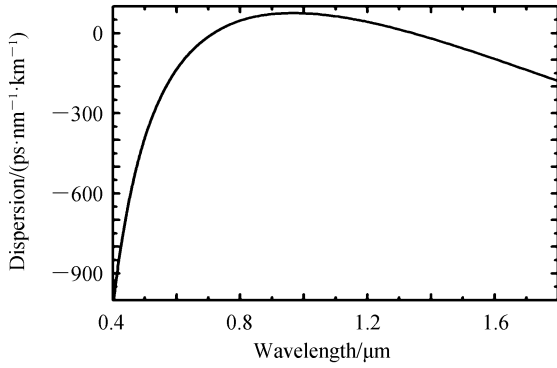


图2 色散随波长的变化

Fig.2 Variation of dispersion with wavelength

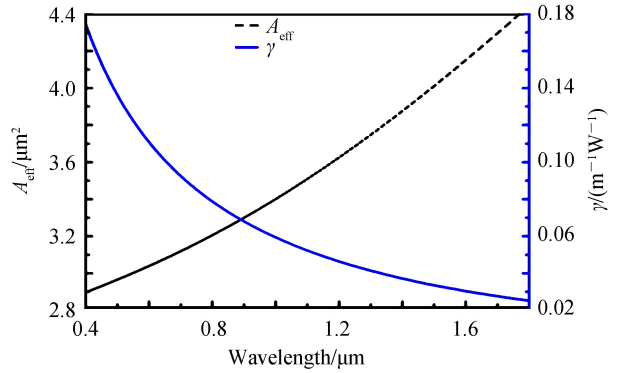


图3 模场面积与非线性系数随波长的变化

Fig.3 Variation of mode field area and nonlinear coefficient with wavelength

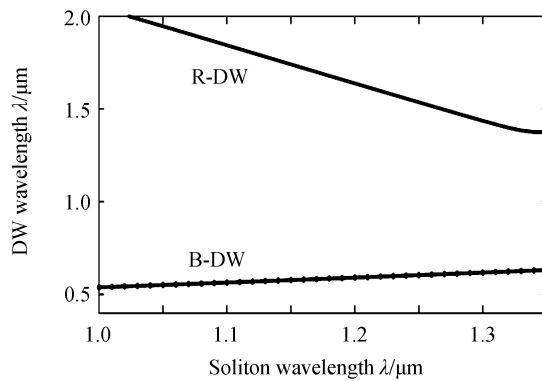


图4 色散波的中心波长随传输孤子波长的变化

Fig.4 Variation of central wavelength of dispersive waves with propagation soliton wavelength

2 实验系统

实验装置如图5所示,光源为中心波长在760~980 nm可调的Ti宝石飞秒激光器,脉宽为120 fs,重复频率为76 MHz,输出脉冲波形为双曲正割型.飞秒激光经隔离器、可调衰减片、半波片和 $40\times$ 透镜耦合到1.5 m长的PCF纤芯.衰减片用来调控入射光束能量,并用功率计测定入射功率.半波片用来控制入射光的偏振方向.采用光纤光谱分析仪和功率计监控耦合输入输出情况,输出光经半透半反射镜一束进入CCD,用于观测入射光斑位置,确保光束耦合进光纤纤芯传光.另一束进入光谱分析仪(Avaspec-256 测量波长范围是

200~1100 nm 和 Avaspec-NIR-256 测量范围 900~2500 nm) 进行光谱测量。

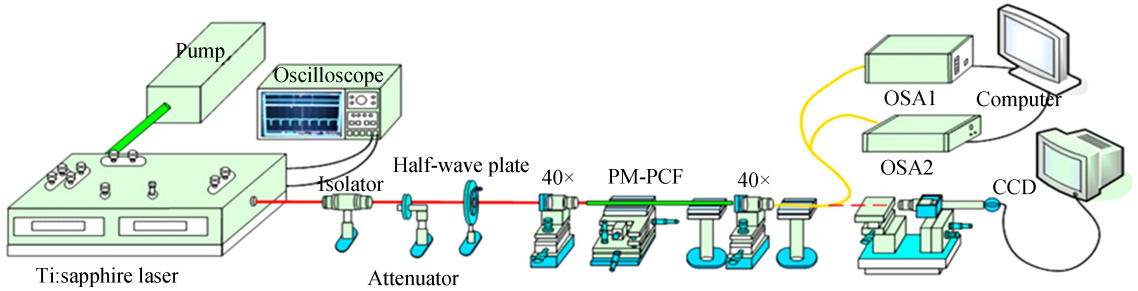


图5 实验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of experimental device

3 实验结果与分析

高功率的飞秒脉冲经高非线性 PCF 产生丰富的非线性光谱如图 6 所示,输出光包含多种光谱成分,对应不同的非线性效应,分别为可见光区的蓝移色散波、泵浦波长附近的残余抽运光、近红外长波段的孤子与红移色散波.对特定模式而言,当泵浦脉冲工作在不同色散区时,所涉及的非线性效应也不相同.频谱展宽初期源于自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM);在光纤零色散波长附近的反常色散区,由于受到 SPM、反常色散共同影响形成高阶孤子(Higher-Order Soliton, HOS),而传输过程中,高阶孤子裂变和色散波的产生是导致频谱展宽的主要原因.在受激喇曼散射、自陡峭以及高阶色散的扰动下, N 阶孤子裂变为 N 个具有不同中心波长的基孤子,基态孤子也会在孤子自频移(Soliton Self-Frequency Shift, SSFS)的作用下频率不断下移,频谱进一步展宽,每个基孤子会在短波段和长波段的正常色散区产生满足波矢匹配的色散波,随着泵浦功率的增长,高阶孤子的裂变以及色散波所引起的频谱效应越发显著^[18].

3.1 不同功率下的宽带蓝移和红移色散波

当中心波长为 800 nm,抽运功率从 0.2 W 向 0.68 W 不断增加时,随功率变化的 PCF 输出光谱如图 7 所示,在 520 nm 附近产生了很强的蓝移色散波(Blue shift Dispersive Waves, B-DW),当脉冲的平均功率从 0.2 W 向 0.68 W 增加时,蓝移色散波信号输出的能量提高了近 9 倍,转换效率非常高.根据薛定谔归一化方程的参量变化可知,功率与孤子阶数相关,随着脉冲峰值功率的增加,孤子阶数逐渐升高,所以可根据光纤长度来论证泵浦脉冲功率对色散波能量转移的情况.由于实验所用的 PCF 的非线性系数很高(如图 3),且随泵浦脉冲的功率逐渐增大,获得基态孤子所需要的光纤长度越短,证明蓝移色散波的转换效率也越来越高^[19].更高功率下孤子会构成更强的势场,对蓝移色散波的俘获能力更强,增加的抽运功率更多地转移给与红移孤子相匹配的蓝移色散波,蓝移色散波的转换效率变高^[20].

由于实验所用的光纤具有两个零色散波长(如图 2),所以不仅得到了蓝移色散波,还得到了长波段正常色散区的红移色散波.随着功率从 0.2 W 到 0.68 W 的增加,红移色散波小幅度红移,从 1 419 nm 移动到 1 452 nm,峰值功率强度增强,相对光强从 4 625 增加到 27 933(此为光谱仪测量值,图 7 纵坐标为取对数后的值).蓝移色散波向短波方向几乎没有移动,但峰值强度骤然增强,从 6 829 增加到 61 826,增幅明显.无论是蓝移色散波还是红移色散波,都是反常色散区的孤子分别向两个正常色散区进行能量转换的一种非线性现象.实验所得蓝移色散波和红移色散波满足图 4 中理论分析的色散波产生的相位匹配条件,理论与实验结果一致,阐明了宽带非线性光谱产生的物理机理.

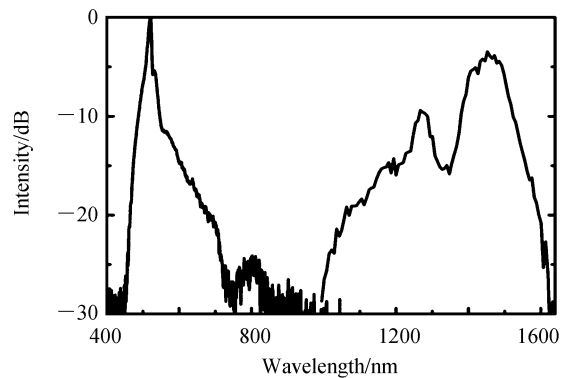


图6 800 nm 泵浦波长下的输出光谱

Fig.6 Output spectra at 800 nm wavelength

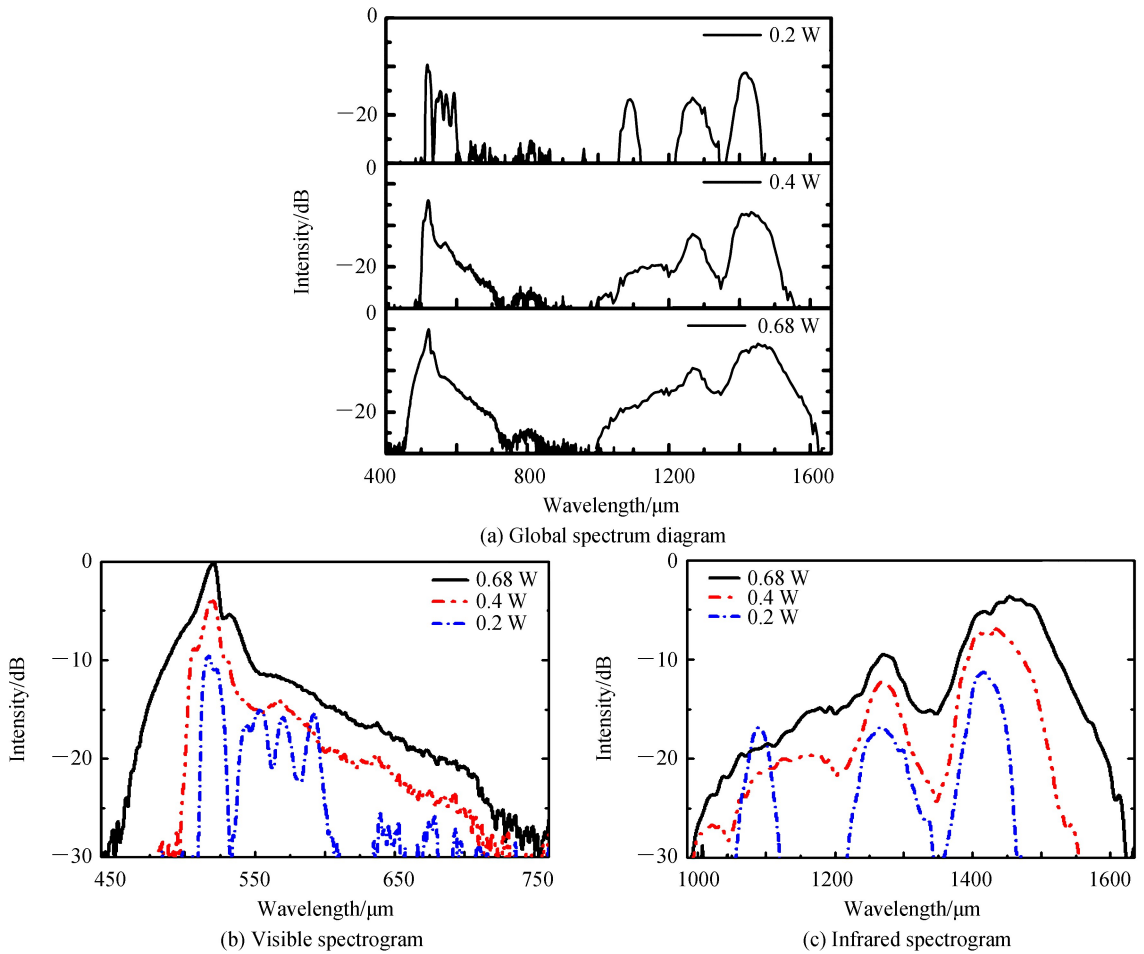


图7 800 nm 波长下随功率增大的输出光谱
Fig.7 Output spectra with increasing power at 800 nm wavelength

3.2 宽带蓝移和红移色散波

当泵浦光中心波长为 800 nm, 抽运功率从 0.2 W 到 0.68 W 增加时, 蓝移色散波、红移色散波 30 dB 带宽的变化情况如图 8 所示. 从图中可以看到, 随功率增加, 蓝移色散波带宽从 97 nm 增加到 309 nm, 红移色散波带宽从 103 nm 增加到 278 nm, 并与孤子光谱相连, 形成宽带超连续谱, 带宽达到了 628 nm, 再次证实了增加功率有利于色散波带宽的增加. 随着功率的增加, 光孤子向长波方向移动受到喇曼频移作用减弱以及零色散附近对孤子频谱的反冲, 色散波的带宽大幅增加, 这是因为在较大功率下残余泵浦剩余很少, 增加的功率几乎全部转化为色散波的能量.

3.3 高效频率转换

泵浦波长为 800 nm, 功率从 0.2 W 到 0.68 W 增加时, 蓝移色散波、红移色散波分别与残余泵浦输出功率之比如图 9 所示, 分别用 η_{B-DW} 、 η_{R-DW} 表示. 其中 $\eta_{B-DW} = P_{B-DW}/P_{RP}$, $\eta_{R-DW} = P_{R-DW}/P_{RP}$, P_{B-DW} 表示蓝移色散波输出功率, P_{R-DW} 表示红移色散波输出功率, P_{RP} 表示残余泵浦的输出功率. 从图 9 可以发现随着泵浦功率的增加, η_{B-DW} 、 η_{R-DW} 具有一致增大的趋势, 意味着增加的泵浦能量大部分转移给了蓝移色散波和红移色散波. 在功率为 0.68 W 时, η_{B-DW} 、 η_{R-DW} 的值分别大于 257、116, 光谱转换效率极高, 达到 99.6%, 远高于文献[12]中

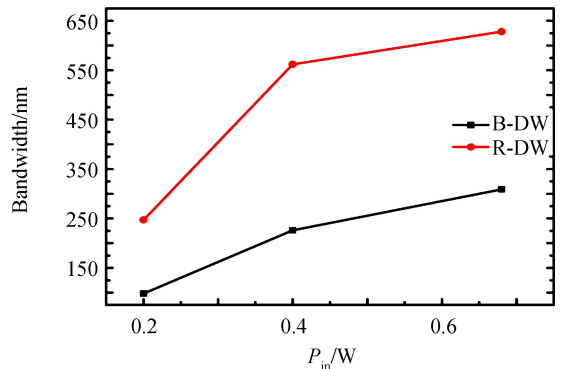


图8 泵浦波长 800 nm 下, 抽运功率从 0.2 W 增加到 0.68 W 时色散波的带宽
Fig.8 Bandwidth of dispersive waves with pump power increases from 0.2 W to 0.68 W at pump wavelength of 800 nm

的转化效率.随着功率的增加,转化效率具有一致增大的趋势,这是由于泵浦功率逐渐增长,处于反常色散区的自频移孤子能高效俘获具有相同群速度的蓝移辐射和红移辐射,从而实现了高效的色散波转换.

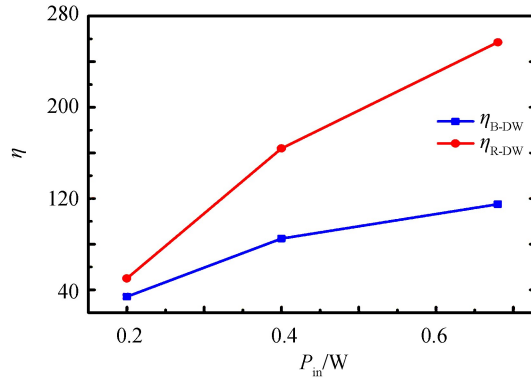


图9 泵浦波长为 800 nm,蓝移和红移色散波与残余泵浦的输出功率比随抽运功率增大的变化情况

Fig.9 Ratio of blue-shift dispersive waves and redshift dispersive waves to residual pump power with increasing of pump power at pump wavelength of 800 nm

4 结论

使用脉宽为 120 fs 的钛宝石飞秒激光泵浦高非线性双零色散 PCF 产生了高效蓝移色散波和宽带红移色散波,实验结果与相位匹配理论分析一致,阐明了非线性光谱产生的物理机理.分析发现随泵浦功率从 0.2 W 到 0.68 W 增大,蓝移色散波的带宽从 97 nm 增加到了 309 nm,孤子波和红移色散波的带宽从 251 nm 增加到了 627 nm.在功率为 0.68 W 的条件下,蓝移色散波和红移色散波与残余泵浦功率的输出功率比 η_{B-DW} 、 η_{R-DW} 分别达到了 257、116,光谱能量转换效率达 99.6% 以上,残余泵浦能量剩余不足 1%,从而真正实现了宽带高效色散波频率转换.光纤非线性效应过程的实现与超短脉冲的宽度、峰值功率、泵浦波长以及 PCF 结构参数、传输特性都有关系,是多种因素综合作用的结果.在光纤的基模中采用大功率的泵浦,优化双零色散波长,可获得高效的色散波信号,为宽带光源及波长变换器件的研究奠定了基础.

参考文献

- [1] RUSSELL P. Photonic crystal fibers.[J]. *Science*, 2003, **299**(5605):358-362.
- [2] WANG Wei, HOU Lan-tian, LU Ming, *et al.* Design of double cladding nearly zero dispersion flattened nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(11):114205-114209.
- [3] KNIGHT J C, St RUSSELL P J. Applied optics: New ways to guide light[J]. *Science*, 2002, **296**(5566):276-277.
- [4] LI Yan-feng, HU Ming-lie, WANG Qing-yue. Calculation and design of photonic crystal fibers with zero-dispersion wavelength at 800 nm[J]. *Chinese Journal Lasers*, 2003, **30**(5):427-430.
栗岩峰,胡明列,王清月. 800 nm 处为零色散的光子晶体光纤的计算与设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5):427-430.
- [5] KOEFOED J G, FRIIS S M M, CHRISTENSEN J B, *et al.* Spectrally pure heralded single photons by spontaneous four-wave mixing in a fiber: reducing impact of dispersion fluctuations.[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(17):20835-20849.
- [6] LIU Jie, YANG Chang-xi, GU C, *et al.* A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1569-1574.
刘洁,杨昌喜, GU C, 等.一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1569-1574.
- [7] WANG Qing-yue, HU Ming-lie, CHAI Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese Journal Lasers*, 2006, **33**(1):57-66.
王清月,胡明列,柴路.光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):57-66.
- [8] LIU Zhao-lun, ZHOU Gui-yao, HOU Lan-tian. Study on the photonic bandgaps of hollow-core microstructured fibers [J]. *Chinese Optics Letter*, 2006, **4**(10):566-568.
- [9] BILLET M, BRAUD F, BENDAH MANE A, *et al.* Emission of multiple dispersive waves from a single Raman-shifting soliton in an axially-varying optical fiber[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(21):25673-25678.
- [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):173901-173916.
- [11] TARTARA L, CRISTIANI, 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] YUAN Jin-hui, HOU Lan-tian, ZHOU Gui-yao, *et al.* Anti-Stokes phenomenon in photonic crystal fiber [J]. *Chinese*

Journal of Lasers, 2008, **35**(12):1935-1939.

苑金辉,侯蓝田,周桂耀,等.光子晶体光纤中的反斯托克斯现象的研究[J].中国激光,2008,**35**(12):1935-1939.

- [13] 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*, 2013, **62**(6):272-276.
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[J].物理学报,2013,**62**(6):272-276.
- [14] 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*, 2015, **64**(3): 034215.
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[J],物理学报,2015,**64**(3):034215.
- [15] SHEN Xiang-wei, YU Chong-xiu, SANG Xin-zhu, *et al.* High efficient anti-Stokes signal conversion in photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(4):216-222.
申向伟,余重秀,桑新柱,等.光子晶体光纤中高效的反斯托克斯信号产生[J].物理学报,2012,**61**(4):216-222.
- [16] YUAN Jin-hui, HOU Lan-tian, WEI Dong-bin, *et al.* Fabrication and investigation of photonic crystal fiber with flattened dispersion and high nonlinearity[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(3):270-274.
苑金辉,侯蓝田,魏东宾,等.平坦色散高非线性光子晶体光纤的研究与制备[J].激光与红外,2008,**38**(3):270-274.
- [17] CHENG T, TUAN T H, XUE X, *et al.* Experimental observation of multiple dispersive waves emitted by multiple mid-infrared solitons in a birefringence tellurite microstructured optical fiber[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(16):20647-20654.
- [18] 申向伟.高非线性光纤与硅波导若干特性及其应用的研究[D].北京:北京邮电大学,2012.
- [19] ZHANG Shu-min, LV Fu-yun, DONG Fa-jie, *et al.* Enhanced compression of higher order femtosecond soliton in fibers with slowly decreasing dispersion.[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1360-1363.
张书敏,吕福云,董法杰,等.色散缓变光纤中飞秒高阶孤子脉冲的增强压缩[J].光子学报,2004,**33**(11):1360-1363.
- [20] WRIGHT L G, RENNINGER W H, CHRISTODOULIDES D N, *et al.* Spatiotemporal dynamics of multimode optical solitons [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(3):3492-3506.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.61405172), the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2018203346), the National Basic Research Program of China (No. 2010CB327604)

引用格式:ZHAO Xing-tao, JIANG Guo-hui, CHENG Ji-rui, *et al.* Visible and Infrared Broadband High Efficiency Dispersion Wave in Photonic Crystal Fiber with Two Zero Dispersion Wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11):1106004

赵兴涛,蒋国辉,程吉瑞,等.双零色散光子晶体光纤中可见及红外宽带高效色散波[J].光子学报,2018,**47**(11):1106004