

在单零色散微结构光纤中一次抽运同时发生两组四波混频的实验观察

李建设 李曙光 赵原源 刘强 范振凯 王光耀

Experimental studies of two sets of four-wave mixing processes in a single-zero-dispersion microstructured fiber by the same pump

Li Jian-She Li Shu-Guang Zhao Yuan-Yuan Liu Qiang Fan Zhen-Kai Wang Guang-Yao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 214201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.214201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高效频率转换下双波长外腔共振和频技术研究

Double resonant sum-frequency generation in an external-cavity under high-efficiency frequency conversion

物理学报.2016, 65(7): 074202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074202>

新型偶氮苯衍生物的三阶非线性光学特性

Third-order nonlinear optical properties of an azobenzene derivate

物理学报.2016, 65(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024207>

周期量级飞秒脉冲电场在非线性克尔介质中的传输

Propagation of electric field of the few-cycle femtosecond pulse in nonlinear Kerr medium

物理学报.2016, 65(1): 014208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014208>

铷原子耦合光频率近共振时的电磁感应透明

Electromagnetically induced transparency in a near-resonance coupling field

物理学报.2015, 64(15): 154208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154208>

基于数字相干叠加的相干光正交频分复用系统中光纤非线性容忍性研究

Fiber nonlinearity tolerance research of coherent optical orthogonal frequency division multiplexed system based on digital coherent superposition

物理学报.2015, 64(14): 144203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144203>

在单零色散微结构光纤中一次抽运同时发生两组四波混频的实验观察*

李建设 李曙光[†] 赵原源 刘强 范振凯 王光耀

(燕山大学理学院, 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2016年6月15日收到; 2016年7月6日收到修改稿)

采用可以减小纤芯面积的小气孔设计方案巧妙设计并成功拉制了一根高非线性的单零色散微结构光纤. 利用有限元法模拟并计算得到了该光纤的基模有效折射率、色散系数和非线性系数等基本属性随波长的变化关系, 然后利用四波混频的有效相位失配方程模拟了其相位失配曲线. 模拟表明, 在该光纤中可以同时发生两组四波混频. 在位于微结构光纤的正常色散区的 0.800, 0.810 和 0.820 μm 三个波长处, 分别采用不同的功率抽运, 在实验上都非常明显地观察到了分列于抽运波长两侧的两个增益波带的产生. 经与相位失配曲线比较, 发现它们满足相位匹配条件, 从而证明了两组四波混频过程的同时发生. 实验结果与理论预言符合得很好. 发生在正常色散区的四波混频效应的产生可归结于负的四阶色散对相位匹配过程的贡献. 本文研究可对微结构光纤的结构设计和基于四波混频的多波长转移技术的发展提供经验与借鉴, 同时也对非常见波段激光器和宽带光源的开发具有参考意义.

关键词: 微结构光纤, 四波混频, 相位匹配, 波长转换

PACS: 42.65.-k, 42.65.Hw, 42.81.Cn, 78.47.nj

DOI: 10.7498/aps.65.214201

1 引言

微结构光纤 (microstructured fiber, MOF), 又称多孔光纤, 有时亦称光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF). 在光纤基底材料确定的情况下, 由于 MOF 灵活的多孔结构设计可以方便地调整其包层与纤芯的折射率差, 从而很容易将纤芯的有效模场限制到很小的面积, 这样就可以人为干预并调整光纤的非线性系数到很高的水平, 因此可以说, MOF 是发生四波混频 (four wave-mixing, FWM)、自相位调制 (self-phase modulation, SPM)、交叉相位调制 (cross-phase modulation, XPM) 和受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 等非线性效应的理想载体.

FWM 作为一种典型的非线性效应和高效的光谱展宽手段, 其在波长转换^[1-4]、光通信^[5,6]、可调谐宽带光源及激光器研制等^[7,8] 方面都得到了广泛的研究与应用. 由于 FWM 不能像 SRS 的相位匹配那样由光纤主动参与并自动满足, 其匹配过程一般都比较苛刻, 所以在常见情况下, 一次抽运一般只发生一组由 FWM 引起的参量增益过程, 并产生一对信号波和闲频波. 但早在 2003 年, Reeves 等在《Nature》上就理论预言了在 PCF 中是可以同时发生两组参量增益过程并产生两对信号波和闲频波的^[9], 但一直没有相关实验来验证, 直到 2013 年 Zhang 等在双零色散的 PCF 中成功观察到了两对信号波和闲频波的产生^[10]. 本实验中, 我们在一根单零色散 MOF 中也成功观察到了这种现象.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178026, 61475134, 61505175)、河北省自然科学基金 (批准号: E2012203035) 和燕山大学博士基金 (批准号: B1004) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn

2 结构设计和基本理论

2.1 光纤的结构设计

为了获得较大的非线性,我们在设计光纤时将纤芯面积设计得很小,在 $0.8 \mu\text{m}$ 附近基模的有效模场面积大小只有 $4.4 \mu\text{m}^2$ 左右,这为 FWM 双参量增益的发生提供了重要保障.本光纤为实验室自行设计并拉制,其截面图如图 1 所示.具体的结构参数如下:七层圆形空气孔组成了光纤包层,其中每层气孔呈正六边形排布,空气孔半径 $r = 1.03 \mu\text{m}$,空气孔节距(相邻空气孔的中心间距) $\Lambda = 2.5 \mu\text{m}$,光纤的基底材料为石英.

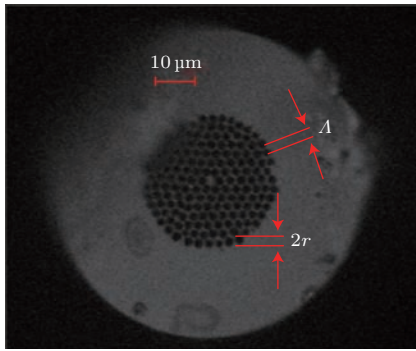


图 1 (网刊彩色) 空气孔半径 $r = 1.03 \mu\text{m}$, 空气孔节距 $\Lambda = 2.5 \mu\text{m}$ 的光纤截面
Fig. 1. (color online) The cross-section of MOF used in the experiment with parameters $\Lambda = 2.5 \mu\text{m}$ and $r = 1.03 \mu\text{m}$.

2.2 光纤特性模拟

光纤基模的有效折射率随波长的变化关系由有限元法^[11,12]模拟获得,在模拟时已考虑了石英的材料色散.石英的材料折射率由 Sellmeier 公式^[13]给出:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \sum_{j=1}^3 \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2}}, \quad (1)$$

式中, $n(\lambda)$ 表示在波长 λ 处的材料折射率, $B_1 = 0.6961663$, $B_2 = 0.4079426$, $B_3 = 0.8974794$, $\lambda_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 9.896161 \mu\text{m}$. (1) 式中 λ 单位为 μm .

MOF 的色散系数 D 的计算公式为^[14]

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

式中, c 为光在真空中的传播速度, λ 为波长, n_{eff} 为基模的有效折射率, Re 为实部.

光纤的 q 阶色散的计算公式为

$$\beta_{(q)} = \left(\frac{d^q \beta}{d\omega^q} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (q = 0, 1, 2, \dots), \quad (3)$$

式中, β 为模传输常数, q 为色散阶数, ω 为频率, ω_0 为操作波长处的脉冲频谱的中心频率.

光纤的非线性系数 γ 定义^[15]为

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

式中, n_2 为石英的非线性折射率系数, 取 $3.2 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ ^[16]; λ 为操作波长; A_{eff} ^[17] 为光场的有效模场面积.

利用上述公式可求解得到光纤在基模模式下传输时的色散系数 D 和二阶色散参量 $\beta_{(2)}$ (图 2) 以及非线性系数 γ 和四阶色散参量 $\beta_{(4)}$ (图 3) 随波长的变化关系曲线. 图 2 表明该光纤在研究波段内仅有一个零色散波长点, 其大小在 $\lambda_D = 0.85 \mu\text{m}$ 附近. 图 3 的模拟显示, 在 $0.85 \mu\text{m}$ 附近非线性系数达到了 $0.053 \text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 在波长 $0.80 \mu\text{m}$ 附近非线性系数达到了 $0.057 \text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 可见整个实验波段光纤的非线性系数都很高, 光纤设计实现了预期目标. 图 3 内插图为波长在 $0.80-1.4 \mu\text{m}$ 区间上四阶色散 $\beta_{(4)}$ 随波长的变化放大图, 可以看出, 在该波长范围内, 四阶色散都小于零. 负的四阶色散将对发生在正常色散区的 FWM 的相位匹配条件满足具有显著作用^[18,19].

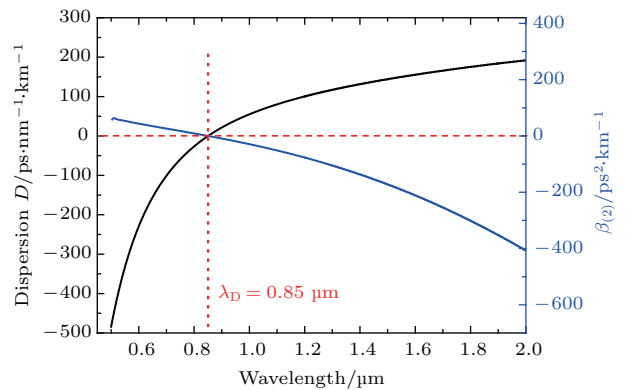


图 2 (网刊彩色) 色散系数 D 和二阶色散 $\beta_{(2)}$ 随波长的变化
Fig. 2. (color online) Dispersion parameter D and second-order dispersion $\beta_{(2)}$ as a function of wavelength.

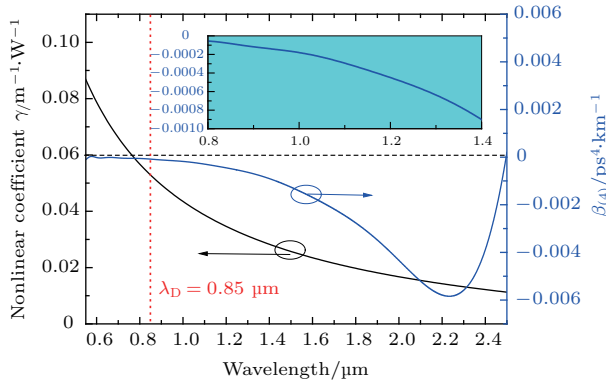


图3 (网刊彩色) 非线性系数 γ 和四阶色散 $\beta_{(4)}$ 随波长的变化, 插图为四阶色散的局部放大曲线

Fig. 3. (color online) Nonlinear coefficient γ and fourth-order dispersion $\beta_{(4)}$ as a function of wavelength. The illustration is local magnification of the fourth-order dispersion curve.

3 测量光路设计

测量光路的系统框图如图4所示. 选用钛宝石飞秒激光器 Mira900 作为抽运源, 其波长可以在 700—980 nm 范围内调节, 脉冲的半高全宽为 120 fs, 重复频率为 76 MHz, 波形为双曲正割型. 脉冲经过可连续进行光强控制的光衰减片, 然后经过一个 40× 的数值孔径为 0.65 的普通显微物镜, 将光耦合进入 0.96 m 长的待测 MOF. 光耦合过程中光纤的端头方向主要通过五维调整架来控制, 在待测光纤的出射端亦用微调架来进行光纤输出端固定及光输出方向的微调. 在实验中, 还通过实验室自制的简易近场光斑成像分析系统来实时观察光耦合情况, 以保证光在光纤中以基模模式在纤芯中传输. 可见光波段和红外波段的光谱分别采用波长测试范围为 200—1100 nm 的 Avaspec-2048-USB2 型和测试范围为 900—2500 nm 的 Avaspec-IR256-NIR-2.5 型光谱分析仪测量.

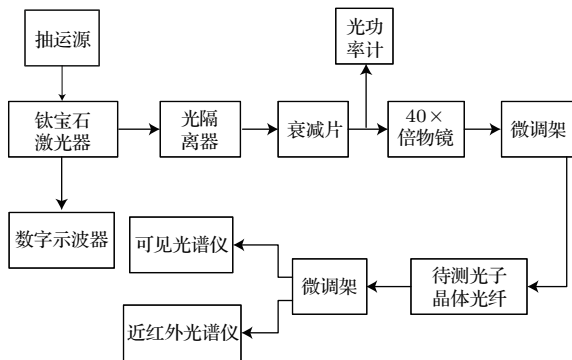


图4 实验测量光路

Fig. 4. The experimental schematic diagram.

4 实验结果与特点分析

实验条件分别设置为: 1) 抽运波长在 0.800 μm , 抽运平均功率分别设置为 0.68, 0.66, 0.64 和 0.63 W; 2) 抽运波长在 0.810 μm , 抽运平均功率分别设置为 0.63 和 0.60 W; 3) 抽运波长在 0.820 μm , 抽运平均功率设置为 0.63 W.

在条件 1) 下, 测量获得的光谱如图 5 所示. 图 5 显示, 不管抽运功率如何变化, 在不同抽运条件下所获得的输出谱位置大致保持不变, 尤其是增益峰的中心波长在 0.5, 0.7, 1.2 和 2.1 μm 附近的增益波带的范围基本没有变化, 只是峰的强度和位置略有变化, 这说明在条件 1) 下的光纤中发生的非线性效应非常稳定, 且中心波长在 0.5 和 2.1 μm 的一对增益峰的强度始终大于在同等抽运条件下的中心波长在 0.7 和 1.2 μm 的一对增益峰, 两对增益峰都随抽运功率的增大而增大.

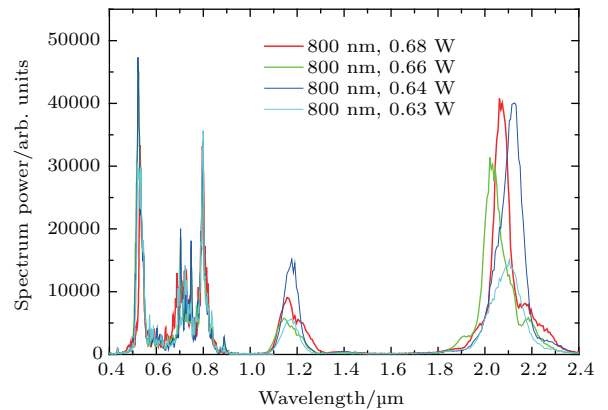


图5 (网刊彩色) 抽运波长在 0.800 μm , 抽运平均功率分别为 0.68, 0.66, 0.64 和 0.63 W 时的输出光谱

Fig. 5. (color online) The experimental output spectra with the pump laser operating of 0.800 μm and an average input power of 0.68, 0.66, 0.64, and 0.63 W, respectively.

在条件 2) 下, 测量获得的光谱如图 6 所示, 图 6 反映的规律与图 5 基本一致, 四个增益峰分处抽运残余能量峰 C 的两侧, 只是抽运功率对所产生的谱带宽度影响比较大, 功率降低, 谱带宽度也相应减小, 但增益峰的中心波长位置则基本没变. 这对波长转换的应用是大有裨益的, 因为在 0.81 μm 波长下抽运, 由波长转换产生的增益峰波长稳定, 而抽运功率的调节则可以实现对光输出强度的调制.

在条件 3) 下, 测量获得的光谱如图 7 的下半部分所示. 图 7 显示, 在抽运残余能量峰 C 的两

侧也分别产生了A, B, D和E四个增益峰, 相对于图5和图6, 此处短波区生成的A增益带由紧邻的三个波峰组成. 而且抽运残余能量峰C不光滑的特征明显, 也大致有三个峰组成, 并且左右两个峰对称分布于主峰两侧, 这是典型的SPM的作用效果.

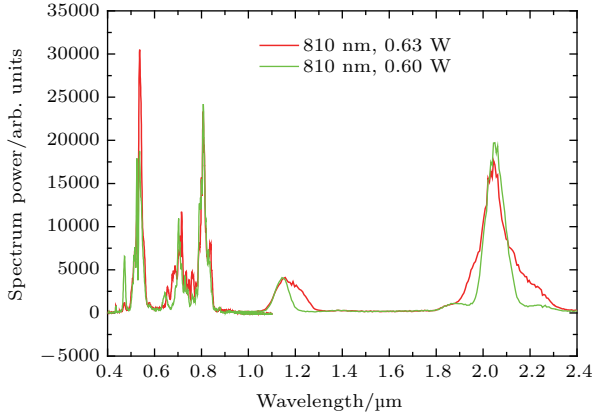


图6 (网刊彩色) 抽运波长在0.810 μm, 抽运平均功率分别为0.63和0.60 W时的输出光谱
Fig. 6. (color online) The experimental output spectra with the pump laser operating of 0.810 μm and an average input power of 0.63 and 0.60 W, respectively.

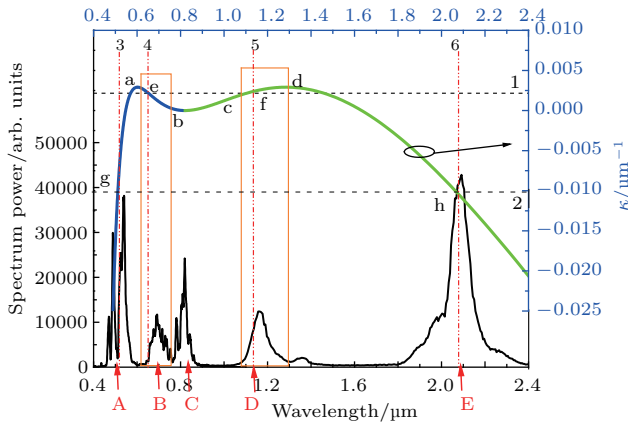


图7 (网刊彩色) 下半部分为抽运波长在0.820 μm, 抽运平均功率为0.63 W时的输出光谱; 上半部分为在同一抽运条件下有效相位失配k随波长的变化关系
Fig. 7. (color online) The output spectrum at pump wavelength of 0.820 μm and the average pump power of 0.63 W for the lower half of the graph. The change of effective phase mismatch k with wavelength under the same conditions of pump for the upper half of the graph.

研究表明, 在图5—图7的输出谱中出现的位于抽运残余峰两侧四个增益带可解释为由四波混频效应产生的信号波和闲频波, 下面将通过数值仿真来理论证明并详细解释这一现象的产生原因.

5 四波混频的相位匹配计算

四波混频效应的发生需要满足相位匹配条件, 当相位匹配条件完全满足时, 信号波和闲频波将获得最大增益, 当相位匹配条件非完全满足时也会产生参量增益, 形成分列于抽运波长两侧的信号波和闲频波增益带, 参量增益带的大小可以通过理论来模拟获得^[20-22]. 相位匹配条件的满足程度可以通过下式来描述^[23]:

$$k = \Delta\beta + 2\gamma P_0, \quad (5)$$

(5)式中, k 为有效相位失配项, k 为不同值表示此时相位匹配条件能满足的程度不同, 其取值范围为 $-2\gamma P_0 \leq k \leq 2\gamma P_0$; $\Delta\beta = \beta_s + \beta_a - 2\beta_p$ 为线性相位失配(或者传输常数差)项, 其中 β_s, β_a 和 β_p 分别为信号波、闲频波和抽运波长处的传播常数; $2\gamma P_0$ 为非线性相位失配项, 其中 γ 为非线性系数, P_0 为抽运光的峰值功率. 当 $k = 0$ 或者 $\Delta\beta = -2\gamma P_0$ 时, 在该处将会获得最大参量增益 ($g_{\max} = \gamma P_0$). 当考虑非线性相位失配项时, 由于SPM和XPM的非线性效应将对相位失配产生影响, 往往会导致增益峰偏离 $\Delta\beta = 0$ 的位置, 而最终出现在 $\Delta\beta = -2\gamma P_0$ 的位置. $\Delta\beta$ 的取值范围为 $0 > \Delta\beta > -4\gamma P_0$.

利用(5)式, 我们模拟了抽运波长在0.820 μm, 抽运平均功率为0.63 W时的有效相位失配曲线, 如图7的上半部分所示, 其中绿色曲线代表在发生FWM时某一相位失配量与在该条件下所产生的信号波波长之间的对应关系, 而蓝色曲线则代表与闲频波波长的对应关系. 从图7的实验光谱与失配曲线的对应关系可见, 实验中确实发生了两组FWM, 并产生了两对信号和闲频的参量增益波带. 其中第一组FWM过程产生了最外侧的增益带A和E, 它们的中心位置与失配曲线的交点(g和h)连线组成了图中垂直于纵轴的直线2, 所对应的纵坐标值大约为 $-0.01 \mu\text{m}^{-1}$; 第二组FWM过程产生了中间的增益带, 在图7可以看出, 代表B和D增益带宽度的两个橙色矩形框与闲频波和信号波曲线分别相交于a和b点以及c和d点. 由曲线可知两个矩形框内的两段曲线均单调变化, 因此当画一条类似直线2的水平线1, 然后让线1沿纵轴进行上下扫描时, 只要在两个矩形框划定的波长范围内能够存在与失配曲线同时相交的情况, 就可以说明

矩形框所代表的这两个增益带是由满足相位匹配条件而发生的FWM产生的,且分别对应于同一组FWM产生的闲频波和信号波带.图7中直线1在矩形框范围内存在与闲频曲线的交点e和与信号曲线的交点f,直线1代表的有效相位失配量大小为 $0.0025\ \mu\text{m}^{-1}$,这说明增益带B和D也是一对由FWM产生的闲频和信号增益波带.

由图7还可以看出,直线1和2所代表的失配量都不为零,这说明在本实验中所发生的两组FWM都不满足完全相位匹配条件,但其增益带范围都完全符合理论预言.相比较而言,第一组FWM产生的外侧增益带增益更强,且实验值与理论值符合度更高;而第二组FWM过程产生的内侧增益则相对较小,在相位匹配曲线上也表现为其匹配度略低的现象.实验光谱位置和理论预言符合得很好.

此外,由图7与图6和图5的对比可见,随着抽运波长向零色散波长靠近,抽运的残余能量逐渐降低,同时由FWM生成的最外侧闲频波带的光滑程度降低,且出现了波带分裂.这些现象可以由在光纤通信系统中已被证实且被大家广泛接受的一个结论来解释,即抽运光波长越接近零色散波长,越容易发生FWM,因此当抽运光波长逐渐靠近零色散波长时,由抽运光转移到信号波和闲频波的能量比例会显著上升,这样将导致闲频波所受的SPM, XPM和SRS等非线性效应增大,从而在这些效应的共同作用下最终导致了波带的分裂(即图7的增益带A处出现了不光滑且多波峰情况).

6 结 论

本文采用减小纤芯面积的方法巧妙设计并成功拉制了一款石英基的高非线性MOF.实验研究并理论证明了在该光纤中确实同时发生了两组FWM并形成了两对信号和闲频增益波带,实验结果与理论预言也符合得很好.此处发生在正常色散区的四波混频效应的产生可归结于负的四阶色散对相位匹配过程的贡献.从图5—图7的实验表明,至少在从实验操作波长 $0.800\text{—}0.820\ \mu\text{m}$ 的抽运范围内,该光纤都同时发生了两组显著的FWM效应,同时产生了两对信号波和闲频波带,且均具有显著的波长转换能力和很高的能量转换效率.因此,本文的研究将对MOF的结构设计和基于FWM的多

波长转移技术的发展提供经验与借鉴价值,也将对非常见波段激光器和宽带光源的开发具有积极的参考意义.

参考文献

- [1] Tanemura T, Goh C S, Kikuchi K, Set S Y 2004 *IEEE. Photonic. Technol. Lett.* **16** 551
- [2] Zhang L, Yang B J, Wang Q G, He L 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 2203 (in Chinese) [张岚, 杨伯君, 王秋国, 何理 2008 光子学报 **37** 2203]
- [3] Kuang Q Q, Chen Y H, Yan A, Zhang Z X, Nie Y Y, Sang M H, Zhan L 2009 *Laser J.* **30** 36 (in Chinese) [祝庆强, 陈艳辉, 燕安, 张祖兴, 聂义友, 桑明煌, 詹黎 2009 激光杂志 **30** 36]
- [4] Zhang L, Tong T H, Sega D, Kawamura H, Deng D H, Suzuki T, Ohishi Y 2015 *Nonlinear Optics Kauai, USA*, July 26–31, 2015 NW4A.32
- [5] Liang J Q, Wang J F, Li P, Wang Y C 2013 *Chin. J. Lasers* **40** 0402009 (in Chinese) [梁俊强, 王娟芬, 李璞, 王云才 2013 中国激光 **40** 0402009]
- [6] Wang L J, Yan L S, Guo Y H, Wen K H, Chen Z Y, Pan W, Luo B 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0419002 (in Chinese) [王鲁俊, 闫连山, 郭迎辉, 温坤华, 陈智宇, 潘炜, 罗斌 2013 光学学报 **33** 0419002]
- [7] Zhang L, Tuan T H, Sega D, Kawamura H, Deng D H, Suzuki T, Ohishi Y 2015 *Opt. Express* **23** 26299
- [8] Zhang L 2014 *Ph. D. Dissertation (Beijing: Tsinghua University)* (in Chinese) [张磊 2014 博士学位论文(北京:清华大学)]
- [9] Reeves W H, Skryabin D V, Biancalana F, Knight J C, Russell P St J, Omenetto F G, Efimov A, Taylor A J 2003 *Nature* **424** 511
- [10] Zhang L, Yang S G, Han Y, Chen H W, Chen M H, Xie S Z 2013 *Opt. Commun.* **300** 22
- [11] Koshiha M, Saitoh K 2003 *Appl. Opt.* **42** 6267
- [12] Bréchet F, Marcou J, Pagnoux D, Roy P 2000 *Opt. Fiber. Technol.* **6** 181
- [13] Malitson I H 1965 *J. Opt. Soc. Am.* **A55** 1205
- [14] Lou S Q, Ren G B, Yan F P, Jian S S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1229 (in Chinese) [娄淑琴, 任国斌, 延凤平, 简水生 2005 物理学报 **54** 1229]
- [15] Kerbage C, Eggleton B 2002 *Opt. Express* **10** 246
- [16] Yang T Y, Wang E L, Jiang H M, Hu Z J, Xie K 2015 *Opt. Express* **23** 8329
- [17] Yan F P, Li Y F, Wang L, Gong T R, Liu P, Liu Y, Tao P L, Qu M X, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5735 (in Chinese) [延凤平, 李一凡, 王琳, 龚桃荣, 刘鹏, 刘洋, 陶沛琳, 曲美霞, 简水生 2008 物理学报 **57** 5735]
- [18] Harvey J D, Leonhardt R, Coen S, Wong G K L, Knight J C, Wadsworth W J, Russell P St J 2003 *Opt. Lett.* **28** 2225
- [19] Agrawal G P 2009 *Nonlinear Fiber Optics (4th Ed.)* (New York: Elsevier) pp383, 464–467
- [20] Li J S, Li S G, Zhao Y Y, Li H, Zhou G Y, Chen H L, Han X M, Liu Q, Han Y, Fan Z K, Zhang W, An G W 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 1

- [21] Liu X X, Wang S T, Zhao X T, Chen S, Zhou G Y, Wu X J, Li S G, Hou L T 2014 *Spectrosc. Spect. Anal.* **34** 1460 (in Chinese) [刘晓旭, 王书涛, 赵兴涛, 陈爽, 周桂耀, 吴希军, 李曙光, 侯蓝田 2014 光谱学与光谱分析 **34** 1460]
- [22] Zhao X T, Liu X X, Wang S T, Wang W, Han Y, Liu Z L, Li S G, Hou L T 2015 *Opt. Express* **23** 27899
- [23] Yuan J H, Sang X Z, Yu C X, Xin X J, Zhou G Y, Li S G, Hou L T 2011 *Appl. Phys. B* **104** 117

Experimental studies of two sets of four-wave mixing processes in a single-zero-dispersion microstructured fiber by the same pump*

Li Jian-She Li Shu-Guang[†] Zhao Yuan-Yuan Liu Qiang Fan Zhen-Kai Wang Guang-Yao

(State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 15 June 2016; revised manuscript received 6 July 2016)

Abstract

A highly nonlinear microstructured fiber with single-zero-dispersion wavelength is designed and drawn by reducing the core area in order to observe two groups of four-wave mixing processes by a single pump. The foundational material of the fiber is silica and its cladding is comprised of seven-layer air holes. The air holes are arranged in a hexagonal lattice and the lattice pitch is $A = 2.5 \mu\text{m}$. The radius of each of the air holes is $r = 1.03 \mu\text{m}$. There is just one zero-dispersion wavelength in our considerable wavelength range for the microstructured fiber and the corresponding wavelength λ_D is nearly $0.85 \mu\text{m}$ ($\lambda_D = 0.85 \mu\text{m}$). The basic properties of the fiber including effective refractive index, dispersion coefficient, and nonlinear coefficient are calculated by the finite element method. The effective mode area is $4.4 \mu\text{m}^2$ and the nonlinear coefficient is $0.057 \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ for the foundation mode near the wavelength of $0.8 \mu\text{m}$, and the nonlinear coefficient reaches $0.053 \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ near the zero dispersion wavelength of $0.85 \mu\text{m}$. In short, the optical fiber has a stable and high nonlinear coefficient in the whole experimental band ($0.80\text{--}0.83 \mu\text{m}$), which provides an important guarantee for the occurrence of four-wave mixing double parameter gain process. In addition, the phase mismatch curve is simulated by using the four-wave mixing phase mismatch formulation. Numerical simulation shows that two sets of four-wave mixing processes can occur in the designed fiber. At the normal dispersion wavelengths of 0.800 , 0.810 and $0.820 \mu\text{m}$ with different powers, the experimental result shows a significant feature of four gain wavebands located at both sides of the pump wavelength. By comparing experimental data with the phase mismatch curve, we find that the band generation meets four-wave mixing phase matching condition, thus, the simultaneous occurrence of two groups of four-wave mixing processes observed in the experiment is explained in theory. The experimental results are consistent well with the theoretical predictions. This also proves the theoretical predictions that two sets of parametric gain processes and two pairs of signal and idle frequency waves can be generated in PCF. The four-wave mixing effect occurring in the normal dispersion region can be attributed to the contribution of negative fourth-order dispersion to the phase matching process. The present work can provide valuable reference to designing the microstructure fibers and developing the multi-wavelength conversion technology based on four-wave mixing effect. At the same time, this work can also supply guidance for developing the uncommon waveband lasers and broadband light sources.

Keywords: microstructure fiber, four-wave mixing, phase matching, wavelength conversion

PACS: 42.65.-k, 42.65.Hw, 42.81.Cn, 78.47.nj

DOI: 10.7498/aps.65.214201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178026, 61475134, 61505175), the Nature Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. E2012203035), and the Doctoral Foundation of Yanshan University, China (Grant No. B1004).

[†] Corresponding author. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn