

# 全光纤光学参量振荡器增益分布的测量

韩 凯

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410072

**摘要** 在基于四波混频(FWM)效应实现频率变换的全光纤光学参量振荡器(OPO)中,信号光通常只能在较短的距离内获得有效的参量增益。根据光时域反射(OTDR)技术的基本原理,通过测量信号光的后向散射光,获得了信号光在光子晶体光纤(PCF)中的增长曲线,进一步计算得到了 PCF 中的参量增益分布;将 PCF 的起始端到参量增益急剧下降处的距离定义为有效作用长度,并且通过水浴实验验证了测量结果。测量发现,在 34.5 m 的 PCF 中,有效作用长度仅有 10 m,信号光仅在 PCF 的前 10 m 获得了有效增益,近似以指数形式增长,在后 24.5 m 的 PCF 中,信号光与抽运光已不再满足相位匹配条件,信号光不再增长。这种测量全光纤 OPO 参量增益分布的方法有助于优化全光纤 OPO 的结构,提高全光纤 OPO 的转化效率。

**关键词** 非线性光学;光纤激光;光学参量振荡器;光时域反射;光子晶体光纤

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0701007

## Measurement of Gain Distribution in All-Fiber Optical Parametric Oscillator

Han Kai

*College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China*

**Abstract** In the all-fiber optical parametric oscillator (OPO) based on four wave mixing (FWM), the signal laser gets effective gain only in a short distance. The increasing trend of signal laser in photonic crystal fiber (PCF) is measured by optical time domain reflecting (OTDR) technology, and the backscatter signal light is measured. The parametric gain distribution in PCF is calculated, and the distance between the start of the PCF and the sharp drop in the parametric gain is defined as the effective interaction length. Moreover, the results are verified by PCF heating experiment. The results show that there is only 10 m of the effective interaction length in the 34.5 m PCF. The signal laser keeps growing exponentially only in the first 10 m PCF, and cannot increase any more in the rest 24.5 m PCF for the signal and the pump light is no longer meet the phase matching conditions. An effective method for measuring the parametric gain distribution is proposed, and the result is useful for optimizing the configuration and improving the efficiency of all-fiber OPO.

**Key words** nonlinear optics; fiber laser; optical parametric oscillator; optical time domain reflect; photonic crystal fiber

**OCIS codes** 190.4975; 190.4370; 190.4380

## 1 引 言

激光器一般只能发射一个或几个固定波长的相干光,为了满足实际应用中对各种波长相干光的需求,非线性光学频率变换技术应运而生。光学参量振荡器(OPO)是扩展激光波段的重要手段,其输出波长遍及紫外、红外甚至太赫兹波段<sup>[1-2]</sup>。几十年来,人们对 OPO 的研究始终保持了很高的热情,新的工作介质、新的工作形式、新的调谐方式不断涌现。尽管基于晶体的 OPO 在研究和应用中都取得了巨大的成功,并且仍然表现出较大的活力<sup>[3-5]</sup>,但是也存在一些固有的缺点,比如价格相对昂贵、光路需要精确校准、环境适应性差等。

收稿日期: 2016-02-03; 收到修改稿日期: 2016-03-24

作者简介: 韩 凯(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事光纤激光技术方面的研究。

E-mail: hankai0071@nudt.edu.cn

全光纤结构具有系统稳定、结构紧凑、输出光束质量好等特点,于是人们考虑将 OPO 系统全光纤化,即采用光纤激光器作为抽运源,以高非线性光纤作为非线性介质<sup>[6]</sup>。由于光纤是中心对称的结构,不存在二阶非线性极化效应,在全光纤 OPO 中主要利用四波混频(FWM)等三阶非线性效应实现频率变换<sup>[7]</sup>。光纤的三阶非线性效应相较于晶体的二阶非线性效应弱很多,全光纤 OPO 的转化效率较低,这些缺陷导致全光纤 OPO 的发展相对缓慢<sup>[8-11]</sup>。近年来,随着光纤激光器和具有高非线性的光子晶体光纤(PCF)的发展,全光纤 OPO 的转化效率不断提高、发展十分迅速,已成为非线性频率变换领域的研究热点<sup>[12-16]</sup>。

在基于 FWM 效应实现频率变换的全光纤 OPO 中,信号光和抽运光需要在 PCF 中保持相位匹配。由于制造工艺的限制,PCF 在拉丝过程中空气孔直径和空气孔周期会产生微小的变化,这种结构上微小的变化会导致零色散波长等光学参数产生微小的改变,从而破坏信号光与抽运光的相位匹配,导致参量增益下降<sup>[15-16]</sup>。因此,在 PCF 中信号光通常只能在较短的距离内获得有效的参量增益。本文基于全光纤 OPO 平台,采用光时域反射(OTDR)技术测量了信号光在 PCF 中的增长曲线,计算了 PCF 中的参量增益分布,定义了有效作用长度,并且通过水浴实验验证了测量结果。

## 2 PCF 中 FWM 效应的理论描述

全光纤 OPO 是基于 PCF 中简并的 FWM 效应实现频率变换的,抽运光、信号光、闲频光首先要满足能量守恒条件,即

$$\Omega = \omega_3 - \omega_0 = \omega_1 - \omega_4, \quad (1)$$

式中  $\Omega$  代表信号光相对于抽运光的频移, $\omega_3$  代表信号光的圆频率, $\omega_4$  代表闲频光的圆频率, $\omega_0$  代表抽运光的圆频率。在 OPO 腔中,抽运光与信号光一起进入到 PCF 中,信号光功率被不断放大,造成信号光放大的增益称为参量增益。参量增益与相位失配量紧密相关。在简并 FWM 中,参量增益可以表示为

$$g = \sqrt{(\gamma P_0)^2 - (\kappa/2)^2}, \quad (2)$$

式中  $g$  为参量增益, $\kappa$  为相位失配量, $P_0$  为抽运光的功率, $\gamma$  是 PCF 的非线性系数, $\kappa$  和  $\gamma$  分别表示为

$$\kappa = \beta_3 + \beta_4 - 2\beta_0 + 2\gamma P_0, \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 \cdot A_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

式中  $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_0$  分别代表信号光、闲频光和抽运光的模传播常数, $\lambda_0$  表示波长, $n_2$  是材料的非线性折射率系数, $A_{\text{eff}}$  代表有效模场面积。从(1)式中可以看出,当相位失配量  $\kappa$  较大时,参量增益很小,只有当  $\kappa$  为 0 时才能实现最大的参量增益。因此,将  $\kappa=0$  称为相位匹配条件。也就是说,只有当抽运光、信号光、闲频光在 PCF 中满足相位匹配条件时,才能实现抽运光功率向信号光功率的有效转移<sup>[17]</sup>。

实验中所使用的 PCF 是 NKT photonics 公司生产的无截止单模大模场面积光子晶体光纤(PCF-LMA-8),光纤外径为 125  $\mu\text{m}$ ,长度为 34.5 m。纤芯被 4 圈空气孔包围,空气孔间距  $\Lambda=5.6 \mu\text{m}$ ,空气孔直径  $d=2.74 \mu\text{m}$ ,空气孔直径与间距之比  $d/\Lambda=0.49$ ,非线性折射率  $n_2=2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ,有效模场面积为 38.5  $\mu\text{m}^2$ 。根据矢量有限元法,采用 COMSOL 软件可由 PCF 的结构参数计算得到不同波长光波的模

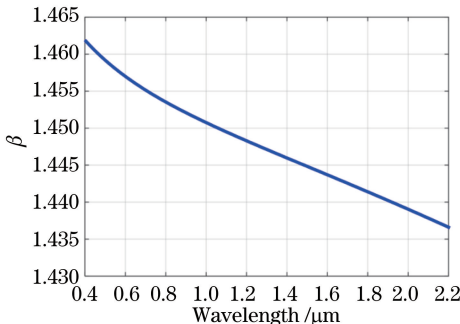


图 1 模传播常数与波长的依赖关系

Fig. 1 Dependence of  $\beta$  on the wavelength

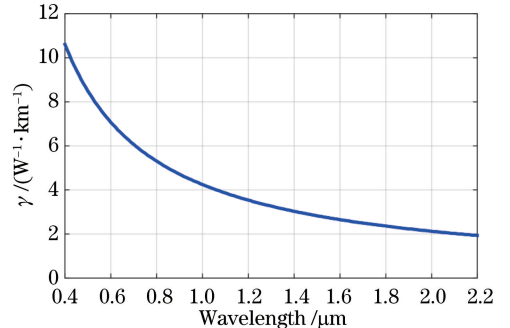


图 2 非线性系数与波长的依赖关系

Fig. 2 Dependence of  $\gamma$  on the wavelength

传播常数  $\beta^{[18-19]}$ , 如图 1 所示。

根据(4)式, 可以求出单位长度 PCF 的非线性系数  $\gamma$  与光波波长的关系, 如图 2 所示。

在实验中, 抽运光的峰值功率  $P_0$  为 1.26 kW, 根据图 1 给出的模传播常数、图 2 给出的非线性系数, 结合(1)~(3)式, 可求得不同波长的抽运光、信号光、闲频光相互作用下的参量增益, 如图 3 所示。

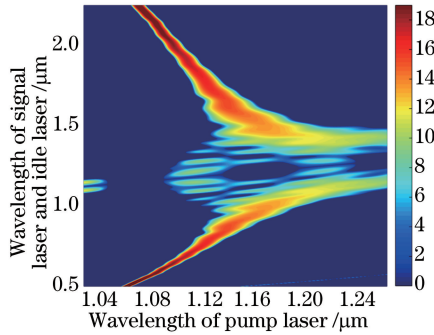


图 3 不同波长的抽运光、信号光、闲频光相互作用下的参量增益

Fig. 3 Parametric gain at various wavelengths of the pump laser, signal laser and idle laser

从图 3 中可以看出, 若采用波长为  $1.08 \mu\text{m}$  的抽运光抽运 PCF, 只有当信号光为  $0.72 \mu\text{m}$ 、闲频光为  $2.2 \mu\text{m}$  时才能够满足相位匹配条件, 光纤 OPO 才会具有较可客观的参量增益。另外, 从图 3 中还可以看出,  $0.72 \mu\text{m}$  的信号光相对于  $1.08 \mu\text{m}$  抽运光的频移为 140 THz, 在这种大频移的情况下, 参量增益的带宽很窄, 若 PCF 实际的结构参数与理论值稍有偏差就会造成参量增益的急剧下降。

### 3 全光纤 OPO 平台的结构

自搭的全光纤 OPO 的结构如图 4 所示, 抽运源为自搭的线偏振脉冲掺镱光纤激光器, 输出波长为 1080 nm, 10 dB 线宽为 0.04 nm, 平均功率为 2 W, 峰值功率为 1.26 kW, 重复频率可调, 一般工作在 1.85 MHz, 脉宽可调, 一般工作在 0.79 ns。OPO 腔由两个波分复用器 (WDM, 718/1080nm, G&H Inc.)、两个耦合器 (90/10, G&H Inc.)、长度为 34.5 m 的 PCF (PCF-LMA-8,  $\Lambda = 5.6 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.49$ , NKT Photonics) 和长度为 76.2 m 的延迟光纤 (Hi1060, 5.3/125, NA=0.14, Corning Inc.) 组成。在 PCF 中由于简并的 FWM 效应, 波长为 1080 nm 的抽运光会产生波长为 718 nm 的信号光和 2195 nm 的闲频光, 其中闲频光在 OPO 腔中的损耗很大, 很快衰减, 而信号光在 OPO 环形腔内形成谐振。

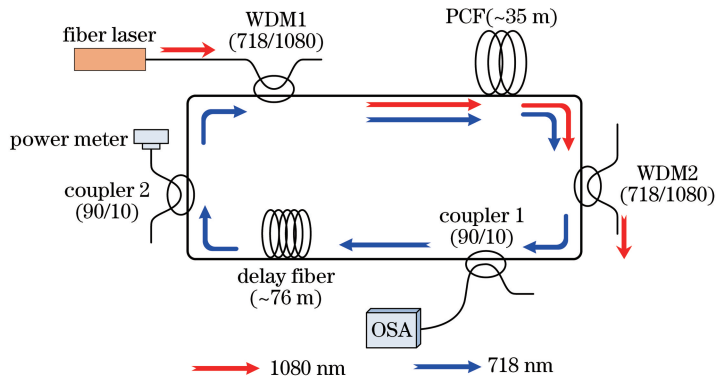


图 4 全光纤 OPO 的结构

Fig. 4 Scheme of the all-fiber OPO

光纤激光器输出 1080nm 的抽运光进入 WDM1 后, 与 718nm 的信号光合为一束共同进入 PCF。在 PCF 中由于简并的 FWM 效应, 波长为 1080 nm 的抽运光把能量转移给 718 nm 的信号光, 剩余的抽运光从 WDM2 中导出。OPO 腔中的两个 90:10 的耦合器将信号光分出一部分, 分别进行功率测量和光谱测量。信号光脉冲经过 76.2 m 长的延迟光纤后到达 WDM1 时恰好与下一个抽运光脉冲重合, 再次进入 PCF 进行下一次放大。整个 OPO 腔的长度为 111.2 m, 信号光在 OPO 腔内传播一周需要 540 ns, 仔细调节抽运光纤

激光器的重复频率,就能够实现抽运光脉冲与信号光脉冲在 PCF 起始端的重叠传输。

实验中,全光纤 OPO 从 coupler2 的耦合臂输出的信号光功率为 5.0 mW,从 coupler1 的耦合臂输出的光谱如图 5 所示。在 OPO 腔中,除了波长为 1080 nm 的抽运光和 718 nm 的信号光外,还在波长 1140 nm 附近出现了抽运光的受激拉曼散射(SRS)斯托克斯光,在波长 742 nm 附近出现了信号光的 SRS 斯托克斯光,在波长 950~1080 nm 的范围内出现了超连续谱。这表明在 OPO 腔中除了 FWM 效应以外,还出现了 SRS、自相位调制(SPM)等有害的非线性效应,这些非线性效应会消耗抽运光功率和信号光功率,阻碍信号光功率的提升。

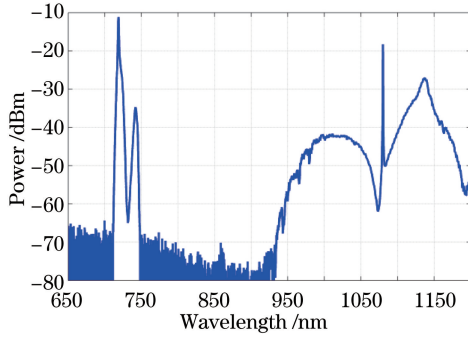


图 5 全光纤 OPO 的输出光谱

Fig. 5 Output spectrum of all-fiber OPO

#### 4 参量增益分布的测量

简单测量信号光功率和 OPO 腔的输出光谱,无法获知信号光在 PCF 中的增长过程和增长趋势。信号光脉冲在 PCF 中传输时,强度逐渐增大。信号光的后向散射光的强度反映了信号光的强度,后向散射光到达探测器的时间反映了信号光脉冲在 PCF 中的位置。因此,通过探测信号光脉冲的后向散射光信号就能够确定信号光在 PCF 中的增长过程和增益分布。利用 coupler2 的耦合臂即可测量信号光脉冲的后向散射光信号,探测系统如图 6 所示。

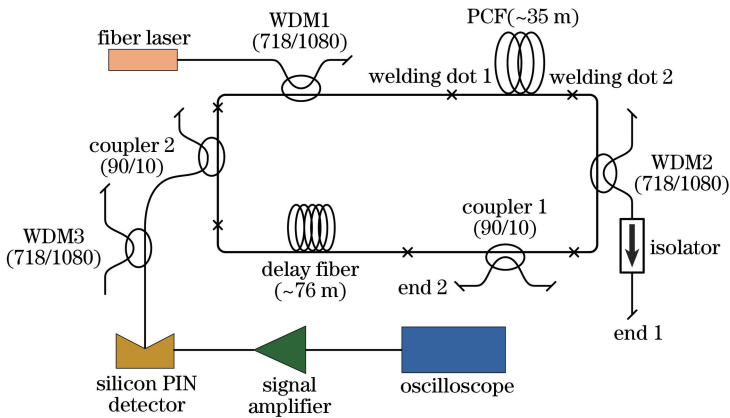


图 6 信号光的后向散射光探测示意图

Fig. 6 Scheme of the detection of signal laser backscattered light

WDM2 的前向输出端面会对 1080 nm 的抽运光造成较强的后向散射,因而 coupler2 输出的后向散射光中会有较多的 1080 nm 的光谱成分。在 WDM2 的前向输出端连接隔离器(1080 nm,G&H Inc.),可有效地减少 1080 nm 抽运光的后向端面散射。在 coupler2 的耦合臂上连接 WDM3(718/1080 nm)可进一步减小后向散射光中 1080 nm 的波长成分。此外,采用光谱响应范围为 400~900 nm 的硅探测器(PIN, DET02AFC,Thorlabs Inc.)探测后向散射光,保证只对 718 nm 的后向散射光成分产生响应,如图 6 所示。

PCF 在 718 nm 处的瑞利散射损耗为 5 dB/km,也就是说在 1 m 的长度上有 0.1%的信号光功率被瑞利散射掉,其中只有不到千分之一的散射光是后向传输的,能够通过耦合器导出的后向散射光不足十分之一。

PCF 中的信号光功率约为几十毫瓦,经过估算可供测量的后向散射光只有几纳瓦。PIN 探测器输出的电流信号十分微弱,在 10 nA 量级。因此在 PIN 探测器后面连接电流放大器(增益 33 dB, AU-1310, MITEQ Inc.)对光电信号进行放大,如图 6 所示。实验中选用的 PIN 光电探测器的带宽为 1.2 GHz,电流放大器的带宽为 1 kHz~500 MHz,示波器的采样频率为 50 G/s,探测系统对后向散射光信号的时间分辨能力优于 10 ns。光纤中的光速为  $2.04 \times 10^8$  m/s,依据 OTDR 技术的原理,探测系统 10 ns 的时间分辨能力意味着在 PCF 中可以对信号光脉冲实现 1 m 的位置分辨能力<sup>[20]</sup>。

当抽运光脉冲宽度为 0.79 ns、重频为 1.85 MHz 时,探测到的后向散射信号如图 7 所示。信号的复现周期为 540 ns。图 7 中可以发现许多信号峰,分别在 0, 342.5, 383.5, 414.5 ns 的位置上出现。这些信号峰都来自于 OPO 腔中的熔接点和端面散射。图 7 的横坐标中 1 ns 的间隔代表 10.3 cm 的光纤长度。根据 OPO 腔的结构参数可以确定各个信号峰与 OPO 腔内熔接点、端面的对应关系。0 处的信号峰是信号光被熔接点 1 散射形成的,342.5 ns 处的信号峰是信号光被熔接点 2 散射形成的,383.5 ns 处的信号峰是信号光被端面 1 散射形成的,414.5 ns 处的信号峰是信号光被端面 2 散射形成的。那么,信号光在 PCF 中的后向散射光信号位于 0(熔接点 1)到 342.5 ns(熔接点 2)之间,将这个区间的后向散射光信号放大后即可得到信号光在 PCF 中的后向散射光信号,如图 8 所示。

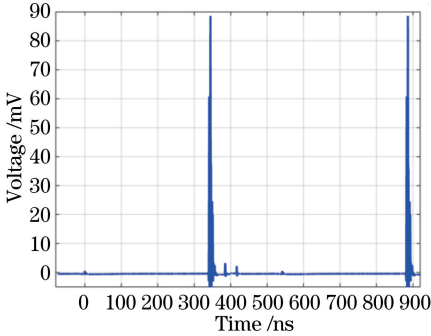


图 7 后向散射光信号

Fig. 7 Signal of backscattered light

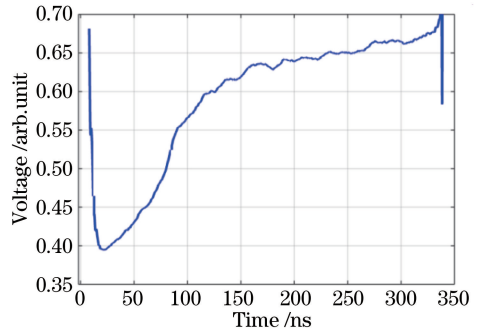


图 8 信号光在 PCF 中的后向散射光信号

Fig. 8 Signal of backscattered light in PCF

图 8 为测得的信号光在 PCF 中的后向散射信号,0 的位置对应于 PCF 的起始端。熔接点 1 造成的散射峰掩盖了 PCF 前 1.5 m 的后向散射信号,形成探测死区,换用响应速度更快的探测系统能够在一定程度上减小死区。信号光在 PCF 中的后向散射信号正比于信号光在 PCF 中的强度分布。从图 8 中可以看出,信号光在 PCF 的前 10 m 中以接近指数的形式快速增长,在 PCF 的后半段增长很小。事实上,信号光在 PCF 的后半段中已经完全停止了增长。图 8 显示的 PCF 后半段的的增长趋势不是真实存在的,而是由于信号放大器(AU-1310, 1 kHz~500 MHz)的低频截止频率不为零造成的。

定义 PCF 中的参量增益纵向分布为  $g(z)$ ,可根据信号光在 PCF 中的强度分布计算得到,即

$$g(z) = \frac{10 \lg \left[ \frac{P(z + \Delta z)}{P(z - \Delta z)} \right]}{2 \cdot \Delta z}, \quad (5)$$

式中  $z$  表示 PCF 的纵向坐标, $P(z)$  表示  $z$  处信号光的强度,由测得的后向散射信号给出; $g(z)$  表示  $z$  处  $2 \cdot \Delta z$  尺度上的平均参量增益,以 dB 作为单位,此处  $\Delta z = 1$  m。

整个 OPO 腔包含两个 WDM、两个耦合器、一段 PCF 和一段单模光纤以及 6 个熔接点,如图 6 所示。两个 WDM 对 718 nm 信号光的损耗均为 0.29 dB;两个耦合器对 718 nm 信号光的分光比均为 1:9,相应的损耗为 0.46 dB;PCF 长 34.5 m,弯曲直径为 20 cm,此时对 718 nm 信号光的损耗为 9.6 dB/km,PCF 对信号光的总损耗为 0.33 dB;延迟光纤长 76.2 m,弯曲直径为 20 cm,此时对 718 nm 信号光的损耗为 1.6 dB/km,延迟光纤对信号光的总损耗为 0.12 dB;由于大模场面积的 PCF(LMA-8)与两个 WDM 尾纤(单模 Hi1060)的模场面积差异较大,因此,PCF 与两个 WDM 之间的熔接点(熔接点 1 和熔接点 2)具有较大的熔接损耗,经测量熔接损耗分别为 2.50 dB 和 2.80 dB;其余 4 个熔接点是同种光纤(Hi1060)熔接形成的,熔接损耗较小,均为 0.17 dB。根据上述元器件和熔接点的损耗参数,测算得到信号光在 OPO 腔内运行一周的损耗为

7.9 dB。光纤 OPO 系统稳定运行后,信号光通过 PCF 获得的增益也为 7.9 dB,即  $\int_0^{L_{\text{PCF}}} g(z) dz = 7.9 \text{ dB}$ 。 $L_{\text{PCF}}$  表示 PCF 的长度为 34.5 m。根据图 9 给出的信号光在 PCF 中的强度分布和(1)式可计算得到 PCF 中的参量增益分布,如图 9 所示。

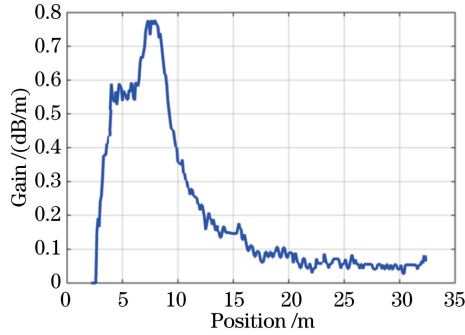


图 9 PCF 中的参量增益分布

Fig. 9 Parametric gain distribution in PCF

图 9 给出了 PCF 中的参量增益分布,从中可以看出参量增益主要集中在 PCF 的前 10 m 中,而后 24.5 m 的 PCF 提供的参量增益相对较小。定义从 PCF 的起始端到参量增益急剧下降处的距离为有效作用长度。那么在图 4 描述的系统结构和工作状况下,全光纤 OPO 中抽运光和信号光的有效作用长度为 10 m。抽运光和信号光的有效作用长度小于 PCF 的长度(34.5 m),信号光在 PCF 的后半段已经基本不再增长。这表明采用更长的 PCF 并不能提供更多的参量增益。抽运光和信号光的有效作用长度也小于抽运光脉冲和信号光脉冲的走离长度(23 m),在抽运光脉冲与信号光脉冲走离之前信号光已经无法获得有效增益了。这表明走离效应不是限制图 4 全光纤 OPO 系统转化效率的主要因素。

## 5 测量结果分析

通过加热 PCF 的水浴实验检验了参量增益分布测量方法的可靠性,进一步验证了 PCF 中抽运光和信号光的有效作用长度。在实验中将 PCF 分为前后两部分,通过水浴把前面一段 PCF 加热到 72 °C,后面的 PCF 仍处于室温(20 °C)之中,如图 10 所示。为了保持水浴的温度恒定,使用电加热盘(PC-6000, Corning)加热水浴。当水浴温度设定在 72 °C 时,水浴温度的变化速率小于 0.5 °C/h。加热会改变 PCF 的色散特性,改变 PCF 中信号光和抽运光的相位匹配条件,进而改变信号光的波长。此外,抽运光和信号光只能在温度相同的前半段 PCF 中保持相位匹配<sup>[21-22]</sup>,即抽运光和信号光的有效作用长度应等于 PCF 的加热长度。

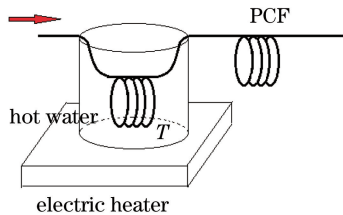


图 10 水浴加热 PCF 的示意图

Fig. 10 Scheme of heating PCF by bain-marie

分别加热 PCF 的前 10 m 和前 6 m 后测量了 OPO 腔的前向输出功率和输出光谱。未加热时,coupler2 前向端口输出的信号光功率为 5.0 mW;只加热前 10 m 的 PCF,coupler2 前向端口输出的信号光功率变为 4.7 mW,这表明加热前 10 m 的 PCF 对 OPO 系统的参量增益影响不大;只加热前 6 m 的 PCF,coupler2 前向端口输出的信号光功率变为 1.2 mW,这表明加热前 6 m 的 PCF 显著减小了 OPO 系统的参量增益。加热前后 OPO 腔的输出光谱如图 11 所示。

从图 11 可以看出,加热后 OPO 腔的输出光谱发生了变化,把 PCF 的前段从 20 °C 加热到 72 °C,改变了

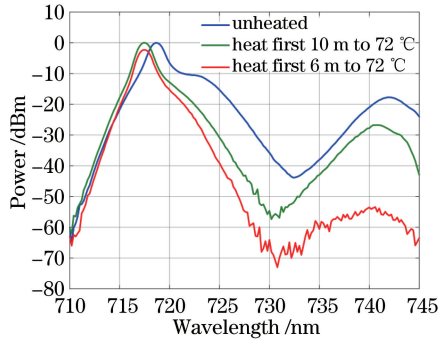


图 11 加热部分 PCF 后 OPO 腔的前向输出光谱

Fig. 11 Forward output spectrum of OPO in the case of PCF partly heating

PCF 中信号光和抽运光的相位匹配条件,导致信号光向短波长方向移动了 1.2 nm;加热 10 m 的 PCF 对信号光强度的影响较小,而加热 6 m 的 PCF 会显著降低信号光强度。根据第 4 节提供的参量增益分布测量方法分别测量了加热前 10 m 和加热前 6 m 的 PCF 情况下的后向散射信号,以及两种情况下的参量增益分布,结果如图 12 和 13 所示。

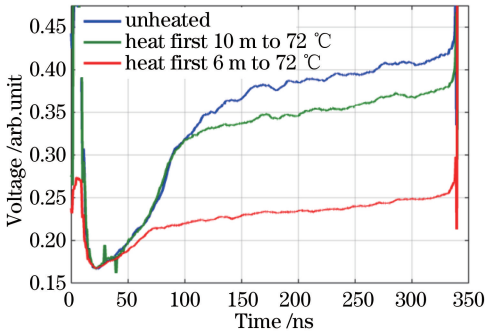


图 12 加热前/后 PCF 中的后向散射信号

Fig. 12 Backscatter signal of PCF before and after heating

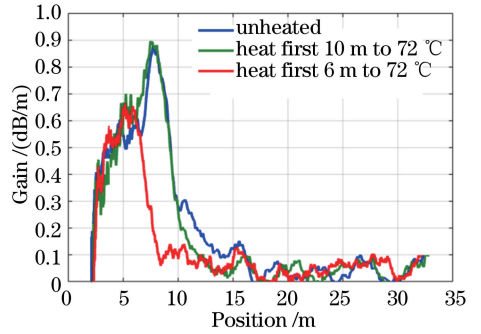


图 13 加热前/后 PCF 中的参量增益分布

Fig. 13 Parametric gain distribution of PCF before and after heating

从图 12 中可以看出,不加热和加热前 10 m 的 PCF 的情况下,信号光在 PCF 中的增长曲线相差不大,信号光在 PCF 的前 10 m 中快速增长;加热前 6 m 的 PCF 的情况下,信号光只在 PCF 的前 6 m 中快速增长。从图 13 中可以看出,不加热和加热前 10 m 的 PCF 的情况下增益分布基本相同,参量增益都是集中在 PCF 的前 10 m 中;加热前 6 m 的 PCF 的情况下,参量增益的确只集中在 PCF 的前 6 m 中。参量增益分布的测量结果与理论预期一致,验证了参量增益分布测量方法的可靠性。

## 6 结 论

由于制造工艺的限制,PCF 的结构参数和光学参数在纵向不可能完全一致,零色散波长微小的漂移就会破坏相位匹配条件,导致参量增益下降。OPO 腔中有害的非线性效应,会消耗抽运光功率和信号光功率,阻碍信号光功率的提升。根据光时域反射技术的原理,通过对后向散射光的探测,测量了信号光在 PCF 中的增长曲线,计算得到了 PCF 中的增益分布,确定了抽运光和信号光在 PCF 中相互作用的有效长度,并且通过水浴实验验证了测量结果。测量发现,在 34.5 m 的 PCF 中,有效作用长度仅有 10 m,信号光仅在 PCF 的前 10 m 获得了有效增益,近似以指数形式增长,在后 24.5 m 的 PCF 中信号光不再增长。所提供的参量增益测量方法对于优化全光纤 OPO 的结构、提高全光纤 OPO 的转化效率具有重要意义。

## 参 考 文 献

1 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of Terahertz wave based on optical methods[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(10): 1349-1359.

- 孙 博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1349-1359.
- 2 Li Weifan, Guo Baoshan, Shi Wei. Progress of terahertz parametric oscillator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090005.  
李惟帆, 郭宝山, 史 伟. 太赫兹参量振荡器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090005.
- 3 Miao Jieguang, Zhao Yanyan, Xu Zhijing, *et al.*. Study on dynamic characteristics of the passively Q-switched intracavity optical parametric oscillators[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0902007.  
苗杰光, 赵艳艳, 徐志敬, 等. 内腔式被动调 Q 光学参量振荡器动力学特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902007.
- 4 Li Peng, Ma Yayun, Nie Dandan, *et al.*. Continuous-wave single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser generated by a singly resonant optical parametric oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802008.  
李 鹏, 马亚云, 聂丹丹, 等. 利用单共振光学参量振荡器产生 1.5  $\mu\text{m}$  连续单频激光[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802008.
- 5 Yuan P, Ma J G, Wang Y Z, *et al.*. Pump phase transfer and its control in hybrid seeded optical parametric amplifiers [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2014, 2(4): e30.
- 6 Stolen R, Bjorkholm J. Parametric amplification and frequency-conversion in optical fibers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1982, 18(7): 1062-1072.
- 7 Stegeman G I, Stolen R H. Waveguides and fibers for nonlinear optics[J]. J Opt Soc Am B, 1989, 6(4): 652-662.
- 8 Sharping J E, Fiorentino M, Coker A, *et al.*. Four-wave mixing in microstructure fiber[J]. Opt Lett, 2001, 26(14): 1048-1050.
- 9 Sharping J E, Fiorentino M, Kumar P, *et al.*. Optical parametric oscillator based on four-wave mixing in microstructure fiber[J]. Opt Lett, 2002, 27(19): 1675-1677.
- 10 Sharping J E, Foster M A, Gaeta A L, *et al.*. Octave-spanning, high-power microstructure-fiber-based optical parametric oscillators[J]. Opt Express, 2007, 15(4): 1474-1479.
- 11 Sharping J E. Microstructure fiber based optical parametric oscillators[J]. J Lightwave Technol, 2008, 26(14): 2184-2191.
- 12 Cook K, Xiong C, Wadsworth W J. Enhanced four-wave mixing and parametric oscillation in photonic crystal fibre[J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2007, 9(11): 1095-1099.
- 13 Sloanes T, McEwan K, Lowans B, *et al.*. Optimisation of high average power optical parametric generation using a photonic crystal fiber[J]. Opt Express, 2008, 16(24): 19724-19733.
- 14 van der Westhuizen G, Nilsson J. Fiber optical parametric oscillator for large frequency-shift wavelength conversion[J]. IEEE J Quantum Electron, 2011, 47(11): 1396-1403.
- 15 Inoue K. Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region[J]. J Lightwave Technol, 1992, 10(11): 1553-1561.
- 16 Marhic M E, Wong K K, Kazovsky L G. Wide-band tuning of the gain spectra of one-pump fiber optical parametric amplifiers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2004, 10(5): 1133-1141.
- 17 Li Li, Li Shuli, Zhang Yunzhe, *et al.*. Study of Airy beams generated via four-wave mixing process in a homogeneous atomic medium[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 081406.  
李 莉, 李姝丽, 张云哲, 等. 均匀原子介质中四波混频产生艾里光束的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 081406.
- 18 Zhao Xingtao, Liu Xiaoxu, Wang Shutao, *et al.*. Phase-matching characteristic of photonic crystal fiber with three zero-dispersion wavelengths[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0906007.  
赵兴涛, 刘晓旭, 王书涛, 等. 三个零色散波长光子晶体光纤及相位匹配特性[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0906007.
- 19 Lei Jingli, Li Xiaoxiao, Wang Daobin, *et al.*. Design and study on characteristics of double-clad photonic crystal fibers with flattened dispersion[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s106002.  
雷景丽, 李晓晓, 王道斌, 等. 双包层平坦色散光子晶体光纤的设计与性能研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s106002.
- 20 Crisp J. Introduction to fiber optics[M]. Oxford: Newnes Press, 2001: 147-166.
- 21 Kudlinski A, Mussot A, Habert R, *et al.*. Widely tunable parametric amplification and pulse train generation by heating a photonic crystal fiber[J]. IEEE J Quantum Electron, 2011, 47(12): 1514-1518.
- 22 Wong K K, Marhic M, Kazovsky L. Temperature control of the gain spectrum of fiber optical parametric amplifiers[J]. Opt Express, 2005, 13(12): 4666-4673.