

文章编号: 0258-7025(2006)07-0873-04

低掺杂铒纤上分布反馈布拉格光纤 激光器的制作

刘海涛¹, 陈建平¹, 陈向飞², 姜典杰², 黄俊斌³

(¹ 上海交通大学“区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室, 上海 200030)
(² 清华大学电子系, 北京 100084; ³ 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要 采用准分子激光器成功地在低掺杂普通铒纤上制作出 5 cm 的光纤光栅分布反馈布拉格 (DFB) 激光器, 铒纤的峰值吸收率为 5 dB/m, 在 100 mW, 980 nm 抽运光条件下, 光纤激光器的输出功率为 50 μ W, 边模抑制比为 50 dB。使用耦合模理论分析了一段 5 cm 带相移的分布反馈布拉格光纤激光器输出光强同腔内损耗及相移量的关系, 计算结果表明, 光纤腔内的损耗对激光器的输出具有非常重要的影响, 大的损耗对应获得最大功率的光栅耦合强度相应减小, 因此, 在低掺杂铒纤上制作分布反馈布拉格激光器必须正确估计光纤激光器的腔内损耗, 选择合适的光栅耦合强度, 可以获得较大的输出功率。

关键词 光电子学; 分布反馈布拉格光纤激光器; 耦合强度; 相移; 光栅损耗

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Fabrication of Distributed Feedback Bragg Fiber Laser on Regular Er-Doped Fiber

LIU Hai-tao¹, CHEN Jian-ping¹, CHEN Xiang-fei², JIANG Dian-jie², HUANG Jun-bin³

¹ *The State Key Laboratory on Fiber-Optic Local Area Communication Networks and
Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*

² *Electronics Engineer Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

³ *Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China*

Abstract A 5 cm fiber Bragg grating distributed feedback Bragg (DFB) fiber laser is fabricated by using 248 nm KrF excimer laser, the fiber used is regular Er-doped fiber with peak absorption of 5 dB/m, the fiber laser has a output power of 50 μ W and 50 dB sidelobe suppression ratio by a 100 mW 980 nm pump laser. Coupled-mode theory was introduced to analyze DFB fiber laser output characteristics and transfer-matrix method was used to simulate a 5 cm phase shifted DFB fiber laser. From the analysis, it showed that the cavity loss is a very important factor affecting the output power, larger loss corresponds to lower grating coupling coefficient. Hence, when fabricating DFB fiber laser on regular Er-doped fiber, the cavity loss evaluation and coupling coefficient optimization could yield high output power.

Key words optoelectronics; distributed feedback Bragg fiber laser; coupling coefficient; phase shift; grating loss

1 引 言

光纤激光器由于其工作于单频、相干长度长、线宽窄、波长容易控制、与光纤兼容等优点, 在近几年

内得到了广泛的研究和关注^[1~6]。其中分布反馈布拉格 (DFB) 光纤激光器可以通过直接在掺铒光纤 (EDF) 中写入带相移的光纤光栅来实现, 在合适的

收稿日期: 2005-10-27; 收到修改稿日期: 2006-01-13

作者简介: 刘海涛 (1971—), 男, 山东烟台人, 上海交通大学博士研究生, 主要从事光纤光栅传感器与光纤通信技术的研究。E-mail: Liuhaitao@sjtu.edu.cn

导师简介: 陈建平 (1962—), 男, 浙江金华人, 上海交通大学电子工程系教授, 博士生导师, 目前研究方向为导波光学与光器件、快速光交换及光纤传感技术。E-mail: jpchen62@sjtu.edu.cn

抽运条件、光栅强度及损耗条件下,容易激射出单频的稳定的激光输出。

由于铒镱共掺光纤对 980 nm 抽运光的吸收损耗非常大,即使 10 cm 的光纤也会产生非常大的损耗,因此如果需要多个波长复用,串联在后面的光栅不能得到相同的抽运光,激射功率差别会很大。在这种情况下,铒镱共掺光纤往往不能用来制作光纤激光器,需要在低吸收的普通铒纤上制作光纤光栅激光器以提高其波长复用能力。但是低吸收的普通铒纤的增益往往也非常小,在这种情况下,光栅腔内的损耗对激光能否激射起着非常重要的作用。文献 [1,2] 中分别利用了传输矩阵法和 Runge-Kutta 法计算了光纤激光器的输出功率同光栅强度的关系,结果显示激光器的输出功率随耦合因子的增加而增加,但是这是在没有损耗的理想情况下计算的,在实际情况下,光纤中含有各种不同的损耗,除了光纤的本征损耗(0.2 dB/km)外,还有因为紫外曝光引起的额外损耗。文献 [3] 引入 1 dB/m 的光纤损耗,并且计算了激光器输出功率同耦合系数的关系。对实际有一定的指导意义。本文计算了光栅在不同损耗情况下输出功率同耦合系数的关系,另外采用了不同的相移制作方法,在工艺上比较简单。

2 实验原理

通过扫描光束,并在光束扫描到模板中央的时候将模板移动半个周期的方法实现相移^[3],但是在实验中发现压电陶瓷(PZT)的重复性不是非常理想,使得这种方法得到相移重复性有些差异,并且不方便在线监测制作,因此,改进了光路制作系统,如图 1 所示。

实验中采用两个焦距分别为 100 mm 和 500 mm 的柱面石英透镜将光束扩束到 8 cm,在均匀相位掩

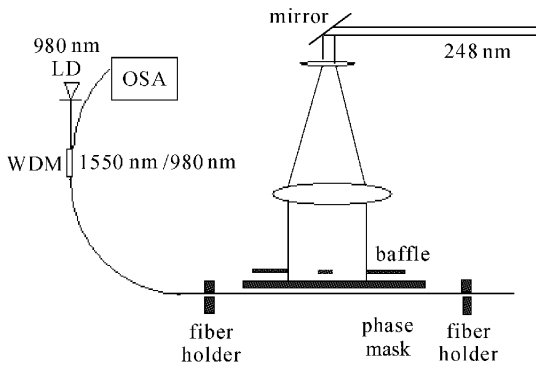


图 1 光纤激光器制作系统
Fig. 1 Fiber laser writing system

模板前面放置挡板,挡板由狭缝 A 和挡板 B 组成, A 用来控制光栅的长度, B 为三角形,遮挡区长度为 b , 如图 2 所示。制作光栅的过程中,处于挡板 B 后面区域的这一段光纤不被曝光。由于在曝光过程中,两端光纤的折射率在提高,而中央区域折射率不变,因此就会在形成一个由于折射率相对变化而产生的相移,其大小为 $\varphi = \frac{2\pi b}{\lambda} \Delta n$, 式中 Δn 为光栅折射率的提高, λ 为光栅的谐振波长。升高挡板 B 的高度,就可以调节中央遮挡区 b 的宽度,在相同曝光量的情况下,调节 b 就可以调节光栅的相移,但同时要注意挡板的宽度不宜太宽,否则容易使光谱中产生多个相移点,引起多波长激射。相移的位置对输出光功率是有影响的^[1,2],且左右端输出光功率不一样,为了简便起见,使相移区尽量靠近光栅的中央区域,这时光栅两端的输出光功率是相等的。

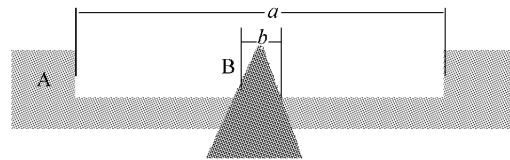


图 2 狭缝挡板(其中 $a = 5 \text{ cm}$)
Fig. 2 Sketch of the baffle ($a = 5 \text{ cm}$)

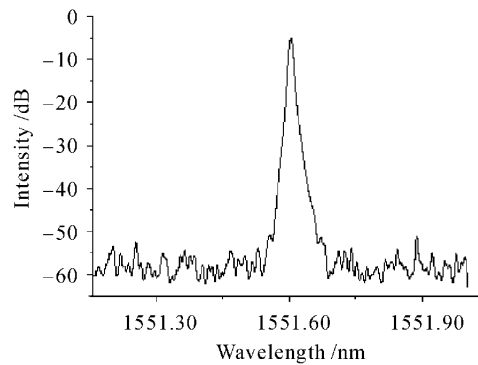


图 3 实测光纤激光器发射谱
Fig. 3 Spectrum of the fiber laser

图 3 为采用 Stockyale T2N 型铒纤载氢后,实际制作的一只 5 cm 的光纤激光器,根据光栅的反射率估计出该光栅的耦合系数 κ 在 130~170 之间,中央挡光区的长度为 10 mm,在抽运功率为 100 mW 的情况下,输出功率为 50 μW ,边模抑制比大于 50 dB。经过大量的实验,发现在氢载后的低掺杂铒纤上制作分布反馈布拉格光纤激光器,不容易激射,而且输出功率往往比较低,5 cm 左右的光纤激光器,其功率在 1~100 μW 之间。而相同情况下的铒镱共掺

光纤制作的激光器,激射功率往往在毫瓦级以上。

通过理论分析,发现在低掺杂铒纤上制作光纤激光器,由于光增益比较低,不可以忽略光栅内部的损耗。下面引用文献[1,2]中的方法,引入腔内损耗,计算损耗对于激光器输出功率的影响。

3 理论模型及实验分析

均匀光栅的数学表达式可以写为

$$n(z) = \bar{n}(z) + \Delta n(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right), \quad (1)$$

其中 $\bar{n}(z)$ 为折射率的平均值,可以看成是一个光栅周期内折射率变化的直流部分, Λ 为光栅周期。光纤光栅的光学性质就决定于(1)式中各个参数的选择,将它们统称为光栅参数。

铒纤中铒离子的浓度为 ρ ,为了简化模型,可以认为铒离子均匀分布在纤芯中,基于二能级稳态速率方程,可以得到铒离子的反转比例

$$x(z) = \frac{\sigma_a(\nu_s)\Gamma_s P_s(z)/h\nu_s + \sigma_a(\nu_p)\Gamma_p P_p(z)/h\nu_p}{[\sigma_e(\nu_s) + \sigma_a(\nu_s)]\Gamma_s P_s(z)/h\nu_s + [\sigma_e(\nu_p) + \sigma_a(\nu_p)]\Gamma_p P_p(z)/h\nu_p + \pi a^2/\tau}, \quad (2)$$

其中下标 s, p 分别表示信号光及抽运光, h 表示普朗克常数, ν 为光波频率, σ_e, σ_a 分别对应吸收及发射截面, τ 为铒离子激发态寿命, $P(z)$ 为位置 z 处前向波及后向波的总功率, Γ_s, Γ_p 分别表示信号光及抽运光在光纤中的模场限制因子。从 $x(z)$ 可以推出 z 处信号光及抽运光的增益

$$\begin{aligned} g_s(\nu, z) &= \rho \Gamma_s \{x(z)\sigma_{es}(\nu) - [1 - x(z)]\sigma_{as}(\nu)\}, \\ g_p(\nu, z) &= \rho \Gamma_p \{x(z)\sigma_{ep}(\nu) - [1 - x(z)]\sigma_{ap}(\nu)\}. \end{aligned} \quad (3)$$

应用耦合模方程并考虑周期为 Λ , 折射率调制为 Δn , 长度为 Δz 的一段光栅,其耦合模表达式为

$$\begin{bmatrix} E_s^+(z + \Delta z) \\ E_s^-(z + \Delta z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(r\Delta z) - i\frac{\Delta\beta}{\gamma}\sinh(\gamma\Delta z) & -i\frac{\kappa}{\gamma}\sinh(\gamma\Delta z) \\ i\frac{\kappa}{\gamma}\sinh(\gamma\Delta z) & \cosh(r\Delta z) - i\frac{\Delta\beta}{\gamma}\sinh(\gamma\Delta z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^+(z) \\ E_s^-(z) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 $\Delta\beta = i(g - \text{loss})/2 + 2\pi n/\lambda - \pi/\Lambda$, $\kappa = \pi\Delta n/\lambda$, $\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \Delta\beta^2}$, loss 为激光器的腔内损耗, $\Delta\beta$ 表示光波信号相对于光栅的复波矢, γ 为二者间的一个相对参数。

对于一段光栅,可以将其分成一段段的小光栅,在这小段光栅中认为光栅的周期、增益及其他参数是一样的,耦合模方程中满足的边界条件为: $E_s^+(z=0) = E_s^+(z=L) = 0$, 计算从左边 $z=0$ 开始,尝试不同的 λ 及 $E_s^-(z=0)$, 直到满足 $E_s^+(z=L) = 0$ 出现为止,这时的 $P_s(z=0) \propto E_s^-(z=0)$ 即为激光器左端的输出功率, $P_s(z=L) \propto E_s^+(z=L)$ 即为右端的输出功率。

在模拟中,相移量为 π , $\lambda_s = 1550 \text{ nm}$, $\lambda_p = 980 \text{ nm}$, $\rho = 1.74 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, $\tau = 10 \text{ ms}$, $\sigma_{as} = 1.85 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_{ap} = 2.08 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_{es} = 3.38 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_{ep} = 0.72 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 。抽运光的功率为 100 mW , 光栅的长度取 5 cm , 光栅的相移位于光栅的中心处,首先认为在绝对理想的情况下, $\text{loss} = 0$, 在这种情况下,光纤激光器的输出功率同其耦合系数 κ 的关系如图 4 所示。

由图 4 可以看出光纤激光器在耦合强度 κ 达到一定程度后开始激射,输出功率随 κ 的增加而增加,

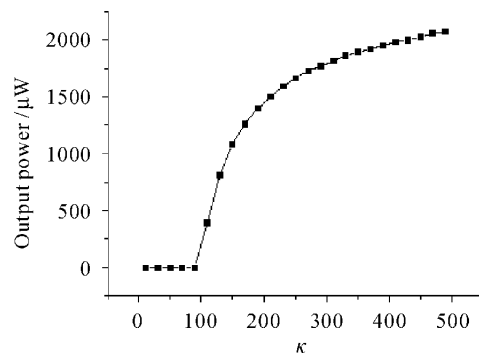


图 4 腔内无损耗情况下耦合系数同输出功率的关系
Fig. 4 Relationship between coupling coefficient and output power without cavity loss

同文献[1]中的结果相符。但实际上光纤是有损耗的,除了光纤的本征损耗外(0.0002 dB/m),还有因紫外光曝光引起的损耗,而且一般来说,随着曝光量的增加,光栅的损耗也会增大,因此在计算过程中,试图在腔内引入不同的损耗来观察 κ 对输出光功率的影响。

从图 5 显示的结果看出,随着腔内损耗的增加,激光器可以激射的 κ 的区域明显缩小,即使只计算光纤的本征损耗对于激光器的输出也会有极大的影

响,损耗对于激光器输出的影响表现在最大输出功率下降,能够激射的 κ 的区域缩小,但是不同的损耗对应的起振点的 κ 值却差不多,都在90~100左右。

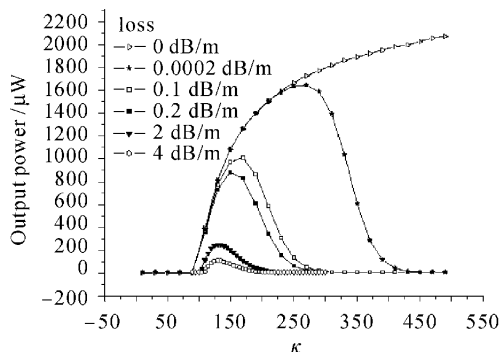


图5 腔内损耗不同情况下耦合系数同输出功率的关系

Fig. 5 Relationship between coupling coefficient and output power with different cavity loss

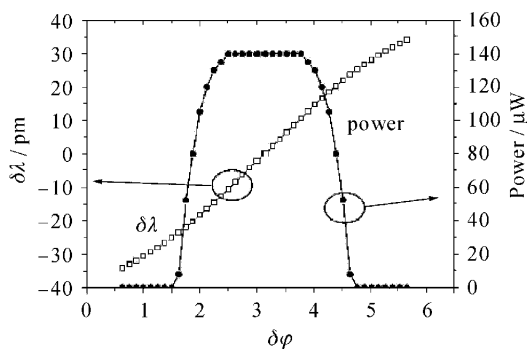


图6 相移量大小对激光输出波长及输出功率的影响
Fig. 6 Phase shift versus output power and wavelength

另外,在实验制作过程中,光栅中央相移的大小是随着照射量的增加逐渐变化的。图6为相移对激光输出波长及输出功率影响的模拟结果。模拟中假设腔内损耗为4 dB/m,耦合系数 $\kappa = 130$,光栅长度为5 cm。

从图6可看出,随着相移量的增加,激光波长是逐渐增大的;输出功率随相移量呈钟形变化,在相移量为 $\pi \pm 0.2\pi$ 大小的情况下,输出光功率基本不变。在实际制作过程中,可以采取在线监测的方法^[5],当光功率达到一定程度后,停止照射光栅。从图5,图6的模拟结果估计,图3中光栅的实际腔内损耗大概在4 dB/m的水平。

4 结 论

在实际制作工艺中,有高压载氢及紫外光照射工艺,这些工艺程序都会在光纤中带来额外的损耗。因此,在制作分布反馈布拉格光纤激光器的过程中,必须根据光栅的实际损耗值来仔细优化耦合系数及相移量大小,才有可能使激光器激射,并取得较大功率。

参 考 文 献

- 1 Vibeke C. Lauridsen, Thomas Sphndergaard, Poul Varming *et al.*. Design of distributed feedback fibre lasers [C]. ECOC, 1997, **448**:39~42
- 2 V. C. Lauridsen, J. H. Povlsen, P. Varming. Design of DFB fibre lasers [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(21):2028~2030
- 3 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
- 4 Chen Jialin, Chen Bai, Qiao Qiquan *et al.*. Study about making of Yb-doped phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):541~544
陈嘉琳,陈 柏,乔启全等. 掺Yb相移光纤光栅形成过程的分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):541~544
- 5 Chen Jialin, Liang Liping, Chen Bai *et al.*. Study on postprocess of $\lambda/4$ -shifted DFB Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):581~584
陈嘉琳,梁丽萍,陈 柏等. 掺镱相移分布反馈光纤激光器的后期制作与研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):581~584
- 6 Wang Tianshu, Guo Yubin, Li Jun *et al.*. All fiber type short cavity Er/Yb co-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1154~1154
王天枢,郭玉彬,李 军等. 全光纤型Er/Yb共掺光纤短腔激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1154~1154