

doi: 10.3788/gzxb20174607.0706006

# 基于开槽型 DBR 光纤激光器拍频的折射率探测

李蒙蒙, 刘博, 梁贻智, 梁浩, 李杰, 关柏鸥

(暨南大学 光子技术研究院, 广州 510632)

**摘 要:**提出一种包层开槽型分布布拉格反射光纤激光器,用于光纤激光折射率探测.该激光器以单纵模双偏振分布布拉格反射光纤激光器为核心传感单元,以结构双折射产生的拍频信号为传感信号对折射率进行探测.实验中应用频率编码,灵敏度高且易于解调.利用二氧化碳激光器的热效应对分布布拉格反射光纤激光器的谐振腔加工开槽,通过控制其扫描范围和功率来制备不同宽度和深度的开槽结构,并研究了不同结构参量对灵敏度特性的影响.实验测得最优灵敏度达 $-240$  MHz/RI-unit.此外,还对该结构的温度传感特性做了测试,相较于未刻槽结构,温度灵敏度提高了 $21\%$ ,达 $1.73$  MHz/ $^{\circ}\text{C}$ .该装置结构紧凑、稳定性高、制备简单且成本低廉,可用于进一步研究分布布拉格反射光纤激光器的传感和复用特性.

**关键词:**光纤光学;光纤传感;二氧化碳激光器包层开槽;分布布拉格反射光纤激光器;拍频;折射率探测;全光纤传感

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)07-0706006-6

## Refractive Index Detection Based on Beat-frequency of Cladding-carved DBR Fiber Lasers

LI Meng-meng, LIU Bo, LIANG Yi-zhi, LIANG Hao, LI Jie, GUAN Bai-ou

(Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** A kind of cladding-carved Distributed Bragg Reflection (DBR) fiber laser was proposed for fiber laser refractive index detection. The core sensing unit is a single longitudinal mode dual polarization DBR fiber laser, the beat signal generated by the structure birefringence is used as the sensor signal to detect the refractive index. Frequency coding using in the experiment has the advantages of high sensitivity and is easy to demodulate. Using the thermal effect of the  $\text{CO}_2$  laser can carve the cavity of DBR fiber laser. The effects of different structural parameters on the sensitivity characteristics were studied by controlling the scanning range and the power of the  $\text{CO}_2$  laser. The effects of different structural parameters on the sensitivity characteristics were studied. The measured optimum sensitivity is  $-240$  MHz / RI-unit. In addition, the temperature sensing characteristics of the structure were tested, and the sensitivity was increased by  $21\%$  to  $1.73$  MHz/ $^{\circ}\text{C}$ , compared to the non-carved structure. The device has the advantages of compact structure, high stability, simple preparation and low cost, and can be used to further study of the sensing and multiplex characteristics of DBR fiber lasers.

**Key words:** Fiber optics; Fiber optics sensors;  $\text{CO}_2$  laser cladding-carved; Distributed bragg reflection fiber laser; Beat frequency; Refractive detection; All-fiber sensor

**OCIS Codes:** 060.2370; 060.3738; 060.2840; 060.3510

## 0 引言

分布布拉格反射(Distributed Bragg Reflection, DBR)光纤激光器是在有源光纤上刻写两个高反射的光

基金项目:国家自然科学基金(No. 61575083)和广东省自然科学基金(No. 2014A0303133)资助

第一作者:李蒙蒙(1990-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email:1046028092@qq.com

导师(通讯作者):李杰(1979-),男,研究员,主要研究方向为微纳光子器件,光纤传感技术和微结构光纤. Email:tjeli@jnu.edu.cn

收稿日期:2017-01-12;录用日期:2017-03-23

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

纤布拉格光栅,两光栅之间留有一个谐振腔,具有结构紧凑、单纵模工作、能长时间稳定工作、可复用等优点,在光传感和通信领域受到青睐. DBR 光纤激光器可以用两个正交偏振模之间的拍频来测量外界物理量的变化,例如测量扭转角度<sup>[1-2]</sup>、横截面压力<sup>[3-4]</sup>、温度<sup>[5]</sup>、高频超声波<sup>[6-7]</sup>等. 与传统传感器不同,光纤有源传感器利用基于光纤光栅的激光器作为基本传感单元组成. 与无源光纤传感器相比,有源传感器有很多特殊的优点例如高信噪比、高输出功率和窄输出线宽等<sup>[8-11]</sup>. 此外,单纵模 DBR 激光器产生的拍频是在射频域,很容易被探测,这可以避免在无源光纤光栅器件中必不可少的昂贵的波长测量. 基于拍频和波长解调,光纤有源传感器可以实现多参量的同时测量<sup>[12]</sup>. 此外,有源传感器可提供高输出功率,使得其器件可以应用于大规模网络传感. 然而,由于激光模大部分被限制在光纤纤芯区域,激光对外界折射率的变化几乎没有反应,因此需要对 DBR 光纤激光器谐振腔进行加工处理,方法包括腐蚀法<sup>[13]</sup>和二氧化碳激光器加工法<sup>[14-15]</sup>. 从加工工艺和控制技术而言,利用二氧化碳激光器对光纤进行加工既方便控制加工参量,又能很好地降低传输损耗. 对短腔 DBR 光纤激光器的谐振腔进行开槽需要较高的精确度以避免对两侧光栅的损害,然而目前尚无基于拍频的 DBR 光纤激光器对折射率传感特性的报道.

本文提出了一种探测外界折射率的双频分布布拉格反射光纤激光器,在其激光器的谐振腔内用二氧化碳激光器微加工技术刻写开槽. 利用偏振模进行外界折射率的测量. 其原理是通过将外界折射率的变化转化成激光腔内双折射的改变,进而引起两个正交偏振态之间的拍频变化. 测量到的最优折射率灵敏度达一 240MHz/RI-unit,此外还分析了开槽参量的不同对折射率灵敏度的影响,以及开槽对温度传感特性的影响.

## 1 开槽型 DBR 光纤激光器制备与原理分析

图 1 是实验所用开槽型 DBR 光纤激光器的结构原理. 实验所用光纤是铟镱共掺光纤(CORACTIVE, EY 305),光纤纤芯直径约  $7\ \mu\text{m}$ ,包层直径为  $125\ \mu\text{m}$ ,峰值吸收参量约为  $22\ \text{dB/m}@1\ 535\ \text{nm}$ . 在该光纤中铟的掺杂量远远高于铱的掺杂量. 利用相位掩模法,使用  $193\ \text{nm}$  的氟化氩准分子激光器和掩模板(周期:  $1\ 068.8\ \text{nm}$ )在未载氢的铟镱共掺光纤上刻写一对波长匹配的高反射率的光纤布拉格光栅,其中一个光栅长度为  $4\ \text{mm}$ ,反射率达  $99.8\%$ ,作为低反射端;另一个光栅长  $5\ \text{mm}$ ,反射率达  $99.9\%$ ,作为高反射端. 两个光纤布拉格光栅之间的长度为  $4\ \text{mm}$ ,作为激光器的谐振腔,光纤光栅总长仅  $13\ \text{mm}$ ,结构紧凑,便于实现单点测量和大规模网络应用. 利用宽带光源(Broadband Source, BBS)和光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)来观测写制光栅的透射谱,并以此控制光纤光栅的刻写过程. 在刻写过程中,采用光速扫描写制技术,保持光纤和相位掩模板固定,步进电机控制紫外激光束的移动,移动速度为  $0.02\ \text{mm/s}$ ,紫外光脉冲频率为  $100\ \text{Hz}$ ,紫外光能量为  $2.5\ \text{mJ}$ . 该技术有利于高、低反端光纤光栅的调制深度一致,从而使得产生的激光中心反射波长严格一致. DBR 光纤激光器谐振腔内有一个主导模式起振,其它模式被抑制掉,所以 DBR 光纤激光器在单个模式下运转,即产生单纵模输出,故具有良好的稳定性.

为了增强激光模的倏逝场作用,在对刻好的 DBR 光纤激光器进行高温退火处理(温度:  $230\ ^\circ\text{C}$ ,时长:  $2\ \text{h}$ )以释放内部应力后,在 DBR 光纤激光器的谐振腔内用二氧化碳激光器进行开槽,实验中用到的二氧化碳激光器的最大输出是  $50\ \text{W}$ ,实验中设置的功率为最大功率的  $15\%$ . 一个直径约  $50\ \mu\text{m}$  的锡化锌透镜被用来作为二氧化碳激光与光纤表面之间的聚焦. 在扫描阵镜的控制下,二氧化碳激光束可以沿着光纤纵向或横向移动,从而制备出不同参量的槽. 刻写过程中,二氧化碳激光束必须准确地瞄准光纤激光器的腔,从而避免损坏两侧的光栅. 石英光纤可以吸收二氧化碳激光束的能量,并且产生大量的热,从而能够在光纤上进行开槽. 由于二氧化碳激光束的热效应,制备出的结构表面具有良好的平整性,这可以大大降低光在传输中的损耗. 加工结构可以通过调整二氧化碳激光器的功率大小、扫描次数和激光束的扫描长度来改变. 在整个制备过程都使用 CCD 相机来实时监控. 图 1(b)是制备好的 DBR 光纤激光器的横截面,原始的圆柱形结构被破坏. 在本实验中,槽的参量是  $\omega_1 = \omega_2 = 62\ \mu\text{m}$ ,  $W$  分别为  $1.7\ \text{mm}$  和  $2.6\ \text{mm}$ ,  $h$  分别为  $20\ \mu\text{m}$  和  $41\ \mu\text{m}$ .

图 1(c)展示了包层开槽的分布布拉格反射光纤激光器的实验设置.  $980\ \text{nm}$  泵浦光经过  $980/1\ 550\ \text{nm}$  波分复用器(WDM)入射到 DBR 光纤激光器,产生的  $1\ 550\ \text{nm}$  附近的激光再反方向经过波分复用器和  $3\ \text{dB}$  耦合器(Coupler)之后,一部分光被光谱仪(OSA)接收,用来分析在二氧化碳激光器加工过程中工作波长与能量的变化趋势,光谱仪分辨率设置为  $0.02\ \text{nm}$ . 而另外一部分光被高速光电探测器(PD)转换成电信号之后用频谱仪进行分析. 隔离器(Isolator)用来防止光反射回传,偏振控制器(PC)是用来调整光的偏振态.

激光腔的谐振条件为:  $2n_i W \cdot F + 2n'_i W' \cdot F = mc$ , 其中  $n_i$  和  $W$  分别为激光腔开槽部分的有效折射率和长度,  $n'_i$  和  $W'$  分别为谐振腔未开槽部分的有效折射率和光纤光栅有效腔长,  $i=x$  或  $y$  分别表示两个不同的偏振态,  $m$  表示谐振模式的阶数.  $F=c/\lambda$  表示激光频率,  $\lambda$  为波长,  $c$  是光在真空中的传播速度. 只有满足谐振腔的共振条件和两个光栅(FBG)的反射条件时才会产生具有两个偏振态的激光. 总腔长  $W_{\text{cavity}} = W + W'$ ,  $W$  值的大小约为图 1(a)中的  $W$ , 对于开槽和未开槽部分, 两个偏振模的平均有效折射率为  $n = (n_x + n_y)/2$  和  $n' = (n'_x + n'_y)/2$ , 对于所加工的样本  $h \leq 41 \mu\text{m}$ , 开槽部分对有效折射率起到一个很小的作用, 故  $|n - n'|/n \ll 1$ , 通过对激光腔的谐振条件进行分析可得两个偏振模之间的拍频为

$$f = \frac{F}{nW_{\text{cavity}}} |BW \pm B'W'| \quad (1)$$

双折射  $B = |n_x - n_y|$  是由光纤几何结构的非对称产生, 双折射  $B' = |n'_x - n'_y|$  主要由光纤内部的残余应力引起. 等号右侧的“+”和“-”分别表示沿快轴和慢轴开槽的水平和垂直两个状态. 从式(1)中可以看出, 拍频主要取决于双折射和开槽与未开槽部分的相对长度.

激光腔开槽后, 部分激光倏逝场会泄露到空气中, 并与周围介质产生相互作用, 在本实验中, 外界折射率  $n_{\text{ex}}$  会对激光模式的有效折射率产生影响, 从而导致式(1)中拍频的变化. 拍频的响应与外界折射率变化可由式(2)分析得出, 即

$$S = \frac{df}{dn_{\text{ex}}} = \frac{F}{n} \frac{W}{W_{\text{cavity}}} \frac{\partial B}{\partial n_{\text{ex}}} \quad (2)$$

式中,  $S$  表示灵敏度, 其大小主要由光频  $F$ , 激光腔的有效折射率  $n$ , 外界折射率引起的拍频变化  $\partial B/\partial n_{\text{ex}}$  和开槽部分与腔长的相对长度  $W/W_{\text{cavity}}$  决定. 研究显示开槽越深,  $\partial B/\partial n_{\text{ex}}$  越大. 故开槽部分的宽度  $W$  和深度  $h$  是本实验影响折射率灵敏度的主要因素.

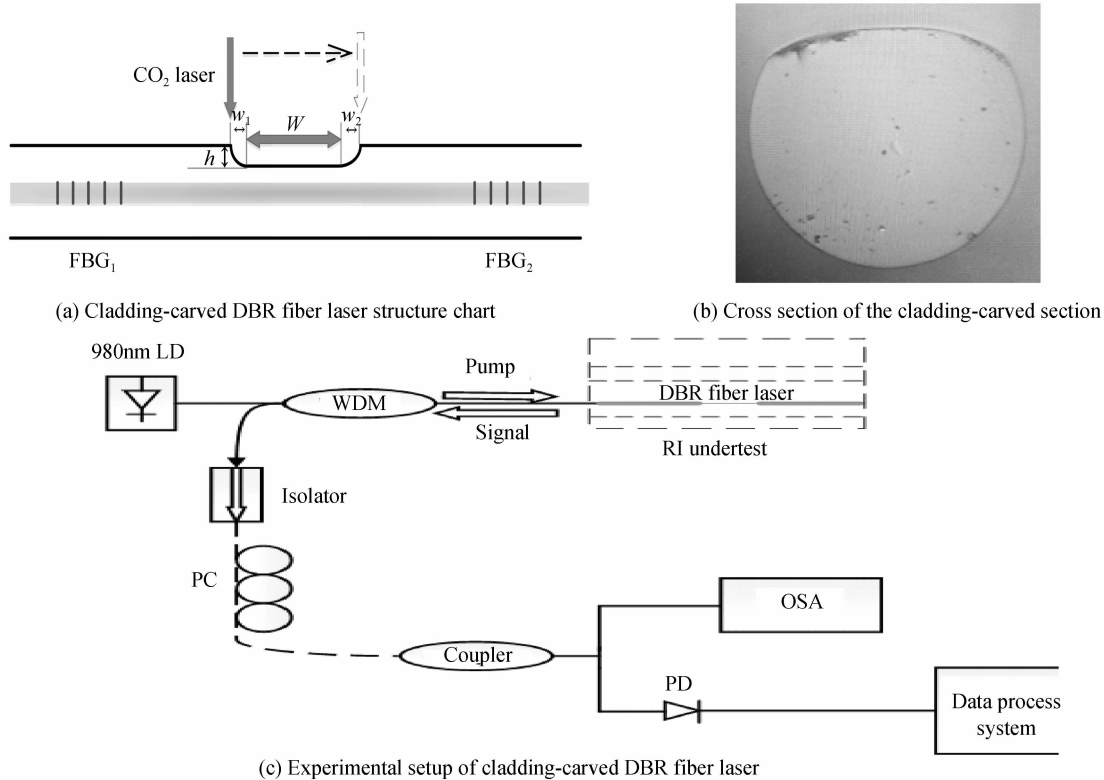


图 1 开槽型 DBR 光纤激光器结构及实验装置

Fig. 1 Cladding-carved DBR fiber laser structure and experimental setup

## 2 CO<sub>2</sub> 激光器加工过程现象分析

图 2(a)展示的是室温下随着二氧化碳激光器扫描加工次数  $N$  的增加拍频的漂移变化趋势. 开槽宽度约为 2.0 mm. 在实验测量中, 刻写之前的拍频大约是 2.68 GHz. 当二氧化碳激光器沿着慢轴加工时, 拍频的

变化趋势是先变小后变大. 拍频的变小是因为光纤几何形状的变化所产生的几何双折射在一定程度上对其内在的双折射进行补偿,随着加工次数的逐渐增大,几何双折射也逐渐增大并占据了主导地位,因此拍频会逐渐增大. 当沿着光纤的快轴对谐振腔进行加工时,由于几何双折射与光纤内在双折射方向一致,其叠加效果表现为随着二氧化碳激光器扫描次数的增加,光纤激光器的拍频逐渐增大. 实验过程中,当加工次数太小,即  $h$  较小时,拍频信号对外界折射率灵敏度的响应度不高;而当加工次数太多,即  $h$  较大时,会出现较大的损耗,影响激光的产生. 因此,在该实验中所采取的加工次数在  $10 \sim 30$  之间,所对应的深度  $h$  在  $5 \sim 41 \mu\text{m}$ . 实验数据显示二氧化碳激光器加工方向的不同对光纤激光器的拍频有着不同的影响,沿慢轴开槽的光纤激光器的折射率灵敏度相比于沿快轴开槽要高,约为其 1.5 倍,故本实验中后续实验样本皆沿慢轴进行加工,以确保获取最优折射率灵敏度. 以图 2(b) 为例,是二氧化碳激光器加工前后的两个正交偏振模之间的拍频信号在射频域的展示. 本图中是二氧化碳激光器沿着光纤的快轴进行加工,加工次数为 9 次. 得到的拍频漂移是约 0.5 GHz.

图 2(c) 是开槽宽度为 2 mm, 深度为  $41 \mu\text{m}$  的二氧化碳激光加工前后激光光谱的变化图. 加工前激光器中心波长为 1550.4 nm, 功率  $-20.06 \text{ dBm}$ , 加工后中心波长蓝移 0.2 nm 至 1550.2 nm 处, 且激光功率下降至  $-28.7 \text{ dBm}$ . 在二氧化碳激光加工过程中, DBR 光纤激光器激光功率随着扫描次数的增加先上升后下降, 这是因为在开始的扫描中, 二氧化碳激光照射使得 DBR 光纤激光腔内原有应力释放, 传输损耗下降, 故功率上升. 随着扫描次数的增加, 由于光纤表面倏逝场和新的应力的形成, 激光功率逐渐下降. 由式(1)可知, 开槽后有效折射率下降, 从而引起激光工作频率上升, 故波长产生蓝移现象.

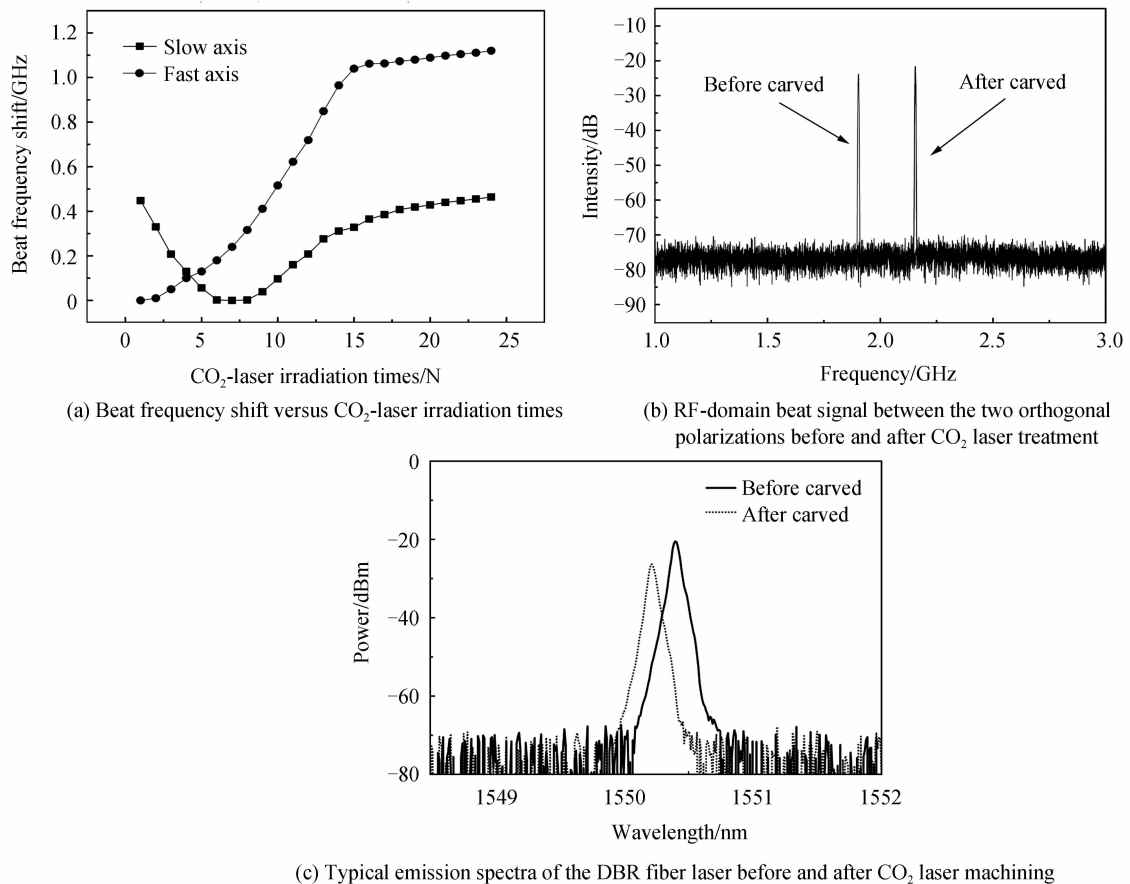


图 2 二氧化碳激光器加工过程波长与拍频的变化

Fig. 2 Wavelength and beat frequency shift during  $\text{CO}_2$  machining

### 3 实验结果及分析

实验研究了一系列包层开槽的 DBR 光纤激光器来进行基于拍频的外界折射率测量. 实验之前对 DBR 光纤激光器的功率、中心波长与拍频信号进行了时长为 3 h 的稳定性监测, 其中功率的波动范围约为 0.1 dB,

中心波长的波动范围约为 0.01 nm,拍频的波动范围约为 200 kHz,具有较好的稳定性.实验中仅对水溶液的折射率进行了测量,其最低折射率为水的折射率 1.33,随着溶液浓度的增加折射率升高,而当溶液折射率接近光纤石英材料的折射率 1.45 时,可能使光纤激光器的腔内损耗变大,另一方面溶液过于粘稠,保证其均匀度和测量准确性,因此在实验中,选择丙三醇水溶液,通过调整丙三醇与水的比例改变溶液折射率大小,折射率范围为 1.33~1.41.溶液的折射率通过标准折射率计进行校正.温度与折射率会对传感器造成相互干扰,在测试折射率灵敏度时,严格控制周围环境温度并使其保持不变.

图 3 展示了在不同加工结构参量下对折射率的测量数据,图中点为实验数据,直线是线性拟合的结果.第一组数据结构参量为槽宽  $W$  为 1.7 mm,槽深  $h$  为 41  $\mu\text{m}$ (方形图标),折射率灵敏度为  $-149.6 \text{ MHz/RI-unit}$ ;第二组数据结构参量为  $W$  为 2.6 mm, $h$  为 20  $\mu\text{m}$ (圆形图标),折射率灵敏度为  $-163.8 \text{ MHz/RI-unit}$ ;第三组数据结构参量为  $W$  为 2.6 mm, $h$  为 41  $\mu\text{m}$ (三角形图标),折射率灵敏度为  $-240.4 \text{ MHz/RI-unit}$ .由第一组与第三组数据的对比可知,在  $h$  相同的情况下,增加槽宽  $W$ ,该传感器对外界折射率的灵敏度也随之增大.这是因为  $W$  的变大使得结构双折射也变大,而对外界折射率的探测主要依赖于结构双折射的变化,结构双折射的变大导致拍频对外界折射率的变化更加敏感,故灵敏度更高.由第二组与第三组数据的对比可知,在  $W$  相同时,当槽深  $h$  变大后,折射率灵敏度也变得更大,这是因为当  $h$  变大时,可以有更多的倏逝场泄漏出,两个正交模之间的拍频也对外界折射率变化的传感特性更好.测量所得的最优灵敏度是  $-240.4 \text{ MHz/RI-unit}$ .

此外,还研究了无开槽的 DBR 光纤激光器与开槽后( $W=2.99 \text{ mm}$ , $h=31 \mu\text{m}$ )对温度的传感特性,测试温度范围为 30~100 $^{\circ}\text{C}$ ,由图 4 可知,随着温度的升高,拍频呈现很好的线性下降趋势,灵敏度分别为 1.43  $\text{MHz/}^{\circ}\text{C}$ (未开槽)和 1.73  $\text{MHz/}^{\circ}\text{C}$ (开槽),灵敏度提高了 21%,该差异是由光纤腔开槽后应力分布变化引起的.

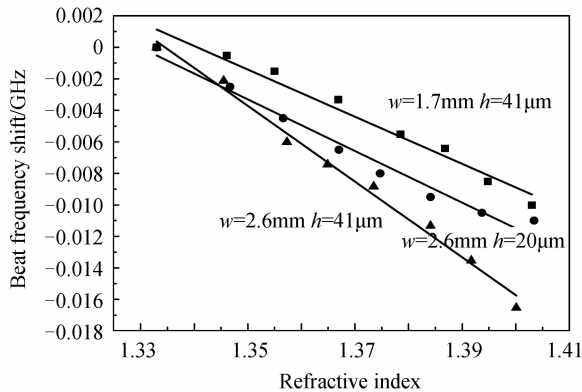


图 3 不同参量下拍频对折射率变化的响应  
Fig. 3 Response of beat frequency to refractive index at different parameters

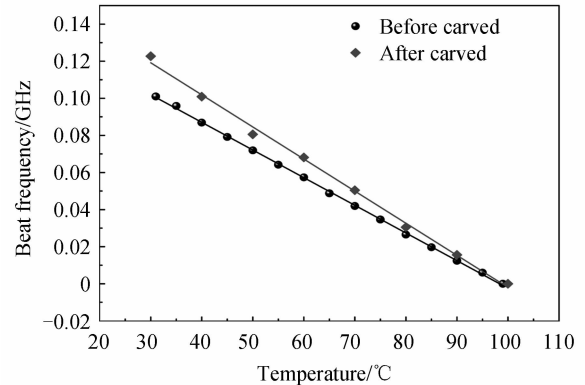


图 4 未开槽与开槽参量为  $W=2.99 \text{ mm}$ , $h=31 \mu\text{m}$  的 DBR 光纤激光器对温度的传感特性对比  
Fig. 4 Comparison of temperature sensing between the carved DBR fiber laser with  $W=2.99 \text{ mm}$  and  $h=31 \mu\text{m}$  and uncarved DBR fiber laser

## 4 结论

研究了一种包层开槽的分布布拉格反射光纤激光器,利用二氧化碳激光器的热效应在光纤激光器的谐振腔包层进行开槽.由于结构双折射的变化可以利用两个正交偏振态之间的拍频信号对外界折射率进行测量.对不同槽宽和槽深的结构分别进行实验,实验结果展示了折射率灵敏度与开槽结构之间的关系,并测量到最大折射率灵敏度为约  $-240 \text{ MHz/RI-unit}$ .研究了短腔双频 DBR 光纤激光器的拍频信号对折射率的传感特性,并提升了温度传感特性,灵敏度可达 1.73  $\text{MHz/}^{\circ}\text{C}$ ,相对未刻槽结构提升了 21%.实验结果对更加深入地研究 DBR 光纤激光器的传感和复用特性具有一定的科研意义和参考价值.

## 参考文献

- [1] SONG Xiao-yan, ZHANG Wen-tao, LI Fang, *et al.* Experimental investigation of bending characteristics of distributed feedback fiber lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 807-810.

- 宋晓燕, 张文涛, 李芳, 等. 分布反馈光纤激光器弯曲特性的实验研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(6): 807-810.
- [2] WANG Dong-yuan, SUN Ming-ming, JIN Yong-xing, *et al.* Simultaneous measurement of curvature and temperature based on optical fiber sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 20-24.  
王栋远, 孙明明, 金永兴, 等. 同时测量温度和曲率的光纤传感器[J]. 光子学报, 2015, **44**(11): 20-24.
- [3] LIU S, YIN Z, ZHANG L, *et al.* A dual-wavelength DBR fiber laser strain sensor [C]. Opto-Electronics and Communications Conference, 2009. OECC 2009. 14th. IEEE, 2009: 1-2.
- [4] GUAN B O, JIN L, ZHANG Y, *et al.* Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors[J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2012, **30**(8): 1097-1112.
- [5] MEN Zhi-wei, ZHANG Xi-he, FANG Wen-hui, *et al.* Study on the characteristic of fiber bragg grating sensing in low temperature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1191-1194.  
门志伟, 张喜和, 房文汇, 等. 光纤布喇格光栅低温传感的特性研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(6): 1191-1194.
- [6] LYU C, WU C, TAM H Y, *et al.* Polari metric Heterodyning fiber laser sensor for directional acoustic signal measurement[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 18273-18280.
- [7] COMANECI M I, ZHANG L, CHEN L R, *et al.* All-fiber DBR-based sensor interrogation system for measuring acoustic waves[J]. *Journal of Sensors*, 2012, **2012**(8): 276-283.
- [8] WO J, WANG, H, SUN Q, *et al.* Pulse beat monitoring using dual-polarization DBR fiber[J]. *Laser Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, 2013: 1-2.
- [9] DU Z, LU L, ZHANG W, *et al.* Measurement of the velocity inside an all-fiber DBR laser by self-mixing technique[J]. *Applied Physics B*, 2013, **113**(1): 153-158.
- [10] ADOMAT M, AHLFELDT H, BROBERG B, *et al.* Wavelength stabilization of DBR laser using a fiber with multiple gratings[C]. European Conference on Optical Communication, IEEE. 1998, 1: 161-162
- [11] LIU Ying-gang, CHE Fu-long, JIA Zhen-an, *et al.* Investigation on the characteristics of micro/nanofiber Bragg grating for refractive index sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(10): 104218.  
刘颖刚, 车伏龙, 贾振安, 等. 微纳光纤布拉格光栅折射率传感特性研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(10): 104218.
- [12] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [13] LI J, LIU B, SUN L P, *et al.* Study of lateral-drilled DBR fiber laser and its responsivity to external refractive index [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(9): 9473-9479.
- [14] SHAO L. Y, LAU S. T, DONG X, *et al.* High-frequency ultrasonic hydrophone based on a cladding-etched DBR fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(8): 548-550.
- [15] LI M, JIN L, GUAN B O. Wavelength/frequency-division mmultiplexing of heterodyning fiber grating laser sensors with the assistance of Co2-laser treatment[C]. SPIE, 2012, **8421**: 84211N.