

DFB 光纤激光水听器预应力理论与实验研究

唐 波 黄俊斌 顾宏灿 毛 欣

海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033

摘要 为了研究预应力对分布反馈式(DFB)光纤激光水听器水声探测性能的影响,建立了双膜片结构DFB光纤激光水听器声压灵敏度与预应力关系的理论模型,运用有限元软件ANSYS仿真分析了水听器动态性能与预应力的关系,加工制作了不同预应力作用下的DFB光纤激光水听器原型样品,并在消声水池对其进行了实验研究。实验结果表明,随着预应力的增加,DFB光纤激光水听器的频率响应趋向平坦,当预应力引起的水听器出光波长变化量增大到400 pm时,水听器在2.5~10 kHz频率范围内的声压灵敏度为136.8 dB \pm 0.3 dB,而预应力继续增大时,水听器的频率响应曲线变化非常小,这与理论分析和仿真结果都吻合较好。

关键词 光纤光学; 分布反馈式光纤激光; 水听器; 预应力; 声压灵敏度

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0305005

Prestressing Force in DFB Fiber Laser Hydrophone: Theory and Experiment

Tang Bo Huang Junbin Gu Hongcan Mao Xin

Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract To study the influence of prestressing on distributed feedback (DFB) fiber laser hydrophone in underwater acoustic detection, a theoretical model of DFB fiber laser hydrophone with two diaphragms, which presents the relation between pressure sensitivity and prestressing force, is established. The relation between dynamic performance of hydrophone and prestressing force is simulated and analyzed by finite element software ANSYS. Prototypes of the DFB fiber laser hydrophones under different prestressing forces are fabricated and tested in an anechoic tank. The experimental results show that the frequency response of hydrophone becomes flatter with the increasing of prestressing force. When the wavelength variation induced by prestressing force increases to 400 pm, the acoustic pressure sensitivity of hydrophone is 136.8 dB \pm 0.3 dB in a frequency range from 2.5 kHz to 10 kHz. However, the frequency response curve changes small when prestressing force continues to increase, which agrees well with both the theoretical analysis and simulation results.

Key words fiber optics; distributed feedback fiber laser; hydrophone; prestressing force; acoustic pressure sensitivity

OCIS codes 060.2770; 060.2340; 060.3735; 230.1040

1 引 言

分布反馈式(DFB)光纤激光器近年来已广泛应用于结构安全检测和水声探测等领域,但细长型的结构使其极易受到外界扰动的影响^[1-4]。1999年, Hill等^[5]实验得出,DFB光纤激光器频率响应曲线在测试频率范围内的波动幅度大于 ± 10 dB;2009年,谭波等^[6]通过对DFB光纤激光器动态特性的分析,得出激光器固有频率对其声压灵敏度的起伏具有很大影响的结论。

为了改善DFB光纤激光器的水声探测性能,出现了许多对其进行封装的探头结构,而这些结构都要求光纤激光器处于张紧状态^[7-11],即存在预应力的作用。但预应力对水听器探测性能影响的研究较少,本文建

收稿日期: 2015-10-26; 收到修改稿日期: 2015-11-25

作者简介: 唐 波(1991—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: 942896945@qq.com

导师简介: 黄俊斌(1965—),男,教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: Tsj98@163.com

立了双膜片结构DFB光纤激光水听器声压灵敏度与预应力的理论计算模型,运用有限元软件ANSYS仿真分析了水听器的频率响应与预应力的关系,加工制作了保持不同预应力的DFB光纤激光水听器原型样品,并在消声水池对其进行了水声实验研究,初步验证了理论和仿真分析结果,对制作DFB光纤激光水听器时预应力的施加具有非常重要的意义。

2 理论分析

双膜片结构DFB光纤激光水听器主要由DFB光纤激光器、套筒和膜片组成,进行水声探测时,声压透过水听器的套筒作用在水听器两端的膜片上,使膜片向外发生形变,从而拉动DFB光纤激光器产生轴向应变,引起激光器出射波长发生漂移,通过解调出该漂移信号可以实现对微弱水声信号的探测。双膜片结构DFB光纤激光水听器的受压弯曲形变如图1所示,设膜片的有效作用半径为 a ,厚度为 t ,弹性模量为 E_p ,泊松比为 ν_p ,则其弯曲刚度 $D = E_p t^3 / [12(1 - \nu_p^2)]^{1[2]}$, w 为膜片的挠度。DFB光纤激光器的弹性模量为 E_f ,横截面积为 A_f ,一段长度为 S_0 的光纤激光器被拉伸为 L 后固定于膜片上,张紧的光纤激光器收缩、拉动膜片弯曲并达到平衡状态,此时光纤激光器上存在的张力即为预应力,其长度为 S_T ,而当其受均布载荷 q 的作用时长度为 S 。

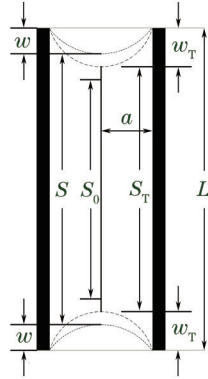


图1 水听器受压弯曲形变示意图

Fig.1 Schematic of bending deformation of hydrophone compressed

设DFB光纤激光器出射激光的中心波长为 λ_F ,在预应力的作用下,其光栅栅距、折射率以及相移点的位置都会发生变化,使出射激光的中心波长发生相应变化,其波长变化量与预应变的关系式为

$$\Delta\lambda_F = k\lambda_F \varepsilon_T = k\lambda_F \frac{S_T - S_0}{S_0}, \quad (1)$$

式中 $k = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2}[(p_{11} + p_{12})\nu - p_{12}] - 1$,其中 p_{11} 和 p_{12} 分别是光纤纤芯和包层的弹光系数, n_{eff} 为光纤的有效折射率, ν 为光纤的泊松比。对于石英质光纤, $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.27$, $\nu = 0.17$ ^[13]。

当DFB光纤激光器仅受到预应力 P 作用,其大小可表示为

$$P = E_f A_f \varepsilon_T = \frac{E_f A_f}{S_0} (S_T - S_0). \quad (2)$$

由于DFB光纤激光器的半径远小于膜片,可将膜片受到的预应力作用等效于集中载荷 T ,则膜片中心的挠度为

$$w_T = \frac{Ta^2}{16\pi D} = \frac{E_f A_f a^2}{16\pi D S_0} (S_T - S_0). \quad (3)$$

当膜片受到均布载荷 q 的作用时,膜片中心的挠度为

$$w = w_T - w_q = \frac{E_f A_f a^2}{16\pi D S_0} (S - S_0) - \frac{qa^4}{64D}. \quad (4)$$

由几何关系 $2w_T + S_T = 2w + S = L$,即可求得DFB光纤激光器受均布载荷 q 作用后,其长度变化为

$$\Delta S = S - S_T = \frac{qa^4}{64D} \left(\frac{E_f A_f a^2}{16\pi D S_0} + \frac{1}{2} \right)^{-1} = \frac{\pi qa^4 S_T}{4(E_f A_f a^2 + 8\pi DL)}. \quad (5)$$

为了更为直观地分析预应力与DFB光纤激光水听器声压灵敏度的关系,使用波长变化量 $\Delta\lambda_F$ 来度量预应力 P 的大小,即

$$P = E_r A_r \varepsilon_r = E_r A_r \frac{\Delta\lambda_F}{k\lambda_F}, \quad (6)$$

则DFB光纤激光水听器声压-相位灵敏度的理论计算公式为^[14]

$$M_{DFB} = 20 \lg\left(\frac{\Delta\phi}{q}\right) = 20 \lg\left(\frac{\Delta S}{qS_0}\right) + G_{int} + 20 \lg d = 20 \lg\left[\frac{\pi q a^4}{4q(E_r A_r a^2 + 8\pi DL)}\left(\frac{\Delta\lambda_F}{k\lambda} + 1\right)\right] + G_{int} + 20 \lg d, \quad (7)$$

式中 q 为作用在膜片上的声压,单位为 μPa , G_{int} 是一个常数,表示单位长度非平衡干涉仪对激光器单位应变的相位增益,该常数与激光器的初始波长有关,若波长取 1540 nm,则可计算出 $G_{int} = 133.26 \text{ dB}$; d 为非平衡干涉路径的长度,单位为 m。

双膜片结构的DFB光纤激光水听器原型样品的参数为 $a = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$, $t = 0.1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $E_p = 1.93 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $\nu_p = 0.31$,两端膜片在不受力作用时的距离 $L = 4.8 \times 10^{-2} \text{ m}$,解调系统的非平衡干涉路径 $d = 100 \text{ m}$,在 $1 \mu\text{Pa}$ 幅度的声压作用下,以 100 pm 为间隔,计算得到在 $100 \sim 1000 \text{ pm}$ 波长变化量范围内DFB光纤激光器的轴向应变 $\varepsilon = \Delta S/S_0 = (3.531 \sim 3.535) \times 10^{-16}$,则DFB光纤激光水听器的声压灵敏度理论计算值为

$$M_{DFB} = 20 \lg(\Delta\phi/q) = 20 \lg[(3.531 \sim 3.535) \times 10^{-16}] + 133.26 + 20 \lg 100 = -(135.772 \sim 135.778) \text{ dB} \cdot (\text{rad}/\mu\text{Pa}). \quad (8)$$

然而,声压作用在DFB光纤激光器上时,会引起激光器横向振动,激励频率达到激光器固有频率时,使激光器产生共振,从而引起激光器出射波长发生较大幅度的漂移,这对水听器的频率响应特性有一定影响,所以激光器固有频率落在水听器工作频率范围内的个数越少,水听器的频率响应曲线就越平坦,DFB光纤激光器固有频率与水听器频率响应之间的定量关系还有待进一步研究。

3 有限元仿真分析

由上述分析可以看出,由预应力引起的波长变化量对水听器的性能具有重要影响。为了进一步分析预应力与光纤激光水听器探测性能的关系,在 $1 \mu\text{Pa}$ 幅度的声压作用下,以 100 pm 为间隔,在 $100 \sim 1000 \text{ pm}$ 波长变化量范围内,运用有限元分析软件 ANSYS 在 $2000 \sim 10500 \text{ Hz}$,以 500 Hz 为间隔,分别对该结构均匀分布的 9 个频点进行了谐响应分析,得到不同波长变化量下膜片中心位移与频率之间的关系,即可得到DFB光纤激光水听器在各频点的声压灵敏度,其频率响应曲线如图 2 所示。

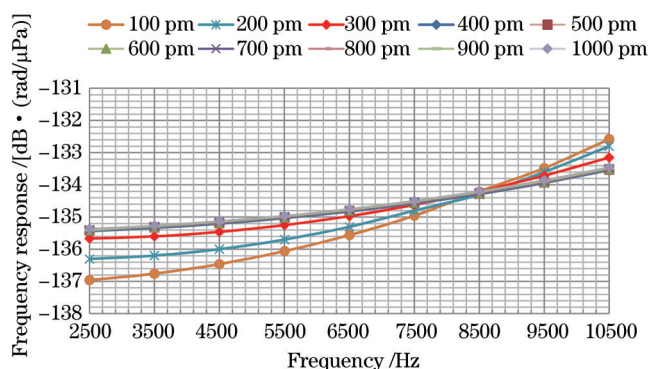


图 2 仿真所得不同波长变化量的水听器频率响应曲线

Fig.2 Frequency response curves of hydrophones with different wavelengths variations by numerical method

由谐响应分析结果可见,随着波长变化量的增大,水听器频率响应曲线趋向平坦,而当其增加到 400 pm 后再继续增加时,水听器频率响应曲线变化非常小,只是声压灵敏度略有上升。波长变化量为 400 pm 的水听器在频率为 2500 Hz 时的声压灵敏度为 -135.43 dB ,与理论分析值较为吻合,可见通过施加适当大小的预应力,不仅可以起到增敏的作用,还能有效提升DFB光纤激光水听器的动态性能。

4 实验分析

为了进一步分析预应力对DFB光纤激光水听器频率响应的影响,基于上述分析结果,在相同环境下使

用相同工艺流程制作了 10 支不同波长变化量的水听器探头原型样品,具体参数如表 1 所示。由表 1 可以看出,对制作的 DFB 光纤激光水听器波长变化量的控制精度在 50 pm 以内。

表 1 实验所用 DFB 光纤激光水听器的出射波长及波长变化量

Table 1 Output wavelength and wavelength variation of DFB fiber laser hydrophones in experiments

Number	Output wavelength /nm	Wavelength variation /pm	Deviation /pm
H540	1539.655	95	-5
H133	1530.385	245	45
H732	1544.885	345	45
H521	1539.930	380	-20
H842	1546.780	490	-10
H530	1540.125	590	-10
H142	1530.740	645	45
H843	1547.005	730	30
H833	1547.165	890	-10
H119	1531.295	970	-30

实验在长 10 m、宽 6 m、水深为 5 m 的消声水池进行,实验系统如图 3 所示。发射换能器入水 2.5 m,与 KROHN 7500 型功率放大器连接,并使用一台 GFG-8050 型信号发生器提供 2500~10000 Hz 脉冲信号, BK8104 标准水听器与发射换能器相距约 2.5 m,且与一台 Reson VP-2000 型电荷放大器相连,输出信号幅度通过一台 TDS2024 型示波器读取,标准水听器靠近光纤激光水听器放置,水听器入水 1.7 m。测量的 DFB 光纤激光水听器引出端与解调样机相连,干涉仪的非平衡长度为 100 m,解调后得到 DFB 光纤激光水听器的相位漂移信息,读取示波器的电压信号,代入(7)式即可得到水听器的声压灵敏度。在测量频率范围内选择 1/3 倍频程频点进行测量后,得到该频率范围内水听器的声压灵敏度频率响应曲线。

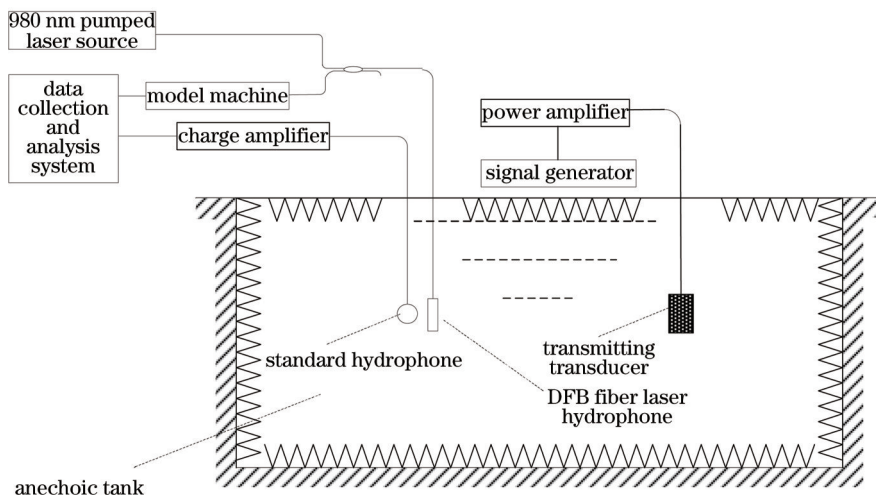


图 3 消声水池实验系统示意图

Fig.3 Schematic of testing system in anechoic tank

根据实验所测得的数据,绘制出不同波长变化量的 DFB 光纤激光水听器原型样品频率响应曲线,如图 4 所示。从实验数据可以看出,随着波长变化量的增大,水听器频率响应曲线趋向平坦,当波长变化量为 400 pm 时,水听器声压灵敏度平均值为 -136.8 dB,波动幅度在 ± 0.3 dB 以内,且随着波长变化量的增大,水听器频率响应曲线变化很小,这与理论分析和仿真结果都较为吻合;然而波长变化量为 1000 pm 的 H119 波动幅度却增加到 ± 2.5 dB,这可能是由于用于粘接膜片与水听器筒体的环氧树脂或者 DFB 光纤激光器本身的性能特性影响了其频率响应曲线的平坦度。

5 结 论

建立了双膜片结构 DFB 光纤激光水听器声压灵敏度与预应力的理论计算模型,得到了其有限元仿真结

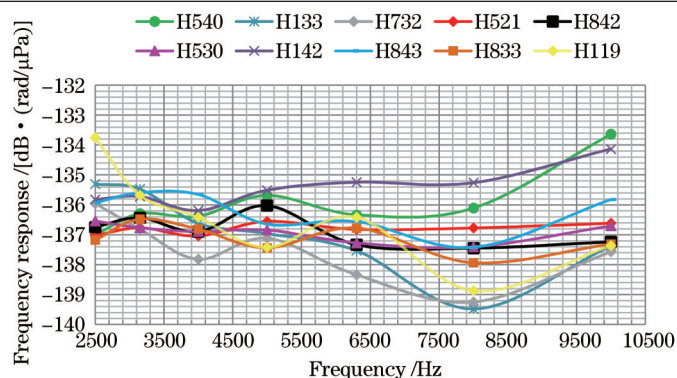


图4 不同波长变化量的DFB光纤激光水听器实测频率响应曲线

Fig.4 Frequency response curves measured of DFB fiber laser hydrophones with different wavelengths variations

果,研制了不同预应力的DFB光纤激光水听器原型样品。实验测得:在2500~10000 Hz频段内,随着预应力的增加,水听器的频率响应趋向平坦,当预应力引起的波长变化量增大到400 pm时,水听器的声压灵敏度为 $136.8 \text{ dB} \pm 0.3 \text{ dB}$,预应力继续增大时,其频率响应曲线的变化非常小,这与理论分析和仿真结果吻合较好。实验结果表明,预应力大小对于DFB光纤激光水听器性能具有较大的影响,因而在制作光纤激光水听器时,使得其出射波长保持在某一特定范围,在保证水听器优良性能的同时,还能满足工程应用中水听器波分复用成阵时波长范围的要求,这对光纤激光水听器在阵列中的应用起到了推动作用。

参考文献

- 1 Hu Yongming, Hu Zhengliang, Luo Hong, *et al.*. Recent progress toward fiber optic hydrophone research, application and commercialization in China[C]. SPIE, 2012, 8421: 84210Q.
- 2 Lu Wengao, Sun Qizhen, Wo Jianghai, *et al.*. High sensitivity micro-vibration sensor based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0728006.
鲁文高, 孙琪真, 沃江海, 等. 基于分布布拉格反射光纤激光器的高灵敏度微振动传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728006.
- 3 U K Chandrika, V Pallayil, C Zhihao, *et al.*. Development of a high sensitivity DFB fiber laser hydrophone[C]. International Symposium on Ocean Electronics, 2011: 103-108.
- 4 Feng Dejun, Huang Wenyu, Liu Guanxiu, *et al.*. Dual-wavelength orthogonally polarized Yb^{3+} -doped double clad fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1214001.
冯德军, 黄文育, 刘冠秀, 等. 正交偏振的双波长掺镱双包层光纤激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1214001.
- 5 D J Hill, P J Nash, D A Jackson, *et al.*. Fiber laser hydrophone array[C]. SPIE, 1999, 3860: 55-66.
- 6 Tan Bo, Huang Junbin, He Lin, *et al.*. A study on the 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 Tan Bo, Huang Junbin. Design of encapsulated structure of distributed feedback fiber laser hydrophone[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(8): 1691-1695.
谭波, 黄俊斌. 分布反馈光纤激光水听器封装结构的设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1691-1695.
- 8 F X Launay, R Lardat, R Bouffaron, *et al.*. Static pressure and temperature compensated wideband fiber laser hydrophone[C]. SPIE, 2013, 8794: 87940K.
- 9 C Unnikrishnan Kuttan, P Venugopalan, L Kian Meng, *et al.*. Pressure compensated fiber laser hydrophone: Modeling and experimentation [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(4): 2710-2712.
- 10 Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 27(8): 0805005.
田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 27(8): 0805005.
- 11 Jin Mengqun, Zhang Zili, Wu Guojun, *et al.*. A three-dimensional vector hydrophone based on fiber-optic flexure disk accelerometer [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0305004.
金梦群, 张自丽, 吴国军, 等. 基于光纤碟型加速度传感单元的三维柱形矢量水听器[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0305004.

12 Huang Yan. Engineering Elasticity Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1982.

黄 炎. 工程弹性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982.

13 Liao Yanbiao. Optical Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

14 Tan Bo, Huang Junbin, Gu Hongcan, *et al.*. A bending-tension style DFB fiber laser hydrophone unit[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(4): 92-96.

谭 波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 一种曲伸式DFB光纤激光水听器探头的研究[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(4): 92-96.

栏目编辑: 王晓琰