

doi:10.3788/gzxb20174604.0414001

分布反馈光纤激光器阵列中外腔反馈特性研究

郝歌扬^{1,2}, 吴国俊¹, 吕沛¹, 王皓¹, 刘博¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:以半导体激光器中的复合腔模型和实测的分布反馈光纤激光器的外腔端面反射率为基础, 对不同反射率条件下分布反馈光纤激光器的输出功率进行了仿真, 同时搭建了二基元分布反馈光纤激光器阵列实验平台, 对仿真结果进行了验证. 仿真与实验结果表明: 外腔反馈光重新注入分布反馈光纤激光器会增加激光器的输出功率, 降低了阵列的输出功率平坦性. 并且外腔端面反射率越大, 这种平坦性降低的效果越明显. 在构建分布反馈光纤激光器阵列时, 应考虑外腔反馈对阵列输出功率平坦性造成的影响, 尽量选择外腔端面反射率较小的激光器进行组阵.

关键词: 光纤光学; 输出功率平坦性; 复合腔模型; 分布反馈光纤激光器; 外腔端面反射率

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0414001-6

Characteristics of External Optical Feedback in Distributed Feedback Fiber Lasers Array

HAO Ge-yang^{1,2}, WU Guo-jun¹, LÜ Pei¹, WANG Hao¹, LIU Bo¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 10049, China)

Abstract: The simulation results between different facet reflectivity of external cavity and output power of distributed feedback fiber laser are presented, based on compound cavity laser model and facet reflectivity of external cavity measured by optical spectrum analyzers. And a two elements experiment system is constructed to prove this relationship. It is found that the output power of distributed feedback fiber laser will be increased and the flatness of distributed feedback fiber lasers array will be worsed due to the external optical feedback. And the larger facet reflectivity of external cavity is, the lower flatness of distributed feedback fiber lasers array will be. The influence of external optical feedback to the flatness of distributed feedback fiber lasers array should be considered, and distributed feedback fiber laser which have lower facet reflectivity should be used for constitutes the distributed feedback fiber lasers array.

Key words: Fiber optics; Output power flatness; Compound cavity laser model; Distributed feedback fiber lasers array; Facet reflectivity of external cavity

OCIS Codes: 140.3425; 060.2310; 140.3490

0 引言

分布反馈光纤激光器阵列是由多个分布反馈光纤激光器(Distributed Feedback Fiber Laser, DFB-FL)采用频分复用、时分复用等复用技术组成的激光器阵列,在水声传感^[1-2]、结构健康监测^[3]、油气资源勘测^[4]、压力、温度及其他参量的高准确度分布式光纤传感领域具有广泛的应用. 早在 2005 年,澳大利亚防务科学与

基金项目:国家自然科学基金(No. 61405244)和海洋经济创新发展区域示范专项(No. SZHY2014-C02-01)资助

第一作者:郝歌扬(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为水下光学与光纤光学. Email: haogeyang@opt.cn

导师(通讯作者):吴国俊(1978-),男,研究员,博士,主要研究方向为水下光学. Email: wuguojun@opt.ac.cn

收稿日期:2016-11-10; **录用日期:**2017-01-06

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

技术组织和泰利斯水下系统公司就开始研究基于DFB光纤激光器的水下监听系统^[5]；2010年后，国内诸如国防科学技术大学^[6]、海军工程大学^[7]、中科院半导体所^[8]等多家单位也开展了将DFB光纤激光器应用于传感方面的研究工作，并取得了诸多成果。

对于DFB光纤激光传感阵列而言，输出功率的平坦性是考核阵列性能的重要指标之一^[7,8]，不同通道的输出功率差别较大，会对后续光电放大电路和信号解调算法设计造成很大的影响，同时降低了单根光纤可集成的最大激光器个数^[9]。DFB光纤激光器由同一根光纤串联并通过同一个泵浦光源泵浦时，泵浦光通过每一个激光器后会逐级衰减，这种泵浦光功率的不同级是造成整个激光器阵列输出功率平坦性差的主要原因；另外，当DFB光纤激光器进行串联时，两个激光器之间的端面反射，瑞利散射等散射光注入谐振腔也会对其输出功率产生较大影响，加剧了阵列间的输出功率不平坦性。

本文着重分析DFB光纤激光器中相移光栅的端面反射对DFB光纤激光器输出功率的影响，对不同外腔端面反射率与DFB光纤激光器的输出功率的关系进行了数值仿真及实验验证，为构建DFB光纤激光器阵列并提高阵列的输出功率平坦性提供参考。

1 基本原理

1.1 外腔反馈下的复合腔模型

DFB光纤激光器可以近似认为是一个二能级激光器系统^[10,11]，增益介质为有源光纤，谐振腔是在有源光纤上刻蚀的相移布喇格光栅。在980 nm半导体激光器的泵浦下，铟离子吸收泵浦光并辐射出1550 nm波段的光子，经过谐振腔的放大作用，相移光栅两端出射1550 nm波段的激光。因此，在基于DFB光纤激光器的传感阵列中，前一个DFB光纤激光器的后向输出光会在其后级联的DFB光纤激光器的相移光栅前端面发生部分反射，重新注入到谐振腔中，这将导致DFB光纤激光器输出功率特性发生变化。

为了分析后向反射光对激光器的影响，首先介绍外腔反馈下的复合腔模型^[12]，如图1所示。将DFB光纤激光器的谐振腔简化为一个腔长为 L_c 的F-P腔，两个子光栅作为腔镜 M_1 和 M_2 ，反射率分别用 r_1 、 r_2 表示。将后一个DFB光纤激光器的前端面与前一个激光器的后端面之间的传输光纤视为一个腔长为 L 的外腔，后一个激光器的前端面作为第三个反射镜(M_3)，反射率用 r_{ext} 表示，内腔和外腔共同组成了一个外腔反馈条件下的复合腔模型。

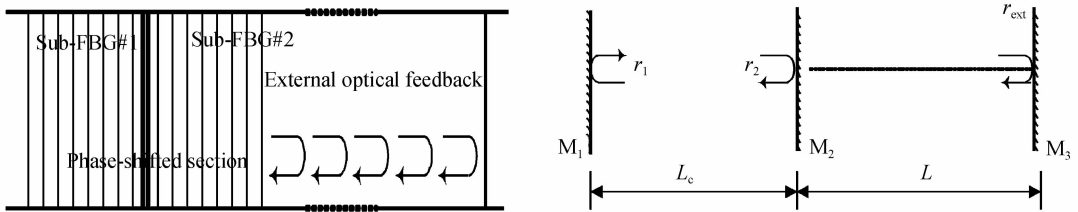


图1 外腔反馈下的复合腔模型

Fig.1 Compound cavity laser model with external optical feedback

为了表征外腔反馈光的大小以及其对激光器的影响情况，引入外腔耦合系数 κ'_{ext} 和阈值增益系数 g_{th} ，数学关系为

$$\kappa'_{ext} = \frac{r_{ext}}{r_2} (1 - r_2^2) \quad (1)$$

$$g_{th} = 4\kappa \exp(-\kappa L_c) \quad (2)$$

在弱反馈条件下有 $r_{ext} \ll r_2$ ， $\kappa'_{ext} \ll 1$ ，外腔反馈光造成的阈值增益的变化情况可以表示为

$$g_c = g_{th} - \frac{\kappa'_{ext}}{L} \cos(2\pi\nu\tau_{ext}) \quad (3)$$

式中， ν 表示DFB光纤激光器的激光波长， τ_{ext} 表示外腔引起的周程时延。

则弱反馈条件下高能级粒子数密度 $n'_{2,th}$ 的取值为

$$n'_{2,th} = n_{2,th} e^{-g_c} \quad (4)$$

只考虑泵浦光的吸收，信号光的受激吸收、受激辐射和自发辐射时，DFB光纤激光器高能级粒子数密度

n_2 的速率方程为^[13]

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{P_p \Gamma_p \sigma_{a,p} n_1}{h \nu_p \pi b_{\text{eff}}^2} - \frac{P_s \Gamma_s (\sigma_{e,s} n_2 - \sigma_{a,s} n_1)}{h \nu_s \pi b_{\text{eff}}^2} - \frac{n_2}{\tau_2} \quad (5)$$

式中, Γ_p 和 Γ_s 为泵浦光和信号光与铒离子的重叠因子, b_{eff} 为铒离子分布的有效半径, τ_2 为高能级粒子寿命, $\sigma_{a,p}$ 为泵浦光的吸收截面面积, $\sigma_{a,s}$ 和 $\sigma_{e,s}$ 分别为信号光的吸收截面和辐射截面的面积, P_p 为泵浦光功率. 当 DFB 光纤激光器处于阈值状态时, 信号光强度很小, 式(1)中第二项可以忽略, 根据静态条件 $dn_2/dt=0$, 阈值泵浦功率为

$$P_{p,\text{th}} = \frac{1}{\frac{n_t}{n_{2,\text{th}}} - 1} P_{p,\text{tr}} \quad (6)$$

$$P_{p,\text{tr}} = \frac{h \nu_p \pi b_{\text{eff}}^2}{\Gamma_p \sigma_{a,p} \tau_2} \quad (7)$$

式中, κ 为光栅的耦合系数, n_t 为 Er^{3+} 掺杂浓度, $n_{2,\text{th}}$ 为阈值条件下高能级粒子数密度. $P_{p,\text{tr}}$ 是掺铒光纤高能级粒子数密度处于饱和时对应的特殊泵浦功率^[14-15], 由有源光纤本身参量确定, 与 DFB 光纤激光器参量无关.

则激光器的输出功率可以表示为

$$P_s = \frac{\Gamma_p \nu_s \sigma_{a,p}}{\Gamma_s \nu_p \left(\frac{n_{2,\text{th}}}{n_t - n_{2,\text{th}}} \sigma_{e,s} - \sigma_{a,s} \right)} (P_p - P_{p,\text{th}}) \quad (8)$$

将式(6), (7)带入式(8), 得

$$P_s = \frac{\Gamma_p \nu_s \sigma_{a,p}}{\Gamma_s \nu_p \left(\frac{n_{2,\text{th}}}{n_t - n_{2,\text{th}}} \sigma_{e,s} - \sigma_{a,s} \right)} \left(P_p - \frac{n_{2,\text{th}}}{n_t - n_{2,\text{th}}} P_{p,\text{tr}} \right) \quad (9)$$

由以上分析可以看出, 当 DFB 光纤激光器的结构确定后, 阈值泵浦功率和输出功率只与高能级粒子数密度有关, 外腔反馈光注入 DFB 光纤激光器的谐振腔将通过改变阈值增益来改变高能级粒子数的密度, 并最终导致阈值泵浦功率和激光器的输出功率发生变化, 外腔端面反射率的大小决定了激光器的输出功率的变化程度.

1.2 外腔端面反射率 r_{ext} 的测量

由式(1)和式(3)可以看出, 外腔端面反射率 r_{ext} 决定了 DFB 光纤激光器阈值增益 g_c 的取值, 进而会对激光器输出功率仿真结果的准确性产生较大影响, 因此首先需要对外腔端面反射率 r_{ext} 进行准确的测量.

根据外腔端面反射率的定义, r_{ext} 可以表示为

$$r_{\text{ext}} = 1 - \frac{\text{Transmit power}}{\text{Emitted power}} \quad (10)$$

实验采用直接测量 DFB 光纤激光器透射光谱的方法来确定 DFB 光纤激光器的外腔端面反射率, DFB 光纤激光器的正向输出端与超宽带白光光源(NKT 公司 SuperK Compact, 波长范围 400~2 400 nm)相连, 反向输出端与光谱分析仪(YOKOGAWA 公司 AQ6375, 波长范围 1 200 nm~2 400 nm, 波长分辨率 0.05 nm)相连, 光纤接头采用 FC/APC 接头, 测试平台如图 2 所示.

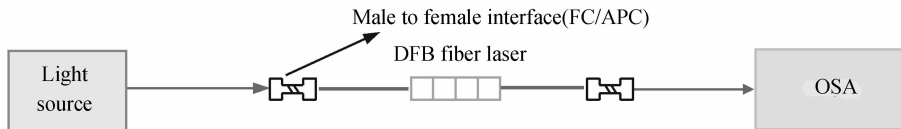


图 2 外腔端面反射率测试系统

Fig. 2 An experiment system of Facet reflectivity of external cavity

为了便于表述, 对测试的三支 DFB 光纤激光器进行标号, $\text{DFB}^{\#1} = 1\ 532.68\ \text{nm}$, 阈值泵浦功率 $P_{p,\text{th}} = 6.5\ \text{mW}$, $\text{DFB}^{\#2} = 1\ 544.51\ \text{nm}$, $P_{p,\text{th}} = 6.7\ \text{mW}$, $\text{DFB}^{\#3} = 1\ 546.6\ \text{nm}$, $P_{p,\text{th}} = 6.8\ \text{mW}$. 当白光光源对 DFB 光纤激光器进行照射时, 将光谱分析仪固定在 1 530~1 550 nm 范围内扫频, 分别对每个激光器的透射光谱进行 5 次测量. 在后期数据处理过程中发现对三支激光器共进行的 15 次测量中激光器输出波长的最大漂移

不超过 $\pm 0.002\text{nm}$,各个透射峰强度的抖动不超过 $\pm 0.005\text{ dBm}$,经过换算后外腔端面反射率的测量误差不超过 0.11% ,因此认为多组测量结果一致,并采用其中一组数据计算外腔端面反射率,测量光谱图如图3所示.

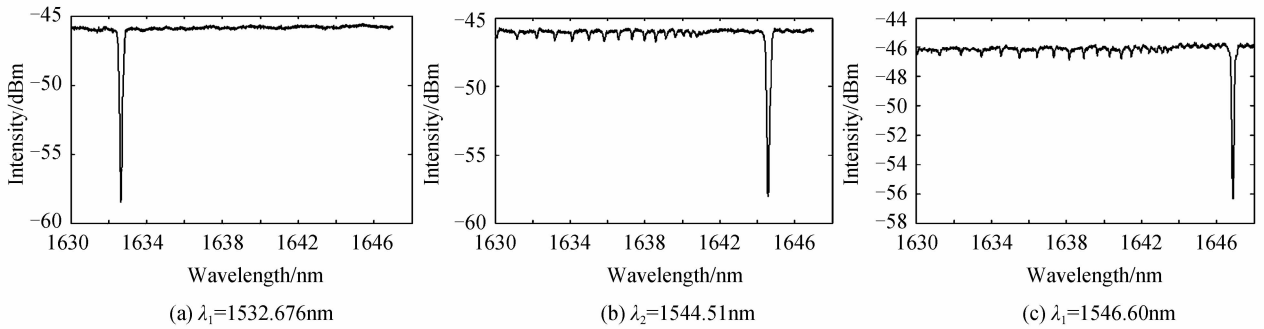


图3 不同输出波长的DFB光纤激光器的透射光谱

Fig. 3 Transmission spectrums of DFB fiber lasers with different wavelength

由图3可以看出,DFB^{#1}的输出波长为 1532.676 nm ,在DFB^{#2}和DFB^{#3}的透射光谱中, 1532.676 nm 波长处透射峰值强度为 -46.094 dBm 和 -46.192 dBm ,本底强度为 -46 dBm ,根据式(10)对外腔端面反射率计算可得,DFB^{#2}和DFB^{#3}在 1532.676 nm 处的外腔端面反射率 r_{ext} 分别为 2.14% 和 4.32% .

1.3 不同外腔端面反射率下的输出功率仿真

在得到DFB^{#2}和DFB^{#3}在DFB^{#1}激光波长处的外腔端面反射率后,通过式(9)对不同外腔端面反射率条件下DFB^{#1}的输出功率进行了仿真,由于在实际应用中DFB光纤激光器的泵浦激光功率多保持在 50 mW 左右,因此在仿真中泵浦功率的范围确定为 $20\sim 80\text{ mW}$,仿真效果图如图4所示.

由图4可以看出,与不存在外腔反馈即DFB光纤激光器单独泵浦时相比,外腔反馈光的存在会增加DFB光纤激光器的输出功率,并且外腔端面反射率越高,DFB光纤激光器输出功率的增量越大.

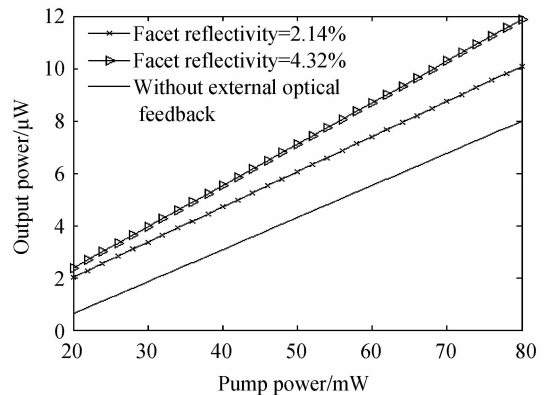


图4 不同外腔端面反射率对应的输出功率

Fig. 4 The output power with different facet reflectivity

2 实验验证

2.1 实验装置

为了验证不同外腔端面反射率条件下DFB光纤激光器输出功率的变化情况,设计了如图5所示实验装置.泵浦激光器产生 980 nm 的泵浦激光,经过光隔离器和 $980/1550$ 波分复用器后进入DFB光纤激光器阵列,DFB光纤激光器阵列的反射光通过波分复用器及解波分复用器后由光电探测器接收,通过数据采集卡在上位机软件进行记录.DFB光纤激光器阵列中第一基元为DFB^{#1},第二个基元为DFB^{#2}或DFB^{#3},通过测量二基元阵列中DFB^{#1}的输出功率即可得出不同端面反射率情况下DFB光纤激光器输出功率的变化情况.

为了便于与仿真结果进行比对,设定的泵浦功率也在 $20\sim 80\text{ mW}$ 范围内变化.为了减少光器件接插、瑞利散射^[14]、光纤熔接损耗等对实验结果的干扰,两个DFB光纤激光器之间的光纤长度为 2 m ,采用光纤熔接机熔接时控制损耗不大于 0.01 dB ,DFB光纤激光器阵列尾纤采用斜八度切割,避免端面反射.整个实验系统中主要光纤器件的损耗情况为: $980/1550\text{ nm}$ 波分复用器由输入端到 980 nm 输出端的插入损耗为 0.16 dB ;解波分复用器中DFB^{#1}对应的插入损耗为 0.33 dB ,光纤FC/APC接头的插入损耗 0.2 dB .另外,为了得到较为准确的实验结果,对每组二基元阵列进行三次重复实验,实验结果取平均值后再进行曲线拟合.

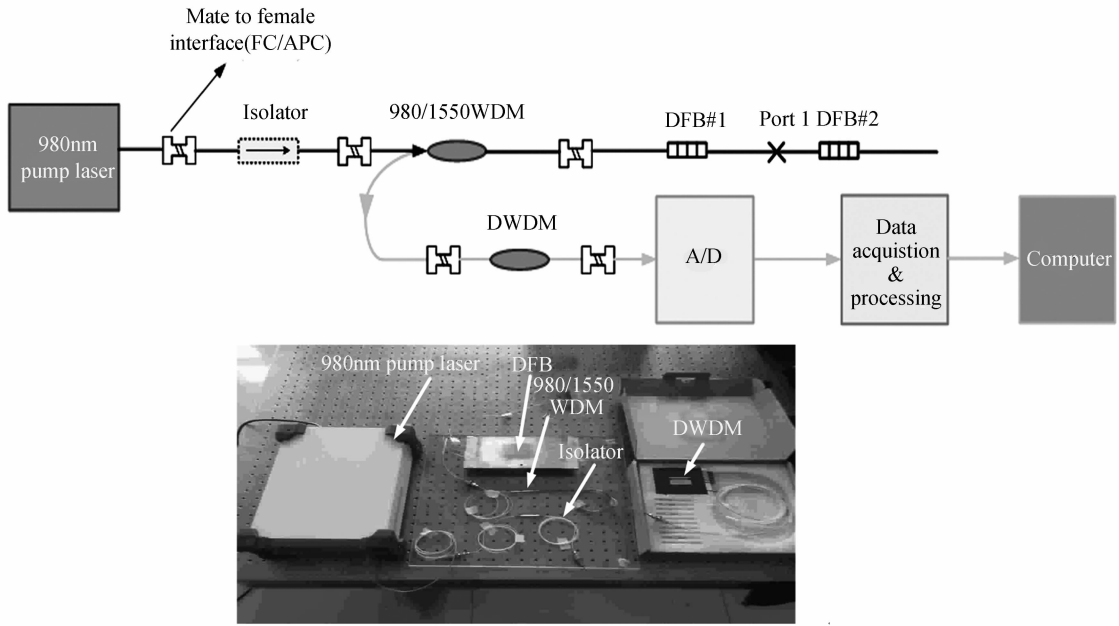


图 5 二基元 DFB 光纤激光器阵列输出功率测试系统

Fig. 5 Output power test setup of two elements DFB fiber lasers array

2.2 实验结果及数据分析

图 6(a)表示将 DFB#1 与 DFB#2 级联,即外腔端面反射率为 2.14% 时 DFB#1 输出功率的仿真结果与实测输出功率对比图,图 6(b)表示 DFB#1 和 DFB#3 级联,即外腔端面反射率为 4.32% 时 DFB#1 输出功率的仿真结果与实测输出功率对比图.图 6(c)表示两组实验数据之间的对比结果.

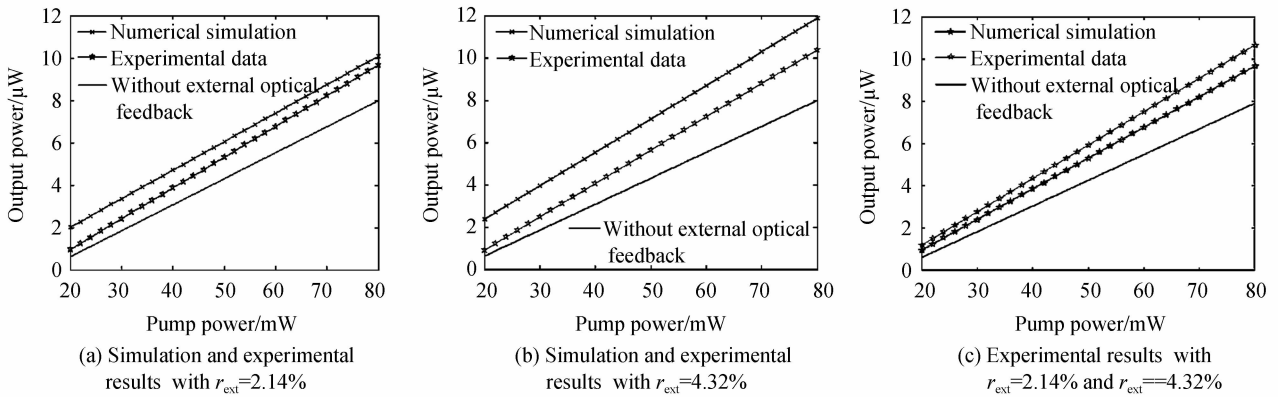


图 6 不同端面反射率情况下 DFB 光纤激光器的输出功率变化情况

Fig. 6 Influences of output power in DFB fiber laser with different facet reflectivity

通过实验结果可以看出,外腔反馈光重新注入 DFB 光纤激光器确实增大了激光器的输出功率,并且外腔端面反射率越大,这种输出功率增大的效果越明显.同时通过对阈值泵浦功率的多次测量发现,外腔端面反射使得 DFB 光纤激光器的阈值泵浦功率降低了 2~3 mW.因此,DFB 光纤激光器的斜率效率也有略微提高.当泵浦功率为 80 mW 时,不存在外腔端面反射时激光器的斜率效率约为 0.011%,当外腔端面反射率为 2.14% 时,斜率效率提高了约 0.002%,当外腔端面反射率为 4.32% 时,斜率效率提高了约 0.0024%.另外,由于仿真中未考虑整个光纤链路中各种光器件和光纤接头的插入损耗对输出功率的影响,仿真得到的输出功率曲线略高于实际测量得到的输出功率曲线.

3 结论

本文以半导体激光器中弱反馈条件下的复合腔模型作为理论依据,分析了外腔端面反射对 DFB 光纤激光器输出功率的影响,对外腔端面反射率不同时的激光器输出功率情况进行了仿真,并设计实验对仿真结果

进行了验证. 仿真与实验结果表明, 外腔反馈光重新注入 DFB 光纤激光器将会增大激光器的输出功率, 并且外腔端面反射率越大, 这种输出功率增大的效果越明显. 即意味着除了泵浦光逐级衰减造成的 DFB 光纤激光器阵列平坦性降低外, 外腔反馈光的存在将会导致阵列输出功率平坦性进一步恶化, 恶化程度与外腔端面反射率有关. 因此在构建 DFB 光纤激光器阵列及后续光电放大电路设计时, 应考虑外腔反馈对阵列输出功率平坦性造成的影响, 尽量选择外腔端面反射率较小的激光器进行组阵.

参考文献

- [1] LAUNAY F X, BOUFFARON R, LARDAT R, *et al.* Acoustic antenna based on fiber laser hydrophones[C]. SPIE, 2013, **9157**: 91570Y.
- [2] FOSTER S, TIKHOMIROV A, HARRISON J, *et al.* Demonstration of an advanced fibre laser hydrophone array in gulf st[C]. SPIE, 2015, **9634**: 96342F.
- [3] HAO Geng-jie, HUANG Wen-zhu, ZHANG Wen-tao, *et al.* Distributed feedback fiber laser acoustic emission sensor for concrete structure health monitoring[C]. SPIE, 2014, **9157**: 91570M.
- [4] CHEN Rong-zhang, YAN Ai-dong, ZAGHLOUL M, *et al.* Monitoring of hydraulic fracturing using DFB fiber laser acoustic sensors[C]. CLEO, 2015.
- [5] FOSTER S. Listening with light[R]. Australian Defense Science, 2005, **13**(1): 10-11.
- [6] MA Li-na, HU Yong-ming, LUO Hong, *et al.* DFB fiber laser hydrophone with flat frequency response and enhanced acoustic pressure sensitivity[J]. *Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(17): 1280-1282.
- [7] GU Hong-can, HUANG Jun-bin, YUAN Bing-cheng, *et al.* An experimental study on the fiber optic hydrophone array [J]. *Journal of Optoelectronics . Lasers*, 2009, **20**(5): 612-615.
顾宏灿, 黄俊斌, 苑秉成, 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.
- [8] XU Tuan-wei. Research on distributed feedback fiber lasers[D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2010.
徐团伟. 分布反馈(DFB)光纤激光器的研究[D]. 北京, 中国科学院半导体研究所, 2010: 106-109.
- [9] WU Yue-feng, LI Fang, XU Tuan-wei, *et al.* External optical feedback induced noise in dfb fiber laser sensor system [C]. APOS, 2008.
- [10] GILES C R, DESURIRE E. Modeling Erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, **9**(2): 271-282.
- [11] PETERMAN K. External optical feedback phenomena in semiconductor lasers[J]. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, **1**(2): 480-488.
- [12] BARMENKOV Y O, KIRYANOV A V, MILLAN P P, *et al.* Threshold of a symmetrically pumped distributed feedback fiber laser with a variable phase shift[J]. *Journal of Quantum Electronics*, 2008, **44**(8): 718-723.
- [13] CRANCH G A, FLOCKHART M H, KIRKENDALL C K. Distributed feedback fiber laser strain sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1161-1172.
- [14] WANG Zhi-yong, ZHANG Jing, GE Ting-wu, *et al.* Highly coupling efficient mode-field adaptors for high power fiber lasers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 319-324.
王智勇, 张晶, 葛廷武, 等. 高功率高耦合效率光纤模场匹配器[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(2): 319-324.
- [15] REN Mei-zhen, XU Tuan-wei, ZHANG Fa-xiang, *et al.* Statistical properties of rayleigh backscattered light in single-mode fibers caused by a highly coherent laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(1): 0105001.
任梅珍, 徐团伟, 张发祥, 等. 单模光纤中高相干光源的瑞利散射光的统计特性[J]. 中国激光, 2013, **40**(1): 0105001.