

doi: 10. 3788/gzxb20164508. 0814005

分布反馈光纤激光器封装工艺

宋志强, 王伟涛, 祁海峰, 郭健, 倪家升, 王昌

(山东省科学院激光研究所 山东省光纤传感技术重点实验室, 济南 250014)

摘 要: 分析了分布反馈光纤激光器的声波敏感机理, 发现阻断“弦”结构对声振动的传递和响应是隔声隔振封装工艺的关键. 根据分析设计了一种主体为弧形中性轴线槽的封装结构, 分布反馈光纤激光器有源相移光栅在一定预拉力下粘结固定在封装结构的槽中, 光栅各点均贴附在弧形平面上. 实验结果表明, 这种结构有效消除了声致弯曲等效应的影响, 使激光器窄线宽特性在外界声波和振动冲击下能够得到良好保持. 同时, 实现了激光波长大范围的温度调谐, 波长温度调谐系数由 $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 提高到 $30 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 以上, 且激光器输出性能稳定.

关键词: 光纤激光器; 分布反馈光纤激光器; 有源相移光纤光栅; 隔声隔振; 频率调制

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0814005-4

Packaging Technology of Distributed Feedback Fiber Laser

SONG Zhi-qiang, WANG Wei-tao, QI Hai-feng, GUO Jian, NI Jia-sheng, WANG Chang

(Key Lab of Optical fibre sensing technology, Laser Institute of Shandong Academy of Science, Jinan 250014, China)

Abstract: The acoustic sensitivity mechanism of distributed feedback fiber laser was analyzed. The key technology of acoustic isolation and vibration isolation is to blocking-up the transfer and impact to the structure of string. According to the analysis results, a packaging structure of the main body for the arc neutral axis slot was designed. The active phase shifted fiber Bragg grating of distributed feedback fiber laser is fixed in the slot of the package structure under a certain pre-tension. The fiber Bragg grating is attached to each point on the curved plane. The experimental results show that the effect of sound bending and other effects are effectively eliminated by the proposed structure. Laser line-width will not be broadened under acoustic and vibration shock. Moreover, the wavelength temperature tuning coefficient is increased from $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ to $30 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, the output performance of distributed feedback fiber laser is stable.

Key words: Fibre laser; Distributed feedback fibre laser; Phase shifted fiber Bragg grating; Acoustic and vibration isolation; Frequency modulation

OCIS Codes: 140.3490; 060.2310; 060.3510; 060.3715

0 引言

分布反馈光纤激光器(Distributed Feedback Fiber Laser, DFB-FL)是一种窄线宽光纤激光器,它以单一的有源相移光纤光栅作为增益介质和谐振腔,具有线宽窄、噪声低、结构简单等优点,同时它对外界的声波、振动、温度等极其敏感,因此长期作为地震检波器、水听器等有源光纤传感器来研究^[1-5].近年来,随着分布式光纤传感技术的发展,作为系统光源的窄线宽激光

器也越来越被重视,DFB-FL作为一种重要的窄线宽激光器引起了研究者们广泛的关注.但它优良的环境敏感性成为影响激光稳定性的负面因素,因此,必须对其有源相移光纤光栅进行有效的隔声隔振封装才能满足激光器的应用要求.2009年,谭波^[6]等报道了DFB-FL的动态特性,研究了DFB-FL在预紧状态下对振动频率的敏感特性.2011年,SONG Xiao-yan^[7]等报道了DFB-FL的弯曲特性的实验研究,指出声致弯曲是影响激光器频率稳定性的重要因素.2012年,倪家升^[8]等

基金项目:国家自然科学基金(No. 61307101)和山东省重点研发计划项目(No. 2015GGX101001)资助

第一作者:宋志强(1982-),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为光纤光栅和光纤激光器. Email: szq821214@163.com

通讯作者:王昌(1976-),男,研究员,博士,主要研究方向为光纤传感技术. Email: wang960100@163.com

收稿日期:2016-02-02;录用日期:2016-05-24

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

分析了分布反馈光纤激光器的线宽特性及展宽机理,指出外界环境扰动是影响DFB-FL线宽的重要因素.2011年,薛力芳^[9]等报道了一种具有放大结构和压电陶瓷调制功能的DFB-FL,调制频率达到2kHz,但激光光线宽较宽,并且未说明如何保证线宽稳定.2013年,赵强^[10]等报道了一种DFB-FL的光热调谐方法,静态调谐幅度可达392MHz/100mA,动态调谐速率大于2kHz.目前,尽管围绕DFB-FL环境敏感性和调制特性已有大量研究,但对DFB-FL作为激光光源的隔声隔振封装方面的研究报道很少.丹麦NKT公司实现了性能稳定可靠的窄线宽DFB-FL产品,但作为DFB-FL实用化的核心技术工艺,隔振隔振封装工艺的技术介绍鲜有报道^[11-12].

本文在分析DFB-FL声波敏感机理的基础上,结合实验设计了一种隔声隔振封装结构,它能保证激光光线宽在外界扰动下不会展宽,同时具有激光频率的温度和压电陶瓷(Piezoelectric ceramic, PZT)应变调谐功能,能够将DFB-FL变为实用化的窄线宽激光光源.

1 DFB-FL 声波敏感机理

DFB-FL的核心为有源的 π 相移光纤光栅,同时起增益介质、谐振腔和选频器件的作用.它具有“弦”的细长型结构,声音和振动产生的扰动会沿着光纤传播,在光纤上引起弦振、微弯和驻波等效应,这些效应会影响光纤光栅的周期性结构和相移精确度^[13-14].而DFB-FL的激光波长和线宽主要由光栅布喇格波长和由相移引起的光谱透射窗口决定,光栅周期性结构的变化和不稳定将会导致激光波长的漂移和线宽的展宽.DFB-FL对声波和振动的敏感性使其成为优良的传感器件,但用作窄线宽光源则必须消除这种效应.实验中发现,将有源相移光纤光栅悬空拉紧,“弦”结构对声波敏感性变强,激光光线宽变化会更加剧烈,而将它弯曲并贴附在光滑平面上时,“弦”的结构会被打破,光栅各点存在切向的张力,使声波振动引起的弦振、微弯和驻波等效应明显减弱,从而激光波长和线宽不再急剧变化.因此,对DFB-FL有源相移光纤光栅的隔声隔振封装,主要在于如何屏蔽和消除声波振动在光纤上的传播和影响.

2 结构设计及实验

根据DFB-FL声波敏感机理分析,设计了一种主体为弧形中性轴线槽的封装结构,其结构示意图如图1.封装材料为导热性好的长方体铝材,DFB-FL长度一般为20~50mm,封装体长度需两端各超出5mm作为胶合区,为使热容量不至于过大,其体积应尽量小.从材料顶部中间开槽至结构中轴线,根据梁的弯曲理论^[15],中性轴具有在结构弯曲形变时长度不变的特

点.槽底面不是等深的,而是半径1m的中凸的圆弧.在材料底部中间开槽,槽的尺寸刚好能够放置一PZT,PZT的伸缩方向与弧形槽相同.对DFB-FL的有源相移光纤光栅施加一定的预拉力,将尾纤分别用环氧树脂固定在弧形槽的两端,并用导热硅脂将槽完全填实.

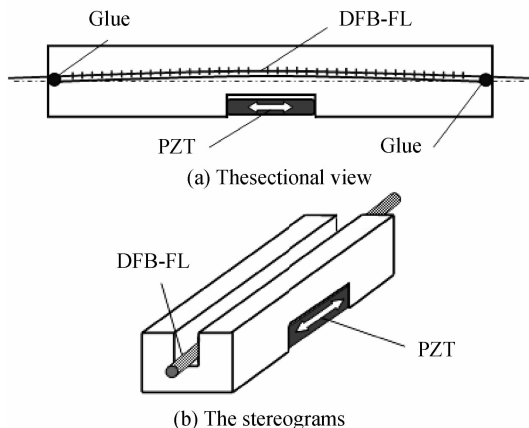


图1 封装结构示意图

Fig. 1 The block diagram of the package structure

封装前后测量到的DFB-FL的输出功率和泵浦光剩余功率如图2,激光器斜率效率和泵浦光损耗会影响DFB-FL的后续功率放大效果^[16],而从图2可以看出,所采用的封装方式没有明显地影响斜率效率和泵浦光剩余率.

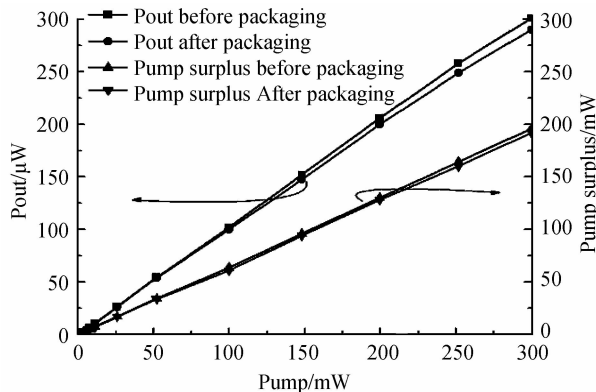


图2 DFB-FL 功率输出情况

Fig. 2 The output power of the DFB-FL

封装工艺要解决的关键问题是DFB-FL的隔声隔振,对同一DFB-FL在封装前后施加相同扰动的情况下激光光线宽的变化情况如图3.图3(a)中,将封装前的DFB-FL自由放置在光学平台上,用手电钻冲击光学平台,产生的声音和振动会同时影响激光光线宽的测量,得到扰动前后激光光线宽的测量值,激光光线宽增大2倍,并且非常不稳定.图3(b)为对应的封装后的实验,可见激光光线宽没有变宽,并且在动态测量过程中一直很稳定.这说明采取的弧形中性轴线封装结构具有良好的隔声隔振效果.

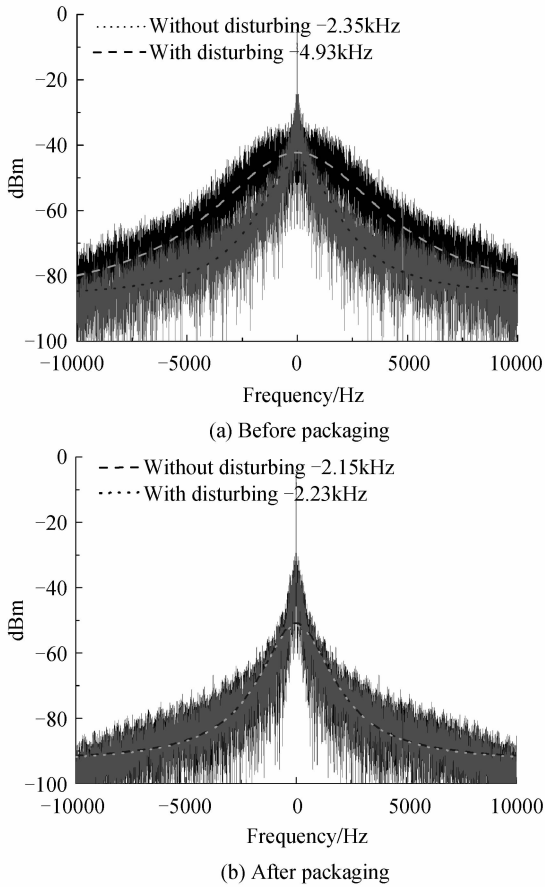


图3 激光线宽变化情况

Fig. 3 The Line-width changing before and after packaging

同时,测量了DFB-FL封装前后,激光波长与温度的关系曲线,如图4.封装前,激光波长随温度变化的系数为 $9.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,与普通光纤光栅的温度响应系数相当.而封装后,由于有源相移光纤光栅粘结在铝材结构上,其温度响应系数将与整个结构体相关,此处实测的激光波长温度响应系数为 $33.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,相比封装前变大了3倍多.需要说明的是,不同的封装材料和结构尺寸,会产生不同的激光波长温度响应.进一步用波长计测量了封装后DFB-FL在 20°C 温控下激光波长的短期稳定性,由于封装结构体相对于裸光纤热容更大,因

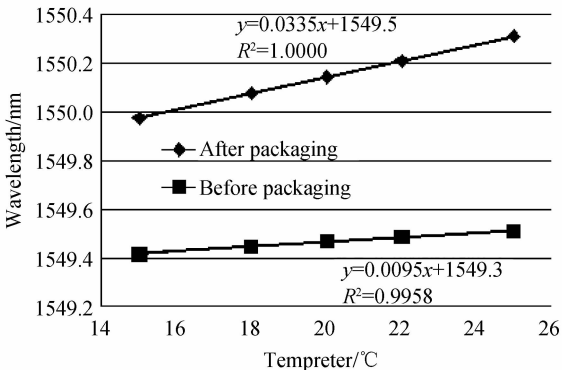


图4 激光波长与温度关系曲线

Fig. 4 The curve of laser wavelength and temperature

此在稳定的温度控制下波长稳定性高,如图5.在此过程中,仍然将手电钻产生的声波和振动施加到激光器上,激光波长不会受影响而发生变化,而用手触碰封装体时,激光波长会由于温度的变化而变化,但很快又会趋于稳定.

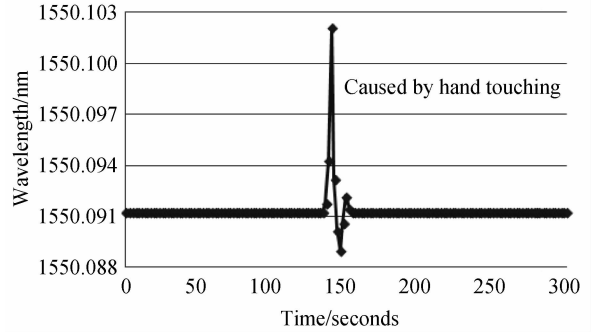


图5 温控下激光波长的稳定性

Fig. 5 The wavelength stability of DFB-FL under temperature control

进一步地,由于在例如差频解调的应用中需要光源波长能够达到kHz的频率调制,初步试验了DFB-FL应变调频的方式.对PZT施加不同电压值,测量DFB-FL激光波长,其对应关系如图6.由于PZT材料存在迟滞效应和回零偏差,导致激光波长在升电压和降电压过程中曲线并不重合.同时,由于PZT与结构体之间的结合不是严格紧贴的,导致在PZT加压膨胀和降压收缩过程中结构体的应力变化不是线性的,因此,经过一个周期的电压升降变化后,在零电压下激光波长产生了漂移.

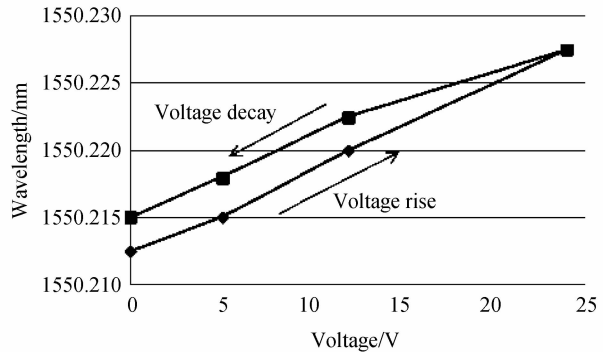


图6 波长电压调制曲线

Fig. 6 The curve of laser wavelength and voltage

3 结论

本文设计了具有弧形中性轴线槽的封装结构体,实现了有源相移光纤光栅的隔声隔振封装要求,使得DFB-FL波长特性不再因环境噪声的影响而变差,从而成为一种稳定可靠的窄线宽激光光源.将温度和应变调谐机制施加在有源相移光栅的封装结构上,获得了更大的温度调谐系数,使波长的温度调谐更有效.同时,有源相移光栅处于拉紧状态,波长应变调谐才能实

现,实验结果证明了该结构的可行性,但仍需要对波长调谐的线性度和重复性进一步优化。

参考文献

- [1] BEDWELL I R, JONES D R. Fiber laser sensor hydrophone performance[C]. *Oceans10 IEEE Sydney*, 2010: 1 - 5.
- [2] XIAO H, LI F, HE J, *et al.* A DFB fiber laser sensor system with ultra-high resolution and its noise analysis[C]. *Optical Fiber Sensors Conference*, 2008. APOS '08. 1st Asia-Pacific, IEEE, 2008:1-4.
- [3] CRANCH G A, FLOCKHART G M H, KIRKENDALL C K. Distributed feedback fiber laser strain sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7):1161-1172.
- [4] GU Hong-can, HUANG Jun-bin, YUAN Bing-cheng, *et al.* An experimental study on the fiber optic hydrophone array[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, **20**(5): 612-615.
顾宏灿, 黄俊斌, 苑秉承, 等. 光纤激光水听器阵列实验研究[J]. *光电子激光*, 2009, **20**(5):612-615.
- [5] WANG Li-jun, NING Yong-qiang, QIN Li, *et al.* Development of high power diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2015, **36**(1): 1-19.
- [6] TAN Bo, HUANG Jun-bin, HE Lin, *et al.* Dynamical characteristics of distributed feedback fiber laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8):1832-1838.
谭波, 黄俊斌, 何琳, 等. 分布反馈式光纤激光器的动态特性[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(8):1832-1838.
- [7] 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.
- [8] NI Jia-sheng, ZHAO Yan-jie, WANG Chang, *et al.* Research on linewidth characteristics and broadening mechanism of distributed feedback fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(8):084205.
倪家升, 赵艳杰, 王昌, 等. 分布反馈式光纤激光器线宽特性及其展宽机理研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(8):084205.
- [9] XUE Li-fang, ZHANG Qiang, LI Fang, *et al.* High-frequency modulation high-power and narrow linewidth distributed feedback fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 014213.
薛力芳, 张强, 李芳, 等. 高频调制大功率窄线宽分布反馈光纤激光器[J]. *物理学报*, 2011, **60**(1): 014213.
- [10] ZHAO Qiang, WANG Yong-jie, XU Tuan-wei, *et al.* Distributed feedback fiber laser tuning method based on photo-thermal effect[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(2):355-357.
赵强, 王永杰, 徐团伟, 等. 分布反馈式光纤激光器的光热调谐方法[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(2):355-357.
- [11] HANSEN L V. Constant frequency condition of fiber lasers in strain [C]. 15th Nordic Seminar on computational Mechanics, 2002, 185-188.
- [12] 波尔森 C V, 汉森 L V. 对包括具有光纤 Bragg 光栅的光导纤维的制品的改进及所述制品的制造方法: 中国, 201210411124.3[P]. 2013-04-17.
- [13] SONG Zhi-qiang, QI Hai-feng, WANG Chen, *et al.* Narrow linewidth fiber laser and application in sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(9s):s214005.
宋志强, 祁海峰, 王晨, 等. 窄线宽光纤激光器及其在光纤传感中的应用[J]. *光学学报*, 2015, **35**(9s):s214005.
- [14] WANG P P, CHANG J, ZHU C G, *et al.* Theoretical and experimental investigation of the intensity response of DFB-FL to external acoustic excitation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, **49**(49): 227-230.
- [15] SUN Bin-xiang. Influence of normal forces on bending damage of rectangular beam[J]. *Mechanics in Engineering*, 2001, **23**:32-34.
孙斌祥. 轴力对矩形梁弯曲损伤的影响[J]. *力学与实践*, 2001, **23**:32-34.
- [16] SONG Zhi-qiang, QI Hai-feng, GUO Jian, *et al.* Characteristics of self-amplified distributed feedback fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0206005.
宋志强, 祁海峰, 郭健, 等. 自放大结构分布反馈光纤激光器输出特性[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2):0206005.