

文章编号: 0258-7025(2009)06-1473-06

基于铒镱共掺分布布拉格反射式光纤激光器的有源光纤水听器声压灵敏度

马丽娜 胡永明 罗洪 张学亮 孟洲

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 对基于铒镱共掺分布布拉格反射式光纤激光器(DBR-FL)的有源光纤水听器进行了研究。制作了腔长为 8 cm 的铒镱共掺 DBR-FL, 在抽运功率为 50 mW 时, 激光器的输出功率达到 0.263 mW; 采用带法拉第旋镜的迈克尔逊干涉仪和相位载波(PGC)解调方案, 解调出施加在铒镱共掺 DBR-FL 有源光纤水听器的声信号, 并通过与标准压电水听器对比得到声压灵敏度; 对单频信号进行多次测量, 声压灵敏度的波动小于 ± 0.6 dB; 测量了 80 Hz 到 2.5 kHz 频率范围的响应曲线, 除 125 Hz, 200 Hz 和 250 Hz 三个频点外, 声压灵敏度已达到或超过部分文献报道中干涉型光纤水听器的灵敏度; 与基于 DFB-FL 的有源光纤水听器做了对比测试, 结果表明频率响应不平坦是未对水听器进行封装和测试系统引起的。

关键词 光纤光学; 铒镱共掺分布布拉格反射式光纤激光器; 光纤水听器; 声压灵敏度

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1473

Acoustic Pressure Sensitivity of Yb³⁺ / Er³⁺ Co-Doped Distributed Bragg Reflection Fiber Laser Hydrophone

Ma Lina Hu Yongming Luo Hong Zhang Xueliang Meng Zhou

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Experimental research on Yb³⁺/Er³⁺ co-doped distributed Bragg reflection fiber laser (DBR-FL) hydrophone is carried out. The Yb³⁺/Er³⁺ co-doped DBR-FL, with a resonator length of 8 cm, could gain an output of 0.263 mW when the pump power is 50 mW. A Michelson fiber interferometer with Faraday rotator mirror and phase generated carrier (PGC) demodulation scheme, is used to interrogate acoustic signal acted on the Yb³⁺/Er³⁺ co-doped DBR-FL hydrophone, and the acoustic pressure sensitivity is gained by comparison with the standard piezoelectricity hydrophone. The fluctuation of sensitivity at single frequency is less than ± 0.6 dB during repetitious tests. The frequency response is gained from 80 Hz to 2.5 kHz. Comparison experiments are also carried out on DFB-FL hydrophone, which gains a similar frequency response, showing that the fluctuation of frequency response is caused by unsealed hydrophone structure and test system.

Key words fiber optics; Yb³⁺/Er³⁺ co-doped distributed Bragg reflection fiber laser; optic fiber hydrophone; acoustic pressure sensitivity

1 引言

大规模光纤水听器阵列是一个国家水下的重要军事布防力量^[1,2], 在海洋石油勘探、地震波检测等

民用工程中也有广泛的应用^[3]。随着光纤水听器阵列规模不断扩大, 干涉型光纤水听器的空间体积、技术复杂性和成本也不断提高^[4~6], 从而限制了其应用范围。光纤光栅(FBG)水听器具有体积小、成本

收稿日期: 2008-07-04; 收到修改稿日期: 2008-08-29

基金项目: 863 计划(20060109A1004-4)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0925)资助项目。

作者简介: 马丽娜(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: mln_c7@nudt.edu.cn

导师简介: 胡永明(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

低、复用性能良好等优点,特别适合构造大规模拖曳阵列,但受限于光纤光栅的带宽和信噪比,难以采用相干方案实现高灵敏度检测^[7]。

基于光纤激光器的新型有源光纤水听器的输出为高相干激光,可采用干涉仪进行相干检测,从而保证了检测的高灵敏度,同时兼具光纤光栅水听器体积小、成本低、复用性能好等优点,因而成为构造大规模复用阵列,特别是拖曳细线阵的首选^[8]。早期基于光纤激光器的有源光纤水听器主要采用掺铒光纤分布布拉格反射式光纤激光器(DBR-FL)^[8~10]。随着光纤掺杂技术和光纤光栅刻写技术的发展,分布反馈式布拉格光纤激光器技术逐渐成熟,这种光纤光栅激光器集成度高,体积更小,目前的有源光纤水听器研究主要采用DFB-FL作为传感基元^[10~13]。但是,在构造水听器拖曳线阵时,线阵的直径越小,流噪声越高^[14],解决的方案之一是构造细长的水听器基元^[14]。DFB-FL长度受到相位掩模板等制作工艺的限制,不能随意调整长度。此外,受限于光栅刻写技术,目前的DFB-FL主要在掺铒光纤上实现^[15~18],因此出光功率较小,效率较低。

本文对基于铈共掺DBR-FL的有源光纤水听器进行了研究。通过调节熔接点损耗和腔长的关系,制作出可实现水声信号稳定解调的铈共掺DBR-FL有源光纤水听器;采用相位载波(PGC)方案,对这种有源光纤水听器进行信号检测,测量出声压灵敏度和频率响应曲线。

2 基本原理

2.1 高功率铈共掺DBR-FL的基本原理

DBR-FL的结构如图1所示。DBR-FL的谐振腔由两支中心波长相同的光纤光栅分别熔接在一段掺杂光纤两端构成,所激射激光的波长由光纤光栅的反射谱和谐振腔的长度所决定^[9,19]。对于1550 nm波段的激光辐射,激光器的输出功率由掺杂光纤中处于上能级的 Er^{3+} 离子浓度所决定,因此在一定条件下,通过提高光纤中铈离子的掺杂浓度可以提高DBR激光的输出功率。然而处于硅基质中的 Er^{3+} 离子浓度较高时, Er^{3+} 离子之间会发生相互作用,形成团簇结构^[20,21],导致严重的离子上转换效应,大部分抽运光会转化成绿光辐射^[22],即产生浓度猝灭^[21]。因此单纯的提高掺铈浓度难以获得高功率的激光输出。

铈共掺光纤的出现为提高光纤激光器的输出功率提供了新途径。掺杂光纤的能级结构如图2所

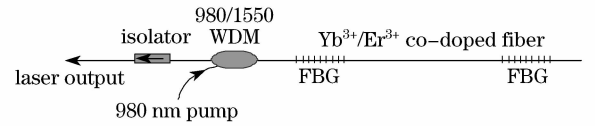


图1 铈共掺DBR-FL的结构图

示^[21]。铈共掺光纤中, Er^{3+} 跃迁到上能级的能量来源并非直接吸收980 nm波段的光子,而是来源于 Yb^{3+} 的能量传递。处于 $^2F_{7/2}$ 能级的 Yb^{3+} 吸收抽运光子后跃迁到 $^2F_{5/2}$,然后将能量转移给 Er^{3+} ,使其跃迁到 $^4I_{11/2}$ 能级,并通过快速无辐射跃迁到 $^4I_{13/2}$ 能级,形成粒子转换。由于这种抽运机制是 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的交叉作用,减少了离子上转换效应的概率,因此可以将绝大部分 Er^{3+} 聚集在 $^4I_{13/2}$ 能级,形成较高的粒子数反转,提高激光器的输出功率。另一方面,与 Er^{3+} 相比, Yb^{3+} 在具有更大的吸收截面,且吸收波段宽,可以从800~1100 nm^[20,21],因此对抽运光的吸收效率更高。实验中采用的铈共掺光纤在978 nm波长上的吸收系数为353 dB/m,而掺铒光纤的在这一波段的吸收系数一般为几十分贝每米,因而采用铈共掺光纤制作激光器的抽运效率更高,出光功率更大^[23]。

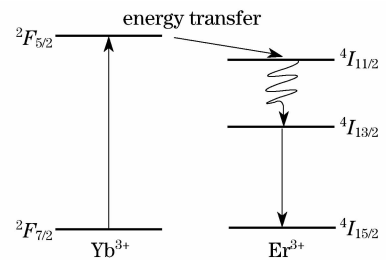


图2 铈共掺光纤的能级结构简图

Fig. 2 Schematic of energy levels of $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped fiber

2.2 基于铈共掺DBR-FL水听器的声压模型和信号解调方案

DBR激光器的输出光频率满足^[23]

$$\nu = Q \frac{c}{2nL},$$

式中 Q 为整数, c 为光速, n 为折射率, L 为谐振腔腔长。当声压信号作用到DBR谐振腔时,声压一方面引起谐振腔长度的改变,另一方面由于弹光效应使折射率发生改变。这两种效应导致激光器输出光频率发生偏移,偏移量满足

$$\Delta\nu = -\left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n}\right) \cdot \nu,$$

式中 ΔL 为谐振腔长度的改变量, Δn 为弹光效应导

致的折射率变化。由弹性力学和光纤弹光效应有理论^[24,25],可得

$$\Delta\nu = - \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right\} \cdot \epsilon \cdot \nu,$$

式中 μ 为石英光纤的泊松比, p_{11}, p_{12} 为光纤弹光矩阵系数, ϵ 为外界声压作用导致的谐振腔应变变量。对于石英光纤, 取 $n = 1.456, p_{11} = 0.121, p_{12} = 0.270, \mu = 0.17$, 可得到经验公式^[7,13]

$$\Delta\lambda/\lambda = \Delta\nu/\nu \approx -0.78\epsilon. \quad (1)$$

当铟镱共掺 DBR-FL 输出光经过迈克尔逊型光纤干涉仪后, 由光频率偏移导致的相位变化为^[3]

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n' \Delta l}{c} \Delta\nu, \quad (2)$$

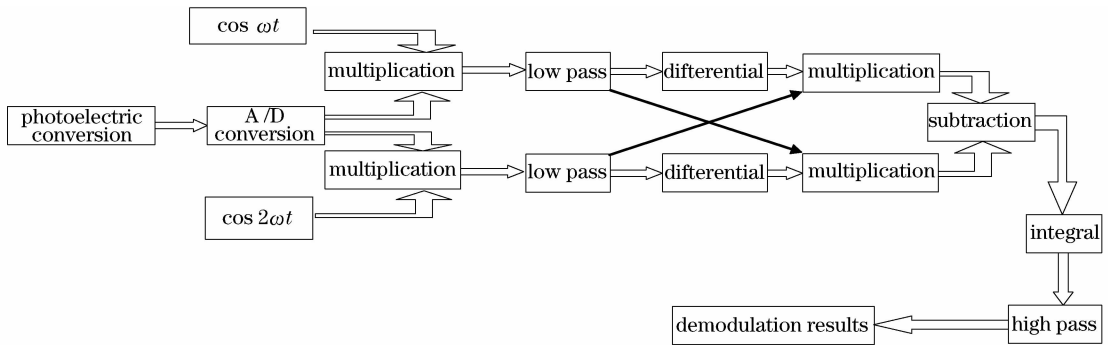


图3 PGC解调方案流程图

Fig. 3 Schematic of PGC demodulation system

2.3 声压灵敏度的测量原理

由声压灵敏度的定义^[27]可得到声压灵敏度 M_p

$$M_p = \frac{\Delta\varphi}{P},$$

声压灵敏度级 M 定义为^[27]

$$M = 20\lg(M_p/M_r), \quad M_r = 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}.$$

实验测试中铟镱共掺 DBR-FL 有源光纤水听器的声压灵敏度级 M_f 通过与标准压电水听器比较获得。设标准压电水听器的声压灵敏度级为 M_{pr} , 两种水听器测得的声信号幅度分别为 $\Delta\varphi_f$ 和 $\Delta\varphi_{pr}$, 则有

$$M_f = M_{pr} + 20\lg(\Delta\varphi_f/\Delta\varphi_{pr}).$$

3 实验设计

将铟镱共掺 DBR-FL 的谐振腔部分固定在刚性框架上, 如图 4 所示。在 A, B 两点将谐振腔两端的光纤固定在刚性框架上, 保持谐振腔部分为直腔。刚性框架长 20 cm, 宽度为 4 cm。将整个框架放入驻波声压罐中测量声压灵敏度, 实验系统如图 5 所示^[28]。

图 5 中, 采用反向抽运结构, 由 980 nm 抽运激

式中, n' 为干涉仪光纤折射率, Δl 为干涉仪的两臂光程差。如果在干涉仪中引入调制信号 $\varphi(t) = C\cos(\omega t)$ (C 为调制幅度, ω 为调制频率), 则干涉仪的输出光可以表示为^[7,26]

$$I(t) = A + B\cos(C\cos \omega t + \Delta\varphi + \varphi_n),$$

式中 A 为与光功率成正比的常数项, B 为与光源功率和干涉仪可见度相关的系数, $\Delta\varphi$ 即为 DBR 激光器受声压作用导致的相位项, φ_n 为直流相位和噪声相位之和。将干涉仪的输出进行 PGC 解调, 通过如图 3 所示的解调流程, 即可解调出 $\Delta\varphi$ ^[26]。

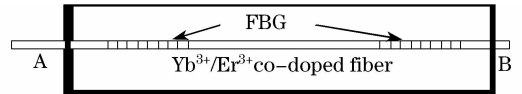


图4 铟镱共掺 DBR-FL 的谐振腔固定图

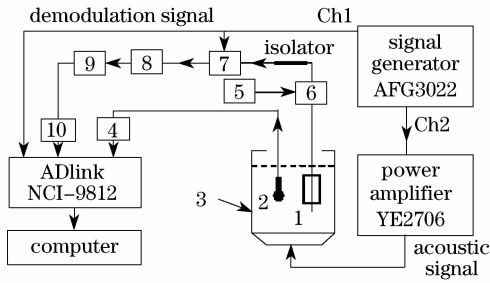
Fig. 4 Fixed scheme of Yb³⁺/Er³⁺ co-doped

DBR-FL resonator

光器通过 980/1550 波分复用(WDM)对声压罐中的铟镱共掺 DBR-FL 提供抽运, 所产生的激光通过 WDM 的 1550 nm 端口输出, 并采用隔离器消除回波对谐振腔输出的影响。经隔离器输出的激光注入到干涉仪中, 产生相位信号。

PGC 解调方案要求在干涉系统中引入载波信号, 为此, 将干涉仪的一个干涉臂绕在压电陶瓷环上, 利用标准信号源对干涉仪的一个干涉臂进行调制。为抑制偏振衰落现象, 采用 Faraday 旋镜法构造迈克尔逊型干涉仪, 从而使干涉仪的可见度始终大于 0.9, 保证了解调的稳定性。干涉仪的臂差为 15 m。

光纤水听器的声压灵敏度通过与标准压电水听器(型号为 RHS3, 715 研究所生产, 声压灵敏度级为 -196.3 dB)比较的方法获得。标准压电水听器



- 1: DBR-FL hydrophone
- 2: standard piezoelectric hydrophone
- 3: standing-wave tank
- 4: digital filter, standard-SR650
- 5: 980 nm pumping laser
- 6: 980/1550 WDM
- 7: interferometer with faraday rotator mirror and PZT demodulation part
- 8: photoelectric detection circuit
- 9: low-pass FILTER, UAF42
- 10: interator, OP37

图5 声压灵敏度测试系统

Fig. 5 Acoustic pressure sensitivity measurement system

信号在经过滤波器(Standard-SR650)时,引入了40 dB的增益后输入到采集卡中,因此用于对比的实际声压灵敏度级为-156.3 dB。信号源(型号为AFG3022, Tektronix公司生产)一个通道的输出信号经功率放大器(型号为YE2706,江苏联能公司生产)进行功率放大后驱动驻波罐,产生准平面声波,另外一个通道产生对干涉仪的调制载波信号,同时作为PGC解调的参考信号输入到采集卡中。采集卡将压电水听器信号、光纤水听器信号及参考信号送到计算机中,通过数字化PGC解调系统,解调出光纤水听器所测得的声信号,并通过与标准压电水听器信号对比,得到光纤水听器的声压灵敏度级。

4 实验结果与分析

实验中制作铟镱共掺DBR-FL成对光纤光栅是由上海紫珊公司提供,两支光纤光栅的反射中心波长都为1544.12 nm,反射带宽为0.15 nm,反射率分别约为92%和96%。通过仔细调节光栅与掺杂光纤的熔接点损耗,制作了长度为8 cm的铟镱共掺DBR激光器,采用Advantest Q8384光谱仪测量了激光器的输出光,如图6所示。

铟镱共掺DBR激光器的输出波长为1544.128 nm,改变抽运功率,测量了输出功率随抽运功率的变化曲线,如图7所示。铟镱共掺DBR激光器的阈值约为23 mW,在抽运功率为50 mW时,输出功率为0.263 mW。

将隔离器的输出接入到干涉仪中,采用PGC解调系统对干涉仪的信号进行解调。通过信号源对驻

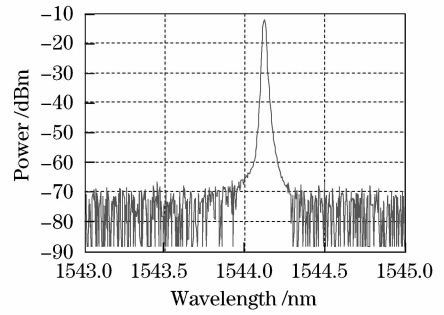


图6 光谱仪测得的激光器输出光谱

Fig. 6 Spectrum of Yb³⁺/Er³⁺ co-doped DBR-FL

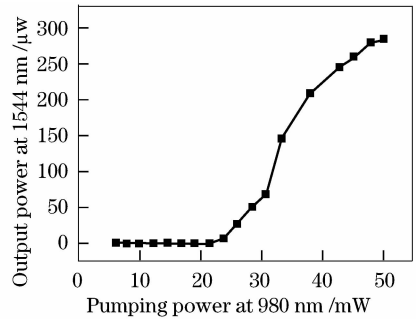


图7 激光器输出功率与抽运功率的对应曲线

Fig. 7 Laser output versus pumping power

波罐中的压电水听器和铟镱共掺DBR-FL有源光纤水听器施加频率为500 Hz的正弦单频声压信号,经过PGC解调系统,得到有源水听器对这一频率声信号的响应幅度为545 mV,而标准水听器的响应幅度为252 mV,因此有源水听器在500 Hz频点上的声压灵敏度级约为-149.6 dB。为保证测量频率响应曲线的正确性,对单频声信号进行多次采集,测量声压灵敏度级的稳定性,500 Hz频点上多次测量结果如图8所示。

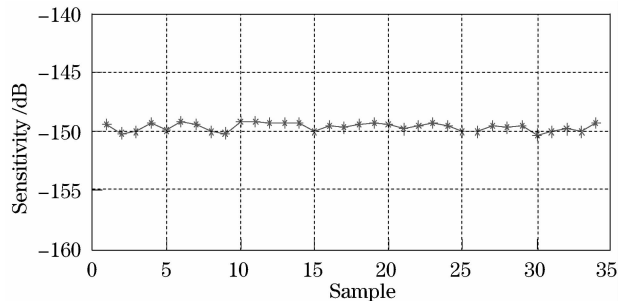


图8 500 Hz声压灵敏度稳定性

Fig. 8 Stability of acoustic sensitivity at 500 Hz

对500 Hz声信号的多次测量中,声压灵敏度最大为-149.2 dB,最小为-150.3 dB,声压灵敏度的波动约为±0.55 dB。对其他频率声信号进行多次测量,声压灵敏度的波动小于±0.6 dB。这表明有源光纤水听器的声压灵敏度具有良好的稳定性和可

重复性。

在上述测试的基础上,对水听器施加从 100 Hz 到 2.5 kHz 的声压信号,测量水听器的声压灵敏度频率响应曲线,如图 9 所示。

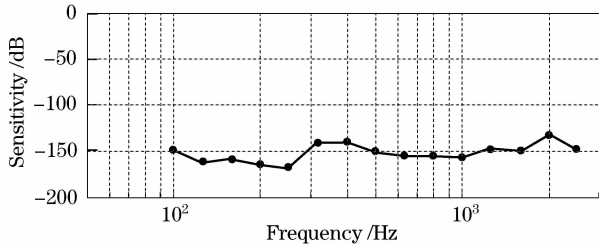


图 9 基于铟镱共掺 DBR-FL 有源光纤水听器声压灵敏度频率响应曲线

Fig. 9 Frequency response of $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped DBR-FL hydrophone

图 9 中,除 125 Hz, 200 Hz, 250 Hz 三个频点以外,在 100~250 Hz 频段内,基于铟镱共掺 DBR-FL 的有源光纤水听器声压灵敏度都高于 -160 dB,已经达到或超过部分文献报道干涉型光纤水听器的灵敏度^[29,30]。实验中未对铟镱共掺 DBR-FL 有源光纤水听器进行封装,对声波响应的仅是作为谐振腔的不含涂敷层的裸光纤,通过进行适当的增敏封装,还可进一步提高。从图 9 中还可以看出,未封装的铟镱共掺 DBR-FL 有源光纤水听器频率响应不平坦,最大值为 -132 dB,对应的声波频率为 2 kHz,最小值为 -171 dB,对应的声波频率为 250 Hz,在 100 Hz 到 2.5 kHz 频段内,声压灵敏度波动值接近 ±20 dB。

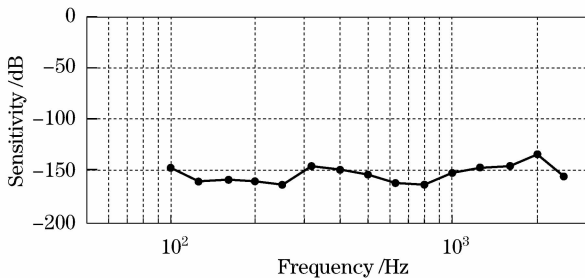


图 10 基于 DFB-FL 有源光纤水听器声压灵敏度频率响应曲线

Fig. 10 Frequency response of DFB-FL hydrophone

实验中用于对比测试的 DFB-FL 为中国科学院半导体物理研究所研制^[15]。实验室测量得到 DFB-FL 的谐振腔长为 4 cm,在抽运功率为 50 mW 时,输出功率为 30 μW 。将 DFB-FL 谐振腔部分的裸光纤同样按照图 4 方式固定,采用同一测试系统(图 5),测得基于 DFB-FL 的有源光纤水听器声压灵敏度频率响应曲线如图 10。对比图 9 和图 10 可以看

出,两种有源水听器在 315 Hz 和 2 kHz 频点上的声压灵敏度曲线都存在转折点,声压灵敏度频率响应曲线基本一致,表明频率响应不平坦是由于未对谐振腔进行封装及测试夹装结构所带来的。通过对谐振腔进行增敏封装,同时进一步改进测试的夹装结构,可获得平坦的声压灵敏度频率响应曲线。

通过对比测试可以看出,与基于 DFB-FL 的有源光纤水听器相比,基于铟镱共掺 DBR-FL 的有源光纤水听器的谐振腔长度增加了一倍,因而可以制作出更长的超细水听器单元,在降低拖曳阵流噪声方面有较强的优势;由于采用了铟镱共掺光纤,激光器的抽运效率更高,输出光功率更强,因而可用于构造更大规模的阵列;同时由于输出功率的增加,系统的信噪比也会提高。

5 结 论

对基于铟镱共掺 DBR-FL 的有源光纤水听器声压灵敏度进行了研究。所制作的铟镱共掺 DBR-FL 腔长为 8 cm,抽运功率为 50 mW 时,反向输出端的激光功率为 0.263 mW;采用 PGC 解调方案,可正确解调出施加在铟镱共掺 DBR-FL 有源光纤水听器的声压信号,并通过与标准压电水听器对比得到声压灵敏度。100 Hz 到 2.5 kHz 频率范围的声压灵敏度响应曲线,与部分文献中报道的干涉型光纤水听器相比,铟镱共掺 DBR-FL 有源光纤水听器除个别频点外,灵敏度要高于干涉型光纤水听器;在测试频段内,声压灵敏度频率响应不平坦,通过与 DFB-FL 有源光纤水听器对比测试,表明频率响应的不平坦性是由于未对水听器传感部分进行封装及测试夹装结构所引起的。

致谢 感谢中国科学院半导体物理研究所李芳老师和徐团伟博士提供 DFB 光纤激光器。

参 考 文 献

- 1 D. J. Hill, P. J. Nash, S. D. Hawker *et al.*. Progress toward an ultra thin optical hydrophone array[C]. *SPIE*, 1998, **3483**:301~304
- 2 A. D. Kersey. Demonstration of a hybrid time/wavelength division multiplexed interferometric fiber sensor array [J]. *Electronics Letters*, 1991, **27**(7): 554~555
- 3 Zhang Renhe, Ni Ming. Principle and applications of the fiber optic hydrophone[J]. *Physics*, 2004, **33**(7):503~507
张仁和,倪明. 光纤水听器的原理与应用[J]. *物理*, 2004, **33**(7):503~507
- 4 C. K. Kirkendall, A. R. Davis, A. Dandridge *et al.*. 64-channel all-optical deployable array[J]. *NRL Review*, 1997, 63~65
- 5 Geoffrey A. Cranch, Philip J. Nash. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM[J].

- Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(5):687~699
- 6 G. B. Havsagard, G. Wang, P. Skagen *et al.*. Four channel fiber optic hydrophone system[C]. *SPIE*, 2000, **4185**: 122~125
 - 7 Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **1**(35):87~91
肖浩,李芳,王永杰等.高分辨率光纤激光传感系统[J].*中国激光*,2008,**1**(35):87~91
 - 8 K. P. Koo, A. D. Kersey. Bragg grating-based laser sensors systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(7):1243~1249
 - 9 K. P. Koo, A. D. Kersey. Noise and cross talk of a 4-element serial fiber laser sensor array[C]. OFC'96 Technical Digest.
 - 10 D. J. Hill, P. J. Nash, D. A. Jackson *et al.*. A fiber laser hydrophone array[C]. *SPIE*, 1999, **3860**:55~66
 - 11 Wang Jinyu, Sui Qingmei, Chang Jun *et al.*. A new DFB fiber laser hydrophone[J]. *Optoelectronics Letters*, 2007, **3**(4):0264~0266
 - 12 D. J. Hill, B. Hodder, J. D. Freitas *et al.*. DFB fibre-laser sensor developments[C]. *SPIE*, 2005, **5855**: 904~907
 - 13 Scott Foster, Alexei Tikhomirov, Mark Milnes *et al.*. A fibre laser hydrophone[C]. *SPIE*, 2005, **5855**: 627~630
 - 14 Gu Zhenfu, Cui Xiaowen, Gong Kai *et al.*. Control of flow noise deterioration in thin towed array[J]. *Acoustics and Electro Engineering*, 2004, (3): 8~11
顾振福,崔晓文,龚凯等.细线阵流噪声恶化的抑制[J].*声学*与*电子工程*,2004,(3):8~11
 - 15 Xu Tuanwei, Li Fang, Liu Yuliang *et al.*. Characteristic mode analysis of distributed feedback fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1358~1362
徐团伟,李芳,刘育梁等.分布反馈光纤激光器模式特性分析[J].*中国激光*,2007,**34**(10):1358~1362
 - 16 Zhu Qing, Chen Xiaobao, Chen Jianping *et al.*. DFB fiber laser fabrication by moving phase mask[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2006, **1**(1):17~20
朱清,陈小宝,陈建平.相位掩模板移动法制作DFB光纤激光器[J].*光纤与电缆及其应用技术*,2006,**1**(1):17~20
 - 17 Jiang Dianjie, Liu Haitao, Chen Xiangfei *et al.*. DFB fiber laser[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2004, **15**(Suppl.): 126~129
姜典杰,刘海涛,陈向飞等.DFB光纤激光器[J].*光电子·激光*,2004,**15**(增刊):126~129
 - 18 Liu Haitao, Chen Jianping, Chen Xiangfei *et al.*. Fabrication of distributed feedback Bragg fiber laser on regular Er-doped fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):873~876
刘海涛,陈建平,陈向飞等.低掺杂铒纤上分布反馈布拉格光纤激光器的制作[J].*中国激光*,2006,**33**(7):873~876
 - 19 G. A. Ball, W. H. Glenn. Design of a single-mode linear-cavity erbium fiber laser utilizing Bragg reflectors[J]. *J. Light Wave Technology*, 1992, **10**(10): 1338~1343
 - 20 Zhao Ming, Guo Yubing, Wang Tianshu *et al.*. Numerical analyses on tunable Yb³⁺/Er³⁺ co-doped ring fiber laser[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2006, **7**(2):70~72
赵铭,郭玉彬,王天枢等.波长可调谐环形腔铒镱共掺光纤激光器的数值研究[J].*空军工程大学学报(自然科学版)*,2006,**7**(2):70~72
 - 21 Ke Xiangping. Characteristic of Yb³⁺/Er³⁺ co-doped fiber amplifier[J]. *Journal of WUT (Information & Management Engineering Edition)*, 2006, **28**(7):109~116
柯湘萍.铒镱共掺光纤放大器的共掺杂特性研究[J].*武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*,2006,**28**(7):109~116
 - 22 Ma Lina, Hu Zhengliang, Hu Yongming *et al.*. Study on upconversion fluorescence of Er³⁺ 2 doped fiber amplifier pumped at 980 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1463~1468
马丽娜,胡正良,胡永明等.980 nm抽运时掺铒光纤放大器中的上转换发光效应研究[J].*中国激光*,2005,**32**(11):1463~1468
 - 23 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Chourong *et al.*. Principles of Laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002
周炳琨,高以智,陈倜嵘等.激光原理[M].北京:国防工业出版社,2002
 - 24 Luo Hong. Research on Fiber Optic Hydrophone Used for Towed Line Array[D]. National University of Defense Technology, 2007
罗洪.拖曳阵列用光纤水听器研究[D].国防科学技术大学,2007
 - 25 Xiong Shuidong. Research on Fiber Optic Vector Hydrophone[D]. National University of Defense Technology, 2003
熊水东.光纤矢量水听器研究[D].国防科学技术大学,2003
 - 26 Ni Ming, Xiong Shuidong, Meng Zhou *et al.*. Research of digital demodulation of the phase generated-carrier technique in fiber optic hydrophone systems[J]. *Applied Acoustics*, 2004, **23**(6):5~11
倪明,熊水东,孟洲等.数字化相位载波解调方案在光纤水听器系统中的实现[J].*应用声学*,2004,**23**(6):5~11
 - 27 Ni Ming, Zhang Renhe, Hu Yongming *et al.*. A discuss on the sensitivity of fiber-optic hydrophone[J]. *Applied Acoustics*, 2002, **21**(6):18~21
倪明,张仁和,胡永明等.关于光纤水听器灵敏度的讨论[J].*应用声学*,2002,**21**(6):18~21
 - 28 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. Phase compensating detection method of interferometric fiber-optic hydrophones based on tuning the frequency of the laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):654~658
王泽锋,罗洪,熊水东等.基于光频调节的干涉型光纤水听器相位补偿检测方法[J].*光学学报*,2007,**27**(4):654~658
 - 29 Luo Hong, Xiong Shuidong, Hu Yongming *et al.*. All polarization-maintaining fiber optic hydrophone based on phase generated carrier modulation/demodulation technique [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(1):12~14
罗洪,熊水东,胡永明等.基于相位载波调制解调技术的全保偏光纤水听器[J].*半导体光电*,2006,**27**(1):12~14
 - 30 Ni Ming, Li Xiulin, Zhang Renhe *et al.*. Seatests of an all-optical fiber-optic hydrophone system[J]. *Acta Acustica*, 2004, **29**(6):539~543
倪明,李秀林,张仁和等.全光光纤水听器系统海上试验[J].*声学学报*,2004,**29**(6):539~543