

一种三角形微结构光纤四波混频的研究

毕新英^{1,2,3} 王 伟^{1,2,3} 杨建菊^{1,3} 韩 颖^{1,3*} 周桂耀^{1,3} 齐跃峰^{1,3} 侯蓝田^{1,3}

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

²南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044

³河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 设计了一种三角形微结构光纤,利用全矢量有限元法对其模式特性进行了研究,发现此类光纤具有 C_{3v} 对称性,共支持4类模式,基模为简并模式。对归一化空气孔直径 $d/\Lambda=0.986$ 不变,空气孔直径 d 从 $10\ \mu\text{m}$ 增大至 $16\ \mu\text{m}$ 时和 $d=14\ \mu\text{m}$ 不变, d/Λ 分别为 $0.946, 0.966, 0.986$ 时,光纤基模的色散特性和基模相位失配特性进行了研究。发现抽运光不变时,光纤结构参数的改变对斯托克斯波位置影响较大,但是反斯托克斯波长位置基本保持不变。利用中心波长为 $850\ \text{nm}$ 的飞秒激光抽运自制的双包层微结构光纤的外包层,进行了四波混频的实验研究,分别在 $1859\ \text{nm}$ 和 $551\ \text{nm}$ 处得到了斯托克斯和反斯托克斯信号,其中反斯托克斯波位置与理论计算结果仅相差 $3\ \text{nm}$,强度与剩余抽运波强度比值达到 73 。

关键词 非线性光学; 微结构光纤; 四波混频; 相位匹配; 模式; 色散

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0905003

Investigation of Four-Wave Mixing in Microstructure Fiber with Cladding Composed of Three Large Air-Holes

Bi Xinying^{1,2,3} Wang Wei^{1,2,3} Yang Jianju^{1,3} Han Ying^{1,3} Zhou Guiyao^{1,3}
Qi Yuefeng^{1,3} Hou Lantian^{1,3}

¹School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

³The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Microstructure fiber whose cladding is composed of three air-holes is designed. Its mode characteristics are investigated by full vector finite element method. Because of C_{3v} symmetry, the fiber contains 4 distinct classes of mode and the fundamental mode is degenerate mode. The dispersion and phase mismatch in fundamental mode of the fiber is analyzed when $d/\Lambda=0.986$, d changes from $10\ \mu\text{m}$ to $16\ \mu\text{m}$ and $d=14\ \mu\text{m}$, d/Λ changes from 0.946 to 0.986 . It is found that with fixed pump, changes on fiber structure parameters have great influence on the position of Stokes signal while the position of anti-Stokes signal stays almost unchanged. Four-wave mixing and frequency conversion experiments are carried out in the outer cladding of a homemade double cladding microstructure fiber. Stokes and anti-Stokes signals at $1859\ \text{nm}$ and $551\ \text{nm}$ are observed respectively when pumping fs pulse with central wavelength at $850\ \text{nm}$. The experimental result agrees well with the theoretical prediction on the anti-Stokes signal wavelength with only $3\ \text{nm}$ divergence. The ratio of anti-Stokes signal power to the residual pump power is as high as 73 .

Key words nonlinear optics; microstructure fiber; four-wave mixing; phase matching; mode; dispersion

OCIS codes 190.4380; 190.4370; 190.4410

收稿日期: 2015-03-11; 收到修改稿日期: 2015-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61205084,61405173,61275093,61307110,61405172)、河北省自然科学基金(F2012203122, F2014203194)、江苏省气象探测与信息处理重点实验室开放课题(KDXS1107,KDXS1108)

作者简介: 毕新英(1990—),女,硕士研究生,主要从事微结构光纤非线性方面的研究。E-mail: bixinying1990@163.com

导师简介: 周桂耀(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事特种光纤方面的研究。E-mail: zguyiao@163.com

*通信联系人。E-mail: hanyingysu@163.com

1 引 言

四波混频(FWM)是一种非常重要的非线性现象,在分子生物学^[1]、全光开关^[2-3]、波长转换器^[4-5]、量子关联光子^[6]和光通信^[7-8]等很多方面有着重要的应用。微结构光纤(MF)^[9],又称光子晶体光纤(PCF)或者多孔光纤(HF),其包层含有许多微米量级空气孔,是近年被广泛关注和研究的一种新型光纤。通过合理设计MF的结构,可以灵活调控光在光纤中的传输,使不同频率的光在满足能量守恒的基础上,同时满足动量守恒条件,因此在MF中实现FWM和高效波长转换是近年的研究热点。

传统MF采用堆积法制备光纤,即将毛细管紧密堆叠于外层套管中再拉制成纤,因此传统PCF外包层空气孔排布为六边形。大多数FWM的理论和实验研究也是基于此种MF进行的。2001年,Sharping等^[10]第一次在MF中用实验产生了四波混频。2013年,Sévigny等^[11]理论研究发现,合理设计光纤结构,可以在双零色散MF中得到两组相位匹配点,并且其中一组相位匹配点的位置在光纤结构参数及抽运功率变化的情况下保持稳定。2009年,Nodop等^[12]用皮秒脉冲抽运无截止单模、大模面积MF,通过简并四波混频产生了可见和中红外波段信号光。2012年,Herzog等^[13]利用Nd:YAG激光器产生的纳秒脉冲,抽运纤径为20 μm的MF,产生了中心波长为3105 nm的闲频光和642 nm的信号光,转换效率分别为12.12%和0.2%。2013年,Yuan等^[14]首次利用飞秒脉冲在MF中基于FWM效应将抽运光转换到中红外波段。Chen等^[15]在MF的LP₀₂模式下成功基于FWM效应将抽运波转换到了紫外波段。国内,天津大学胡明列^[6]、北京邮电大学的申向伟等^[17]也对MF中的FWM效应进行了研究。

通过观察传统MF端面可以发现,MF包层节区及其周围3个相邻空气孔也可以作为光波导传输光能量。Yuan等^[18]通过实验在MF包层节区产生了可见波段的可调色散波。赵兴涛等^[19]对MF纤芯和包层节区产生的非线性效应做了对比研究,在包层节区得到了可见光红外波段宽带色散波。以上研究表明,包层由3个空气孔构成的MF同样是一种优良的非线性介质,与传统MF相比,它还具有纤芯面积小,非线性系数高和制备工艺简单等优点。因此,本文设计了一种包层为3个大空气孔的MF,对其模式特性、色散特性等进行了分析,计算了其相位匹配曲线,并对此类光纤中的FWM效应进行了实验研究。

2 理论基础

2.1 色散计算

MF的总色散 $D(\lambda)$ 可以看作材料色散 $D_m(\lambda)$ 与波导色散 $D_w(\lambda)$ 之和,即

$$D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_w(\lambda). \quad (1)$$

计算波导色散时,令石英折射率 $n(\omega) = 1.45$,则

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

式中 λ 为光波长, n_{eff} 为等效折射率, c 为真空中光速。

计算材料色散时,石英折射率 $n(\omega)$ 可用Sellmeier公式很好地近似^[20],

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2}, \quad (3)$$

式中 ω_j 为谐振频率, B_j 为第 j 个谐振的强度。

2.2 相位匹配理论

对于简并四波混频,只需要1束抽运光就能激发FWM过程,其中频率下转换产生的斯托克斯波频率 ω_s ,频率上转换产生的反斯托克斯波频率 ω_a 和抽运波频率 ω_p 满足能量守恒:

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_a. \quad (4)$$

为了获得高效的斯托克斯波和反斯托克斯波转换,还需要满足相位匹配条件。当输入功率较强时,相位失配量为

$$\kappa = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_a) - 2\beta(\omega_p) + 2n_2 \omega_p P_p / (cA_{\text{eff}}), \quad (5)$$

当输入功率不强时,相位失配量近似为

$$\kappa = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_a) - 2\beta(\omega_p), \quad (6)$$

式中 $\beta(\omega_s)$, $\beta(\omega_a)$ 和 $\beta(\omega_p)$ 分别为斯托克斯波,反斯托克斯波和抽运波的传播常数, n_2 为材料非线性折射率, 纯石英纤芯 $n_2=2 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$, P_p 为抽运功率, $A_{\text{eff}} = \left(\iint |E|^2 |dx dy|^2 \right) / \left(\iint |E|^4 dx dy \right)$ 是光纤的有效模场面积。

3 数值模拟

3.1 模式分析

本文设计的 MF 为三角形结构且包层为 3 个大空气孔, 如图 1 所示。基质材料为纯石英, 3 个大空气孔组成了包层区, 将纤芯包围在其中。空气孔直径定义为 d , 两个空气孔间的距离定义为 Λ , 与 3 个空气孔相切的圆的直径定义为纤芯直径 d_{core} 。

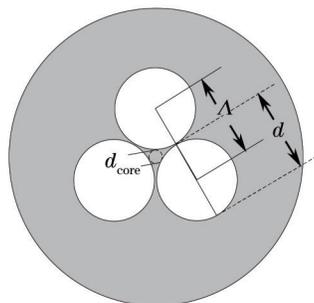


图 1 微结构光纤端面图

Fig.1 Cross-section of the proposed MF

由于此类光纤具有 C_{3v} 对称性, 根据对称性不同它一共支持 4 类模式, 其中 2 类为不简并模式, 2 类为简并模式^[21-22]。利用全矢量有限元法对该光纤进行计算, 得到该光纤有多种模式。图 2 是空气孔直径 $d=14 \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.986$, 波长为 1550 nm 时部分不同模式的电场 z 分量示意图, 图 2(a) 为第 1 类模式, 图 2(b) 为第 2 类模式, 它们的电场 z 示意图最小不可约区都为 $\pi/3$, 但它们的边界条件不同。图 2(c) 与图 2(e) 都为第 3 类模式, 图 2(d)

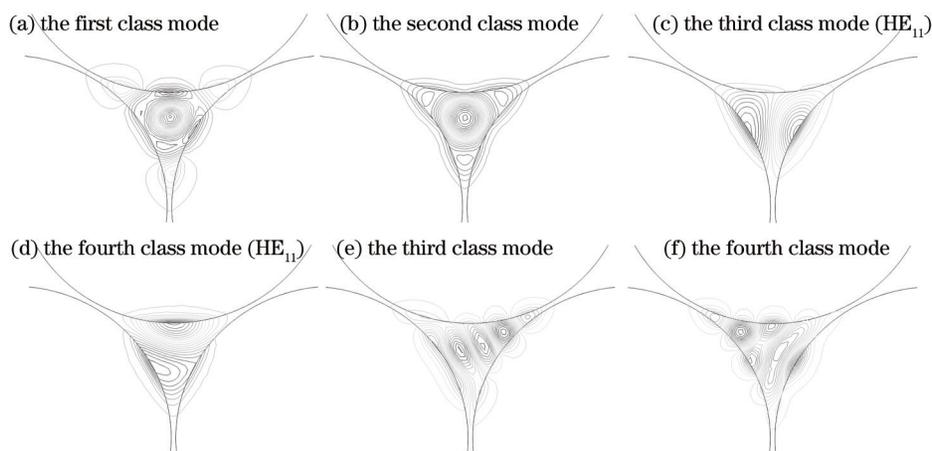


图 2 1550 nm 时部分模式

Fig.2 Different modes at 1550 nm

表 1 6 种模式折射率、类型和简并度

Table 1 n_{eff} , mode classification and degenerate characteristic of six modes

| Mode number | n_{eff} | Mode class | Degeneracy |
|-------------|------------------|------------|------------|
| Fig.2(a) | 1.25839402 | 1 | 1 |
| Fig.2(b) | 1.34944742 | 2 | 1 |
| Fig.2(c) | 1.40329029 | 3 | 2 |
| Fig.2(d) | 1.40327160 | 4 | 2 |
| Fig.2(e) | 1.19519442 | 3 | 2 |
| Fig.2(f) | 1.19479260 | 4 | 2 |

与图2(f)都为第4类模式。图2(c)与图2(d)简并,图2(e)与图2(f)简并。它们的电场 z 示意图最小不可约区都为 π ,但不同类模式的边界条件不同。表1中是不同模式的折射率、模式类型和简并度,其中图2(c)、(d)所对应的 n_{eff} 最高,因此光纤基模出现在第3类与第4类模式中,为简并模,与传统阶跃光纤的 HE_{11} 模很相似。

3.2 色散计算

本文利用全矢量有限元方法对所设计MF的光学特性进行研究,计算时取 $n_{\text{silica}}=1.45$ 。图3(a)和图3(b)分别表示的是当 $d/\Lambda=0.986$, d 分别为10,12,14,16 μm ,以及 $d=14 \mu\text{m}$, d/Λ 分别为0.946,0.966,0.986时,光纤基模模式有效折射率 n_{eff} 随波长的变化情况。从图3(a)可以看出, n_{eff} 随波长的增大而减小,这与传统六边形MF规律相同。然而,六边形MF的模式有效折射率 n_{eff} 随波长变化一般呈一次曲线的关系。本文研究的MF,其 n_{eff} 随波长变化的速率不断增大。因此,与传统MF相比,随着波长变长,此类光纤对光的限制能力较弱。由于本文所设计的MF仅含一层空气孔,当 d/Λ 小于0.9时,难以将光有效的限制在纤芯中,而且所设计的MF需要满足高非线性应用,需要小纤芯和大的空气填充率。因此,仅对 d/Λ 在0.96附近,分别为0.946,0.966,0.986时的情况进行了研究[图3(b)]。从图3(b)可以看到,随着 d/Λ 的减小,包层的空气填充率降低,造成包层等效折射率增大,因此 n_{eff} 也相应增大。

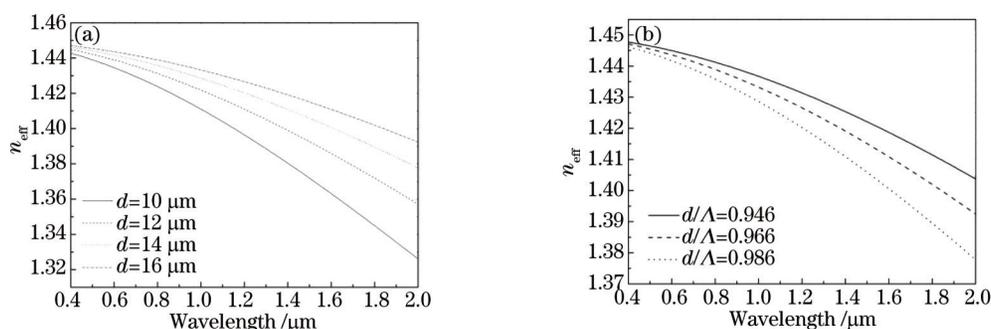


图3 n_{eff} 随波长的变化。(a) $d/\Lambda=0.986$, $d=10, 12, 14, 16 \mu\text{m}$; (b) $d=14 \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.946, 0.966, 0.986$

Fig.3 n_{eff} versus wavelength. (a) $d/\Lambda=0.986$, $d=10, 12, 14, 16 \mu\text{m}$; (b) $d=14 \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.946, 0.966, 0.986$

图4(a)和图4(b)分别表示的是当 $d/\Lambda=0.986$, d 分别为10,12,14,16 μm ,以及 $d=14 \mu\text{m}$, d/Λ 分别为0.946,0.966,0.986时,光纤基模总色散随波长的变化情况,其中材料色散通过石英的Sellmeier公式引入。从图4(a)可以看出,光纤的零色散波长随着 d 的增大逐渐向长波方向移动,零色散波长分别为741,787,827,870 nm。在小纤芯,大的空气填充率情况下,MF色散曲线会出现双零色散点。所设计的MF纤芯小,空气填充率大,并且在 $d=10 \mu\text{m}$ 时,色散曲线在长波段有下降趋势,因此可以判断该光纤有双零色散波长,但双零色散波长的间距大于传统六边形MF的双零色散波长的间距。从图4(b)可以看出,光纤的零色散波长随着 d/Λ 的增大逐渐向短波方向移动,零色散波长分别为900,862,827 nm。抽运波长在光纤的零色散点附近时更容易满足相位匹配条件,而本文所研究的MF零色散波长都在钛-蓝宝石飞秒激光器的可调波长范围(700~980 nm)内,因此此类光纤更适合钛-蓝宝石飞秒激光器抽运下的四波混频实验和波长转换的研究。

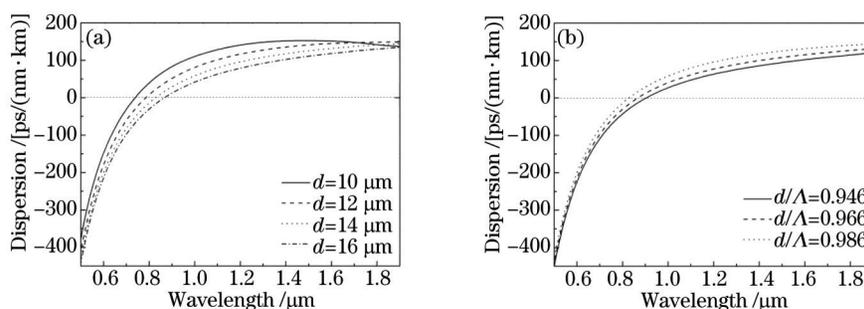


图4 色散随波长的变化。(a) $d/\Lambda=0.986$, $d=10, 12, 14, 16 \mu\text{m}$; (b) $d=14 \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.946, 0.966, 0.986$

Fig.4 Dispersion versus wavelength. (a) $d/\Lambda=0.986$, $d=10, 12, 14, 16 \mu\text{m}$; (b) $d=14 \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.946, 0.966, 0.986$

3.3 相位匹配计算

图5(a)和图5(b)分别表示的是当 $d/\Lambda=0.986$, d 分别为10,12,14,16 μm 和 $d=14 \mu\text{m}$, d/Λ 分别为0.946,

0.966, 0.986, 钛-蓝宝石飞秒激光器抽运波长为 850 nm 时光纤基模情况下相位失配曲线。从图 5(a) 可以得出, 反斯托克斯波中心波长分别为 549.1, 549.4, 550.0, 551.4 nm, 斯托克斯波中心波长分别为 1881.1, 1877.0, 1869.9, 1855.2 nm。在 d 变化 $6 \mu\text{m}$ 的情况下, 斯托克斯波位置变化 25.9 nm, 反斯托克斯波位置仅变化 2.3 nm。从图 5(b) 可以得出, 反斯托克斯波中心波长分别为 544.5, 547.5, 550.0 nm, 斯托克斯波中心波长分别为 1936.5, 1898.9, 1869.9 nm。在 d/Λ 变化 0.04 的情况下, 斯托克斯波位置变化 66.6 nm, 反斯托克斯波位置仅变化 5.5 nm。由以上数值模拟可知, 当抽运光波长一定时, 本文所设计的光纤的空气孔直径和归一化孔径的变化对反斯托克斯波长的位置影响很小。MF 制备过程中, 由于堆积法工艺的限制, 光纤的结构参数发生形变难以避免。因此, 此类 MF 在频率上转换方面的应用有很明显的优势。

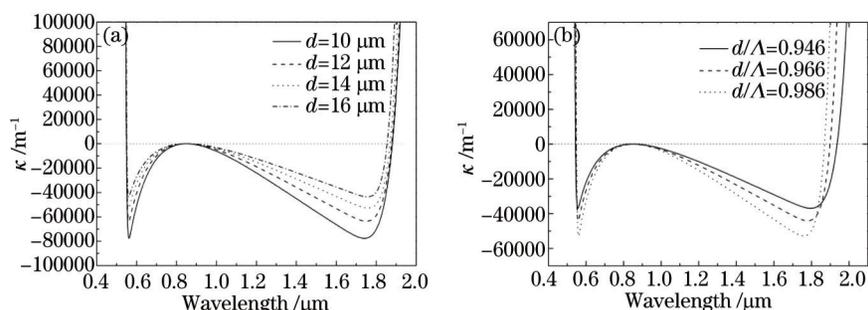


图 5 相位失配曲线。(a) $d/\Lambda=0.986$, $d=10, 12, 14, 16 \mu\text{m}$; (b) $d=14 \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.946, 0.966, 0.986$

Fig.5 Phase-mismatched curves. (a) $d/\Lambda=0.986$, $d=10, 12, 14, 16 \mu\text{m}$; (b) $d=14 \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.946, 0.966, 0.986$

4 实验研究

图 6 是本课题组自行研制的双包层 MF, 在 MF 的外包层中有很多与设计的 MF 类似的结构。因此本文选定外包层中所圈中的 3 个大空气孔及其节区中进行四波混频的实验研究。通过测量得到圈中位置 3 个空气孔的长轴和短轴的平均值分别为 16.7, 13.6, 10.5 μm , 2 个空气孔间的距离分别为 12.8, 13.5, 14.9 μm 。为了简化分析, 取空气孔直径为 $d=13.6 \mu\text{m}$, $\Lambda=13.7 \mu\text{m}$ 进行数值模拟。图 7 是利用全矢量有限元法计算得到的光纤基模色散曲线, 其零色散波长为 805 nm。图 8 是中心波长为 850 nm 的抽运光抽运光纤时的相位失配曲线, 从图中可以得到, 相位匹配时对应的反斯托克斯和斯托克斯波长分别为 548 nm 和 1890 nm。

图 9 是实验装置图, 采用美国 Mira900 钛宝石飞秒激光器作为抽运光源, 其脉冲宽度为 120 fs, 重复频率为 76 MHz, 平均功率为 0.45 W。将中心波长为 850 nm 的飞秒激光通过 40 \times 透镜耦合进入 80 cm 的光纤, 并用 CCD 观察, 使激光的入射位置在图中所圈的 3 孔中间。在光纤输出端用可见光光谱仪和红外光谱仪 [Avaspec-256(测量范围 200~1100 nm)和 Avaspec-NIR-256(测量范围 900~2500 nm), OSA]接收。图 10 是 MF 出射端输出光谱图, 光谱反斯托克斯波长为 551 nm, 斯托克斯波长为 1859 nm。由于理论模拟时, 将不规则的空气孔等效为与所设计 MF 类似的模型, 理论与实验结果斯托克斯波长相差 31 nm, 而反斯托克斯波长仅有 3 nm 差异, 证明了本文所设计的 MF 在拉制过程中发生的形变对反斯托克斯波长的影响很小。从图 10 还可以看到, 抽运光功率转换至反斯托克斯波和斯托克斯波的效率很高, 其中反斯托克斯波的强度与抽运光剩余强度的比值为 73。

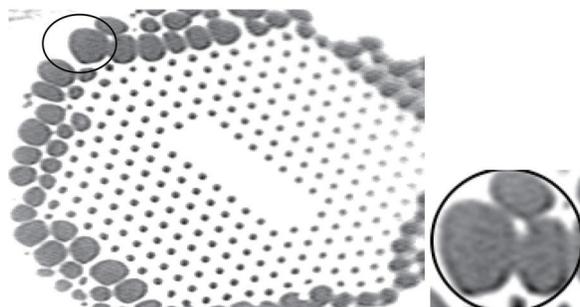


图 6 实验所用微结构光纤截面图

Fig.6 Cross-section of the MF in the experiment

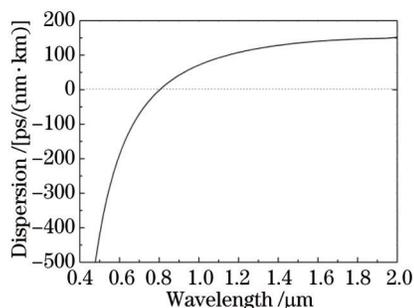


图7 色散曲线($d=13.6 \mu\text{m}$, $\Lambda=13.7 \mu\text{m}$)
Fig.7 Dispersion curve ($d=13.6 \mu\text{m}$, $\Lambda=13.7 \mu\text{m}$)

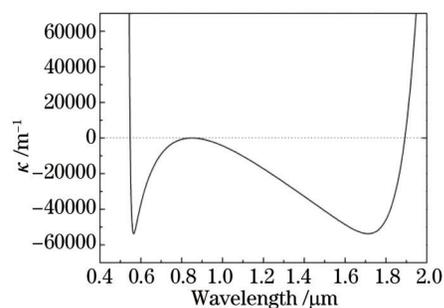


图8 相位失配曲线($d=13.6 \mu\text{m}$, $\Lambda=13.7 \mu\text{m}$)
Fig.8 Phase-mismatching curve ($d=13.6 \mu\text{m}$, $\Lambda=13.7 \mu\text{m}$)

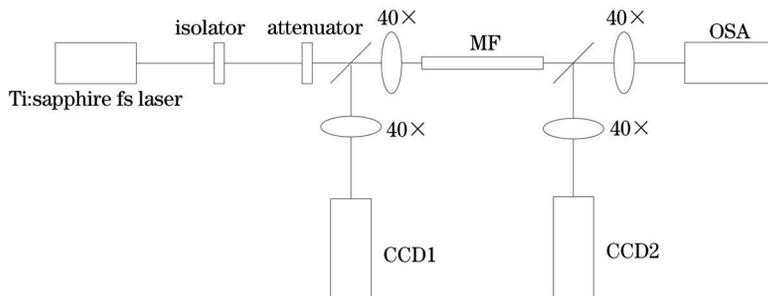


图9 实验装置示意图

Fig.9 Diagram of experimental setup

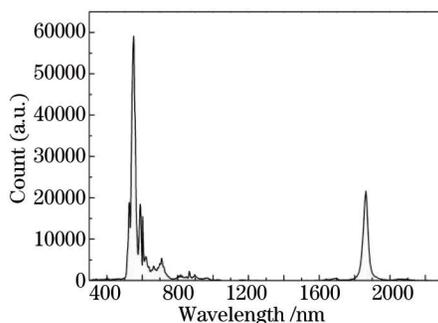


图10 微结构光纤的输出光谱

Fig.10 Output spectrum of MF

5 结 论

设计了一种包层为3个大空气孔的MF,并对其模式、色散和相位失配特性进行了研究。理论研究发现,该设计的MF短波处相位匹配点位置随光纤结构参数改变相对稳定:当归一化空气孔直径 $d/\Lambda=0.986$, d 从 $10 \mu\text{m}$ 增大至 $16 \mu\text{m}$ 时,反斯托克斯波位置变化仅为 2.3 nm 。用 850 nm 飞秒脉冲抽运课题组自行研制的双包层MF的外包层单元,在 551 nm 处得到了高效率的频率上转换,反斯托克斯信号强度与剩余抽运波强度比值达到73。反斯托克斯波位置与理论计算的位置仅相差 3 nm ,验证了该设计的光纤具有短波处相位匹配点位置随光纤结构参数改变相对稳定的特点。因此,所设计的MF在频率上转换等方面具有一定的应用前景。实际制备此类MF并研究抽运波长变化时,其相位匹配点的变化规律,是下一步的研究重点。

参 考 文 献

- 1 Lefrancois S, Fu D, Holtom G, *et al.*. Fiber four-wave mixing source for coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy[J]. Optics Letters, 2012, 37(10): 1652-1654.
 - 2 Yang Guangqiang, Zhang Xia, Ren Xiaomin, *et al.*. Experimental research on all optical switch based on photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(12): 1650-1653.
- 杨广强, 张霞, 任晓敏, 等. 基于光子晶体光纤的全光开关实验研究[J]. 中国激光, 2005, 32(12): 1650-1653.

- 3 Wei Xiaoying, Chen Heming. Photonic crystal optical switch based on direct coupling structure[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s223004.
卫晓颖, 陈鹤鸣. 基于直接耦合结构的光子晶体光开关[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s223004.
- 4 Murray R T, Kelleher E, Popov S V, *et al.*. Widely tunable polarization maintaining photonic crystal fiber based parametric wavelength conversion[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15826–15833.
- 5 Huang Xinning, Xie Xiaoping, Zhao Wei, *et al.*. A high-efficiency tunable polarization-insensitive wavelength convertor based on degenerate four-wave mixing in a highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505005.
黄新宁, 谢小平, 赵 卫, 等. 基于光子晶体光纤中简并四波混频效应的高效可调谐偏振不敏感波长变换器[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505005.
- 6 Li Xiaoying, Zhang Xiuting, Wang Kun, *et al.*. A portable all-fiber source of quantum-correlated photon-pairs[J]. Acta Optica Sinica, 2013(9): 0927003.
李小英, 张秀婷, 王 堃, 等. 全光纤便携式量子关联光子对源[J]. 光学学报, 2013(9): 0927003.
- 7 Liang Junqiang, Wang Juanfen, Li Pu, *et al.*. Optical sampling of chaotic laser based on four-wave mixing in highly nonlinear fiber [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402009.
梁俊强, 王娟芬, 李 璞, 等. 基于高非线性光纤中四波混频效应实现对混沌激光的采样[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402009.
- 8 Wang Lujun, Yan Lianshan, Guo Yinghui, *et al.*. Optical logic gate based on four-wave mixing in subwavelength metallic waveguide [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0419002.
王鲁俊, 闫连山, 郭迎辉, 等. 基于微纳波导四波混频效应的全光逻辑实现[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0419002.
- 9 Bennett P J, Monro T M, Richardson D J. Toward practical holey fiber technology: Fabrication, splicing, modeling, and characterization [J]. Optics Letters, 1999, 24(17): 1203–1205.
- 10 Sharping J E, Fiorentino M, Coker A, *et al.*. Four-wave mixing in microstructure fiber[J]. Optics Letters, 2001, 26(14): 1048–1050.
- 11 Sévigny B, Vanvincq O, Valentin C, *et al.*. Four-wave mixing stability in hybrid photonic crystal fibers with two zero-dispersion wavelengths[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 30859–30873.
- 12 Nodop D, Jauregui C, Schimpf D, *et al.*. Efficient high-power generation of visible and mid-infrared light by degenerate four-wave-mixing in a large-mode-area photonic-crystal fiber[J]. Optics Letters, 2009, 34(22): 3499–3501.
- 13 Herzog A, Shamir A, Ishaaya A A. Wavelength conversion of nanosecond pulses to the mid-IR in photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2012, 37(1): 82–84.
- 14 Yuan Jinhui, Sang Xinzhu, Wu qiang, *et al.*. Efficient and broadband Stokes wave generation by degenerate four-wave mixing at the mid-infrared wavelength in a silica photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5288–5291.
- 15 Chen Y, Wadsworth W J, Birks T A. Ultraviolet four-wave mixing in the LP₀₂ fiber mode[J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3747–3750.
- 16 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng, *et al.*. Frequency conversion in a birefringent microstructure fiber by femtosecond pulses [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(5): 613–616.
胡明列, 王清月, 栗岩峰, 等. 飞秒激光脉冲在双折射微结构光纤中频率变换的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(5): 613–616.
- 17 Shen Xiangwei, Yu Chongxiu, Sang Xinzhu, *et al.*. High efficient anti-Stokes signal conversion in photonic crystal fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(4): 044203.
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): 044203.
- 18 Yuan J, Sang X, Wu Q, *et al.*. Efficient and broadband Cherenkov radiations in the multi-knots of a hollow-core photonic crystal fiber cladding[J]. Optics Communications, 2013, 291: 317–320.
- 19 Zhao Xingtao, 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): 064215.
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): 064215.
- 20 Govind P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics, Second Edition[M]. Jia Dongfang Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 6–9.
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 6–9.
- 21 McIsaac P. Symmetry-induced modal characteristics of uniform waveguides-I: Summary of results[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1975, 23(5): 421–429.
- 22 Steel M J, White T P, Martijn de Sterke, *et al.*. Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers[J]. Optics Letters, 2001, 26(8): 488–490.