

文章编号 1004-924X(2010)07-1468-08

980 nm 半导体激光器双布拉格光纤光栅波长锁定器

李 毅^{1,2}, 黄毅泽¹, 王海方¹, 俞晓静¹, 张 虎¹, 张 伟¹, 朱慧群^{1,3}

- (1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;
3. 五邑大学 薄膜与纳米材料研究所, 广东 江门 529020)

摘要:提出了优化由两个均匀布拉格光纤光栅组成的 980 nm 半导体激光器波长锁定器的方法以满足光纤放大器对半导体激光器的性能要求。运用耦合模理论推导了双布拉格光纤光栅(FBG)的透射率和反射率的解析表达式和波长锁定器增益方程。研究了两光栅之间的距离、光栅到激光器前端面的距离、光栅折射率、光栅折射率周期、光栅栅长和温度对激光器增益曲线的影响,并通过优化这些参数来达到最佳的锁模性能。测量了带双 FBG 波长锁定器的非致冷半导体激光器的输出光谱和出纤功率。实验结果表明:高功率非致冷 980 nm 半导体激光器在 0~70 °C 时的波长漂移为 0.5 nm,边模抑制比达 45 dB 以上,半峰值全宽度<1 nm。经优化设计的 980 nm 半导体激光器 FBG 波长锁定器可满足光纤放大器对非致冷半导体激光器大功率、长寿命、高可靠性、小尺寸等性能的要求。

关键词:980 nm 半导体激光器;双布拉格光纤光栅;波长锁定器;边模抑制比

中图分类号:TN248.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101807.1468

Wavelength stabilizer with dual fiber Bragg grating for 980 nm semiconductor laser

LI Yi^{1,2}, HUANG Yi-ze¹, WANG Hai-fang¹,
YU Xiao-jing¹, ZHANG Hu¹, ZHANG Wei¹, ZHU Hui-qun^{1,3}

- (1. *School of Optical-electrical Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*
2. *Shanghai Key Laboratory of Modern Optical Systems, Shanghai 200093, China;*
3. *Institute of Thin Films and Nanomaterials, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)*

Abstract: A optimization method is put forward for a wavelength stabilizer with dual Fiber Bragg Grating (FBG) used in 980 nm semiconductor lasers to meet the performance requirements of fiber amplifiers. The analytical expressions of transmittivity and reflectivity of dual FBG and the gain equations of the stabilizer are obtained by the coupled mode theory. The effects of the distance between the two gratings, the distance between laser front face and dual FBG, the period of refractivity, grating length, the refractivities and ambient temperatures of two gratings on the laser gain curves are analyzed. And these parameters then are optimized to achieve the best mode-stabilizing characteristics.

收稿日期:2010-03-31;**修订日期:**2010-05-17.

基金项目:国家 863 高科技研究发展计划资助项目(No. 2006AA03Z348);教育部科学技术研究重点项目(No. 207033);上海市科学技术委员会科技攻关计划项目(No. 06DZ11415);上海市教委科学技术研究重点项目(No. 10ZZ94)

The output spectral characteristics and powers of the uncooled semiconductor laser with dual FBG wavelength stabilizer are practically measured. Experimental results indicate that when the laser operates at 0~70 °C, the wavelength shift is 0.5 nm, the Side Mode Suppression Ratio (SMSR) is more than 45dB, and the Full Width at Half Maximum (FWHM) is less than 1 nm. The optimized wavelength stabilizer with FBGs can satisfy the requirements of fiber amplifiers for uncooled semiconductor lasers, and can achieve high powers, long life, high reliability, small sizes, and low costs.

Key words: 980 nm semiconductor laser; dual Fiber Bragg Grating(FBG); wavelength stabilizer; Side Mode Suppression Ratio(SMSR)

1 引言

对于持续发展的密集波分复用(DWDM)系统和光接入网而言,随着信道的逐渐增加^[1-5],严格控制掺铒光纤放大器的增益平坦度,获得稳定的放大信号尤为关键。高功率单模 980 nm 半导体激光器是光通信系统中光纤放大器的关键器件,但是,它在非致冷条件下的稳定性较差,为此,在尽可能不牺牲出纤功率的情况下提高非致冷 980 nm 半导体激光器的边模抑制比和波长稳定性的相关研究工作越来越受到人们的重视^[4-11]。研究表明,对提高半导体激光器的边模抑制比和波长稳定性来说,采用设定布拉格光纤光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)波长锁定器的方法优于在半导体激光器端面镀增透膜的方法。通常,F-P 腔半导体激光器与光纤光栅组成弱反馈外腔激光器,通过控制激光器电流和温度,调谐 FBG 波长可获得单模输出。用带制冷器的 980 nm 半导体激光器作为掺铒光纤放大器(EDFA)泵浦源时不仅体积较大,而且成本较高,很难适应光纤到户的发展要求。采用双 FBG 的弱反馈外腔设计不仅可以使激光器输出的光谱线宽由光纤光栅精确决定,同时可实现高功率单模运转,其折射率的温度稳定性优于半导体材料且不必担心载流子注入引起折射率变化,对啁啾具有较强的抑制作用,可以实现高边模抑制比和稳定的光谱输出,而且相对单 FBG 外腔其相干失效长度大大减小,可以实现非致冷 980 nm 半导体激光器小型化和低成本。基于上述优点设计和制备双 FBG 波长锁定器显得非常重要且有实际意义。

本文研究了双 FBG 波长锁定器的工作特性,

并引入一种新的设计 FBG 波长锁定器的方法。与过去的小驱动电流下工作的 980 nm 半导体激光器^[11]相比,设计的锁定器可在 0~70 °C 施加大驱动电流时,提高非致冷高功率 980 nm 半导体激光器的半峰值全宽度、边模抑制比和波长稳定性,且不牺牲出纤功率。

2 理论分析

2.1 FBG 的理论模型

在单模光纤中,让纤芯折射率发生周期性变化可构成结构最简单的均匀 FBG。FBG 的反射、透射特性可用耦合模理论描述^[12]。只有前向波入射时,反射波(后向输出)和透射波(前向输出)可分别表示为:

$$a(0) = \frac{k \sinh(SL)}{-\Delta\beta \sinh(SL) + iS \cosh(SL)} b(0), \quad (1)$$

$$b(L) = \frac{iS \exp(-i\beta_0 L)}{-\Delta\beta \sinh(SL) + iS \cosh(SL)} b(0), \quad (2)$$

其中 $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = 2n\pi/\lambda - 2n\pi/\lambda_B$, 为失谐波矢量, $S = (k^2 - \Delta\beta^2)^{1/2}$, n 为有效折射率, Λ 为折射率变化的周期(栅距), k 为耦合系数, λ 为光波波长, L 为光纤光栅长度, $\lambda_B = 2n\Lambda$ 为布拉格波长。定义光纤光栅的反射系数 r_g 和透射系数 t_g 分别为: $r_g = a(0)/b(0) = |r_g| \exp(i\varphi_r)$, $t_g = b(L)/b(0) = |t_g| \exp(i\varphi_t)$ 。可得:

$$|r_g| = \frac{k \sinh(SL)}{(\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL))^{1/2}}, \quad (3)$$

$$|t_g| = \frac{S}{(\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL))^{1/2}}, \quad (4)$$

对于一定调制深度和周期的光栅,其反射率可表

示为^[13]：

$$R_g = \frac{k^2 \sinh^2(SL)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)} (k^2 > \Delta\beta^2), \quad (5)$$

$$R_g = \frac{k^2 \sin^2(QL)}{\Delta\beta^2 - k^2 \cos^2(QL)} (k^2 < \Delta\beta^2), \quad (6)$$

$Q = (\Delta\beta^2 - k^2)^{1/2}$ ，在光纤光栅的中心波长 $\Delta\beta = 0$ 处，光纤光栅处于谐振状态，此时有最大的反射率为：

$$R(\lambda_B) = \tanh^2(|k|L), \quad (7)$$

光栅反射系数的相位角 ϕ_r ，即光波经光纤光栅反射后的相位变化为：

$$\phi_r = \pi + \arctan\left[\frac{S \cosh^2(SL)}{\Delta\beta \sinh^2(SL)}\right], \lambda \leq \lambda_B, \quad (8)$$

$$\phi_r = \arctan\left[\frac{S \cosh^2(SL)}{\Delta\beta \sinh^2(SL)}\right], \lambda > \lambda_B. \quad (9)$$

2.2 双 FBG 波长锁定器理论分析

双 FBG 波长锁定器主要是由 2 个参数不同的均匀 FBG 组成，其只在中心耦合波长附近的窄带宽内对光有较强的耦合反射作用。因此，对于激光器来说，尾纤后面所接的一对 FBG 组成了一个类似于法布里-珀罗(F-P)腔的谐振腔，只能在光纤光栅的反射带宽内产生谐振，在反射带宽外没有谐振峰。双 FBG 组成的谐振腔锁定 980 nm 非致冷半导体激光器的基本结构如图 1 所示。

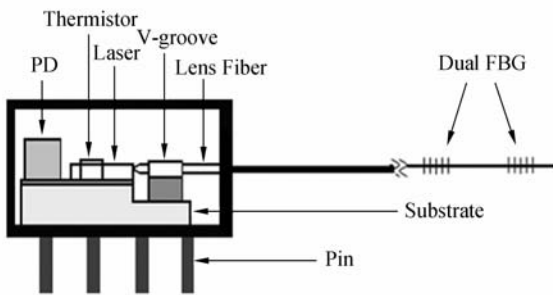


图 1 双光纤光栅非致冷半导体激光器的结构图
Fig. 1 Diagram of uncooled semiconductor laser with dual FBG

双 FBG 的结构如图 2 所示。在双 FBG 中 FBG_1 的反射系数和透射系数分别为 r_{g_1} 、 t_{g_1} ，长度为 L_1 ； FBG_2 的反射系数和透射系数分别为 r_{g_2} 、 t_{g_2} ，长度为 L_2 ；两个光栅之间距离为 h (腔长)。如果给定边界条件只有前向波入射 $B(0) = B_0$ 和 $A(L_1 + L_2 + h) = 0$ ，则 $z = L_1$ 处的前向波 b

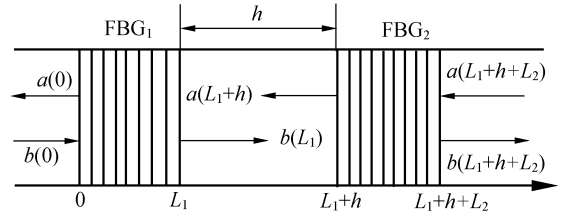


图 2 双 FBG 的结构示意图
Fig. 2 Diagram of dual FBG

(L_1) 应满足如下方程式：

$$b(L_1) = t_{g_1} b(0) \left(\frac{1}{1 - r_{g_1} r_{g_2} \exp(-i2\beta h)} \right), \quad (10)$$

同理可得：

$$b(L_1 + L_2 + h) = \frac{t_{g_1} t_{g_2} \exp(-i\beta h)}{1 - r_{g_1} r_{g_2} \exp(-i2\beta h)} b(0), \quad (11)$$

$$T = \frac{|t_{g_1}|^2 |t_{g_2}|^2}{(1 - |r_{g_1}| |r_{g_2}|)^2 + 4 |r_{g_1}| |r_{g_2}| \sin^2((\varphi_1 + \varphi_2 - 2\beta h)/2)}, \quad (12)$$

$$R = 1 - \frac{|t_{g_1}|^2 |t_{g_2}|^2}{(1 - |r_{g_1}| |r_{g_2}|)^2 + 4 |r_{g_1}| |r_{g_2}| \sin^2((\varphi_1 + \varphi_2 - 2\beta h)/2)}, \quad (13)$$

其中 T 为总透射率， R 为总反射率。

如果双 FBG 谐振腔长和波长满足相位谐振条件： $\delta + \varphi_{r_1} + \varphi_{r_2} = 2m\pi$ ， m 为自然数，则双 FBG 谐振腔在光栅的中心耦合波长 λ_B 处有谐振峰。其中 $\delta = \frac{4\pi nh}{\lambda}$ 是光程差， φ_r 是 FBG 在波长 λ 处的反射系数的相位因子。

对于双 FBG 谐振腔，其腔长和光栅中心耦合波长都不变，FBG 的反射带宽越小，光栅的反射系数相位因子影响就越大，由其组成的谐振腔就越容易实现单模运转。双 FBG 一般距离激光器出光端面应远大于其相干长度^[14]，此时激光器将工作在相干失效状态，激光器输出光谱最稳定。

双 FBG 在窄带宽内对光的耦合反射作用加强了激光器的前端反射率。当激光器工作在相干失效状态时，由双 FBG 谐振腔影响而得到的前端有效反射率为^[11]：

$$R_{\text{eff}}(\lambda) = R_f + \eta^2 \frac{(1 - R_f)^2 R}{1 - R_f R}, \quad (14)$$

其中 $R_{\text{eff}}(\lambda)$ 为前端有效反射率， R_f 为前端面反射率， R 为双 FBG 反射率， η 是透镜光纤与激光器

芯片的耦合效率。则激光器的模式增益为^[15]:

$$g_{\text{mod}}(\lambda) = \alpha_i + \frac{1}{2L_d} \ln\left(\frac{1}{R_b R_{\text{eff}}(\lambda)}\right), \quad (15)$$

α_i 是激光器腔内损耗, L_d 为激光器腔长, R_b 为激光器后端面反射率。

2.3 双 FBG 参数的优化

根据高功率单模 980 nm 半导体激光器的性能要求, 确定了双 FBG 参数优化的 3 个依据, 按照它们的重要性排列依次是: (1) 光谱输出的稳定性; (2) 出纤功率的损失程度; (3) 锁模特性。为此, 本文提出了下列优化方法, 在保证光谱输出稳定的前提下, 确保出纤功率最大, 边模抑制比最高。

由公式(13)、(14)和(15)不难发现, 可以优化的参数有两光栅之间的距离、光栅到激光器前端面的距离、光栅折射率、光栅折射率周期、光栅栅长。根据对这些参数的比较和分析, 优化过程主要围绕两光栅之间的距离、光栅到激光器前端面的距离和光栅栅长等参数进行。

980 nm 半导体激光器光谱输出的稳定性受到光栅到激光器前端面的距离 D 和两光栅之间的距离 h 的作用。由双光纤光栅之间的距离所引起的光程差 δ 如果满足如下相位谐振条件:

$$\frac{4\pi n_d L_d}{\lambda} + \frac{4\pi n D}{\lambda} + \delta + \varphi_{r_1} + \varphi_{r_2} = 2m\pi, \quad (16)$$

其中 m 为自然数, n_d 为激光器增益介质折射率, L_d 是激光器腔长, 则在该波长处有谐振峰。可得激光器相邻谐振峰的间隔如下所示:

$$4\pi(n_d L_d + nD + nh) \frac{|\Delta\lambda|}{\lambda_B} +$$

$$\sum_{i=1}^2 (|\varphi_{r_i}(\lambda_B) - \varphi_{r_i}(\lambda_B + \Delta\lambda)|) = 2\pi, \quad (17)$$

从上式可以看出由于光纤光栅反射率相位因子的存在, 其腔的谐振谱线之间的间隔要比带单 FBG 波长锁定器的激光器谱线间距小。显然, 谐振谱线间隔与反射率大小无关, 而与激光器腔长, FBG 到激光器端的距离和双 FBG 的光栅间距以及光纤光栅反射系数的相位因子有关。根据上述分析, 可以得出双 FBG 波长锁定器对激光器腔内的纵模选择。当采用双 FBG 波长锁定器时, 由两个光纤光栅构成的外腔能降低反馈回腔内激光的相干性, 从而使得整个双 FBG 腔可以位于相干长度内仍能获得稳定的多模相干失效状态^[16-18]。光纤

光栅的反射带宽起着对腔内模式数(即输出谱线数目)的限制作用, 光纤光栅的反射带宽越窄, 激光法布里-珀罗腔所能容纳的模式数越少。为了获得高功率输出, 要求激光器在多模相干失效状态运行, 同时为了更好的波长锁定效果, 要求其在更窄的带宽里有更多的谱线产生谐振。

两个光栅栅长决定了双 FBG 的反射率, 双 FBG 的反射率决定了波长锁定器的主模输出功率和边模抑制比。 r_1 、 r_2 、 R 为激光器后、前端面的反射系数和光纤光栅的反射率。 r 为激光器前端面和光纤光栅形成一个等效反射面^[19], 其反射率在弱反馈光纤光栅外腔的半导体激光器中可以表示为: $r = (r_2 + \eta\sqrt{R}) / (1 + \eta r_2 \sqrt{R})$ 。光栅透功率:

$$I^{(v)} = \frac{\eta(1-r_2^2)(1-R)}{(1+\eta r_2 \sqrt{R})^2} I^{(v)}, \quad (18)$$

根据公式(18)可以知道主模输出功率满足 $\frac{P_0}{P_q} =$

$\frac{\eta(1-R)}{(1+\eta r_2 \sqrt{R})^2} \frac{S_0}{S_q}$ 。对于光从光栅端输出的外腔结构, 光纤光栅反射率高有利于增大主模光子数 S_0 , 减小其他模式光子数 S_q ($q \neq 0$), 但过高的光栅反射率会使主模输出光功率下降, 使边模抑制比下降。从图 3 可知 R 在 $0 \sim 0.2$ 之间边模抑制比随 R 增大而增大, R 在 $0.2 \sim 0.8$ 之间边模抑制比相对保持恒定, $R > 0.8$ 时边模抑制比反而会下降。 R 在 7% 时边模抑制比达 45 dB 以上。由式(18)计算后得到的图 3 可知 R 在 7%~10% 时, 理论上主模输出功率可大于 95%。通过权衡高功率和强锁模能力, 综合来看 R 在 7% 到 10% 之间比较合适。

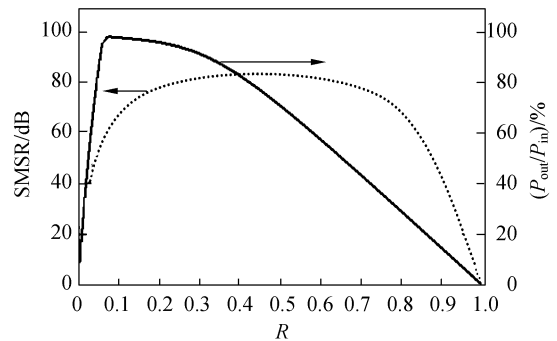


图 3 光栅反射率与输出功率比和边模抑制比的关系
Fig. 3 Output power ratio and SMSR with different grating reflectivities

上述计算结果表明,采用双 FBG 的波长锁定器,由两个光纤光栅构成的外腔能降低反馈回腔内激光的相干性,从而使得整个双 FBG 腔可以处于相干长度内仍能获得稳定的多模相干失效状态,避免了由光纤的双折射以及由激光器后端面反馈光引起的偏振旋转对激光器获得相干失效状态的影响。因此,采用双 FBG 的波长锁定器的半导体激光器可以在保持光谱稳定输出的前提下使光栅到激光器前端的距离最小,输出功率最大,边模抑制比最高。

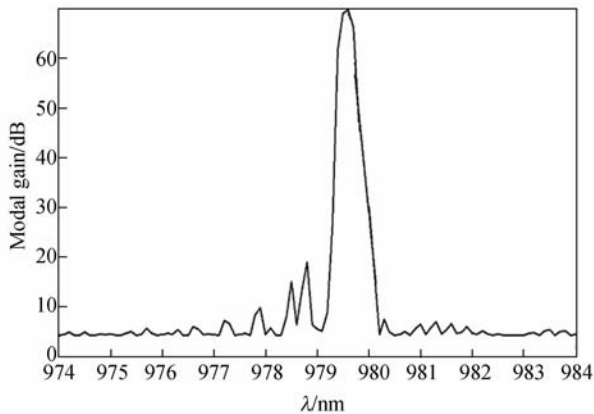


图 4 带优化后双 FBG 激光器的增益谱线

Fig. 4 Gain spectrum of laser with dual FBG after optimization

优化后的结果如图 4 所示,具体参数如下: $D = 50 \text{ cm}$, $\lambda_B = 979.5 \text{ nm}$, $L_1 = 0.22 \text{ mm}$, $L_2 = 0.25 \text{ mm}$, $h = 40 \text{ mm}$ 。其它参数 $k = 7 \times 10^{-7}$, $n_1 = n_2 = 1.4545$ 。理论上边模抑制比可达 45 dB 以上,半峰值宽度 $< 1 \text{ nm}$ 。

3 实验结果

对带双布拉格光纤光栅波长锁定器的非致冷 980 nm 半导体激光器(如图 1 所示)进行了光电性能测试,用以说明和验证设计的合理性和准确性。

图 5 是驱动电流为 400 mA,温度为 0~70 °C 时,980 nm 半导体激光器的输出光谱。中心波长漂移仅 0.2 nm,边模抑制比 $> 45 \text{ dB}$,半峰值全宽 $< 1 \text{ nm}$ 。图 6 为 0~70 °C 时,980 nm 半导体激光器中心波长随驱动电流变化的特性曲线。在不同温度与不同电流下,中心波长漂移仅为 0.5 nm,驱动电流对中心波长漂移影响相对较小,证实了

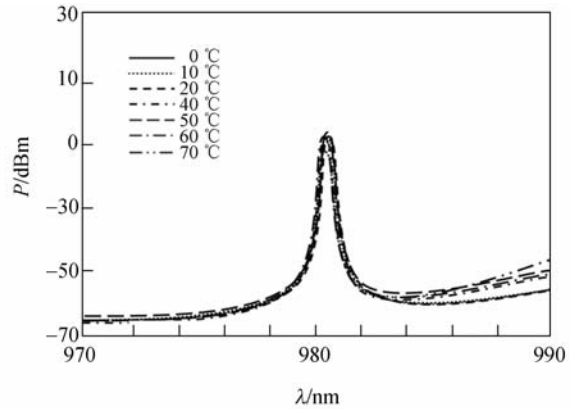


图 5 400 mA 驱动电流,0~70 °C 下 980 nm 半导体激光器的光谱

Fig. 5 Spectrum of 980 nm semiconductor laser at temperature of 0 °C ~70 °C and drive current of 400 mA

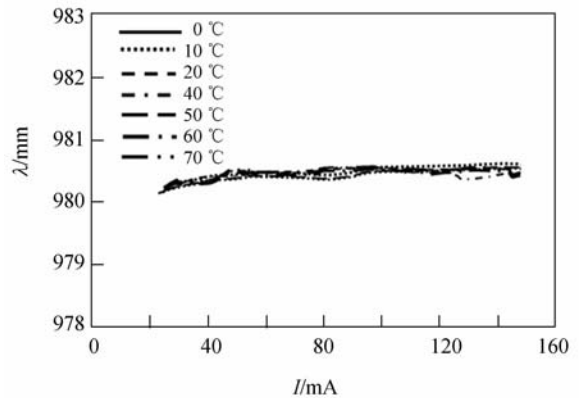


图 6 0~70 °C 时中心波长随驱动电流的变化

Fig. 6 Characteristics of center wavelength and drive current at 0~70 °C

所设计的双 FBG 波长锁定器,可以很好地稳定激光器的波长。图 7 是在 0~70 °C 时,980 nm 半导体激光器的功率-电流($P-I$)特性。图 8 是 0~70 °C 时,980 nm 半导体激光器驱动电流和出纤功率的外微分效率特性曲线,最大出纤功率达 250 mW, $P-I$ 的线性抖动非常小,在不同温度下的功率抖动也非常小。验证了所设计的双 FBG 波长锁定器可以克服温度对 $P-I$ 的线性度和出纤功率的影响,实现了稳定的出纤功率,保证了出纤功率最大。

本文还对 980 nm 半导体激光器在无 FBG,带单 FBG 和带双 FBG 的不同情形进行了光电性能测量和比较。非致冷 980 nm 半导体激光器在

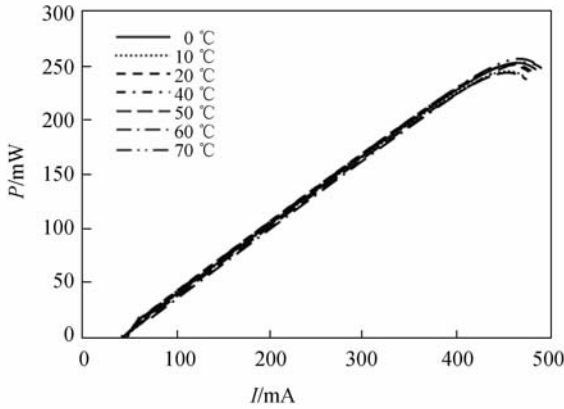


图 7 0~70 °C 时 980 nm 半导体激光器的驱动电流与功率特性

Fig. 7 Characteristics of output power and drive current of semiconductor laser at 0~70 °C

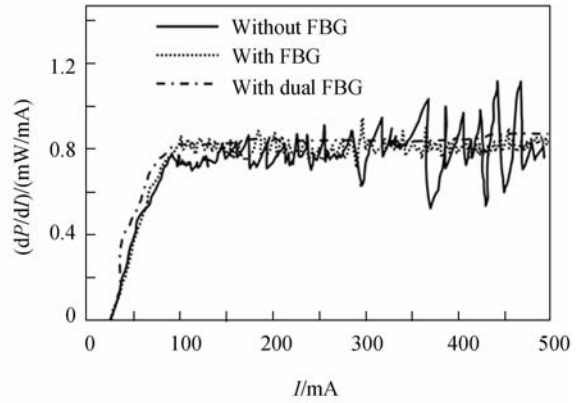


图 9 60 °C 时 980 nm 半导体激光器分别在无 FBG, 带单 FBG 和带双 FBG 时的驱动电流和出纤功率的外微分效率特性

Fig. 9 Characteristics of dP/dI of semiconductor laser at 60 °C without FBG, with FBG and with dual FBG, respectively

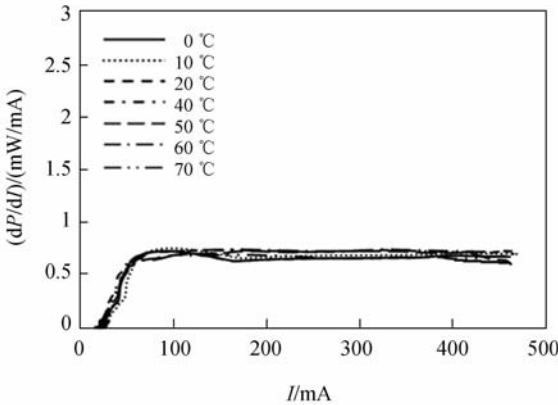


图 8 0~70 °C 时 980 nm 半导体激光器驱动电流和出纤功率的外微分效率特性

Fig. 8 Characteristics of dP/dI of semiconductor laser at 0~70 °C

400 mA 的驱动电流和 0~70 °C 温度下,不带 FBG 与带单 FBG 外腔时中心波长漂移分别为 17 nm 和 3 nm,半峰值全宽分别为 4 nm 和 2.5 nm,边模抑制比分别为 15 dB 和 30 dB。图 9 是 60 °C 时 980 nm 半导体激光器分别在无 FBG,带单 FBG 和带双 FBG 时的驱动电流和出纤功率的外微分效率特性。

上述实验证实了双 FBG 波长锁定器在

0~70 °C 使 980 nm 半导体激光器的输出光谱和工作特性非常稳定,表明双 FBG 波长锁定器起到了很好的选频和稳频作用,与设计预期一致。

4 结 论

通过采用优化后的两个不同参数的均匀 FBG 组成的双 FBG 波长锁定器,使 980 nm 半导体激光器的输出光谱和工作稳定性得到了提高。在 0~70 °C 时,在激光器 $P-I$ 线性工作区内测量了带波长锁定器的激光器的边模抑制比、中心波长的漂移、出纤功率,以及驱动电流和出纤功率的外微分效率。实验结果表明,双 FBG 波长锁定器在 0~70 °C 下具有良好的锁模效果,980 nm 半导体激光器的中心波长最多漂移了 0.5 nm,边模抑制比始终保持在 45 dB 以上,半峰值全宽度始终保持在 1 nm 以内。因此,双 FBG 不仅使 980 nm 半导体激光器处于相干失效状态且光谱输出稳定,同时缩短了光栅到激光器前端的距离,使非致冷半导体激光器满足大功率、长寿命、高可靠、小尺寸、标准化和低成本的要求。

参考文献:

[1] SCEATS R, BALKAN N, ADAMS M J, *et al.*. A GaInAsP/InP vertical cavity surface emitting laser for 1.5 μm operation [J]. *Tr. J. of Physics*,

1999,23(1):781-787.

[2] 于志辉,余重秀,王葵如,等. 直流切趾对光纤光栅特性的影响[J]. *光学精密工程*,2006,14(6):935-938.

- YU Z H, YU ZH X, WANG K L, *et al.*. Effect of direct current apodization on fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):935-938. (in Chinese)
- [3] 尹霄丽, 张琦, 余重秀, 等. 相移超结构光纤布拉格光栅 OCDMA 编/解码器及其相关特性[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9):1608-1613.
- YIN X L, ZHANG Q, YU ZH X, *et al.*. OCDMA encoder/decoder based on phase shifted superstructure fiber Bragg grating and its correlation property [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1608-1613. (in Chinese)
- [4] CHENG L L, PIN H. Analysis of designing multi-channel fiber Bragg gratings with different inverse design algorithms [J]. *Optical Review*, 2009, 16(5):526-528.
- [5] GILES C R, ERDOGAN T, MIZRAHI V. Simultaneous wavelength-stabilization of 980nm pump lasers [J]. *Photon. Tech. Letts.*, 1994, 6(8):907-909.
- [6] YURI O B. Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2006, 14(14):6394-6399.
- [7] LI Y, YI X J, ZHANG T X. Nanostructure and thermal optical properties of vanadium dioxide thin films [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(12):719-721.
- [8] NGUYEN H K, HU M H, LI Y, *et al.*. Wavelength and power stabilisation of uncooled 975 nm thick quantum well lasers over 110 °C temperature range [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(16):994-996.
- [9] 何春风, 路国强, 单肖楠, 等. 高功率 980 nm 垂直外腔面发射激光器 (VECSEL) 的理论研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3):247-252.
- HE CH F, LU G Q, SHAN X N, *et al.*. Theoretical analysis of 980 nm high power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser (VECSEL) [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3):247-252. (in Chinese)
- [10] 王为, 林玉池, 朱萍玉. 光纤光栅在低阻抗材料动态性能测试中的应用[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3):488-492.
- WANG W, LIN Y CH, ZHU P Y. Application of FBG sensor to measurement of dynamic performance of low impedance material [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):488-492. (in Chinese)
- [11] 胡双双, 李毅, 蒋群杰, 等. 基于双光纤布拉格光栅的抽运激光器波长锁定器[J]. *中国激光*, 2008, 35(1):44-48.
- HU SH SH, LI Y, JIANG Q J. Wavelength locker of pump laser based on dual fiber bragg grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(1):44-48. (in Chinese)
- [12] 梁猛, 方强, 王永昌. 光纤光栅 F-P 腔特性分析[J]. *光电子·激光*, 2001, 12(8):821-824.
- LIANG M, FANG Q, WANG Y CH. Theoretical analysis on characteristics of fiber bragg grating fabry-perot cavity [J]. *Journal of Optoelectronics laser*, 2001, 12(8):821-824. (in Chinese)
- [13] LAM D K, GARSIDE B K. Characterization of single-mode optical fiber filters [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(3):440-450.
- [14] VENTRUDO B F. Wavelength and intensity stabilization of 980 nm diode lasers coupled to fiber Bragg grating [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(25):2147-2149.
- [15] PLISKA T, ARLT S, BATTIG R, *et al.*. Wavelength stabilized 980 nm uncooled pump laser modules for erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43:271-289.
- [16] FUKUCHI S, SHU Y Y, OHTSUBO J. Relaxation oscillation enhancement and coherence collapse in semiconductor lasers with optical feedback [J]. *Optical Review*, 1999, 6(4):365-371.
- [17] 顾媛媛, 冯广智, 单肖楠, 等. 808 nm 和 980 nm 半导体激光迭阵波长耦合技术[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):8-13.
- GU Y Y, FENG G ZH, DAN X N, *et al.*. 808 nm and 980 nm high power laser diode stack with wavelength coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):8-13. (in Chinese)
- [18] MCGOWAN R, CRAWFORD D. Dual Bragg grating frequency stabilization of a 980 nm diode laser [C]. *Proc. OFC' 02naheim, USA*, OFC 2002:671-672.
- [19] 薛林, 赵华凤, 李翔辉, 等. 弱反馈光纤光栅外腔半导体激光器特性研究[J]. *中国激光*, 2001, 28(10):877-880.

XUE L, ZHAO H F, LI X H, *et al.*. Characteristic of the FBG External cavity semiconductor la-

ser with weak feedback [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001,28(10):877-880. (in Chinese)

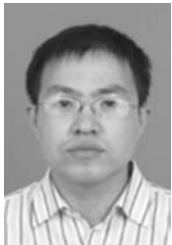
作者简介:



李毅(1964—),男,云南弥勒人,教授,博士生导师,1986年于云南大学获理学学士学位,1989年于信息产业部电子第五十五研究所获工学硕士学位,2000年于华中科技大学获物理学博士学位,主要从事光电子材料、器件、子系统等方面的研究。E-mail: liyi@usst.edu.cn



黄毅泽(1985—),男,湖南永兴人,硕士研究生,2008年于上海理工大学获理学学士学位,主要从事光电子器件的研究。E-mail: hzyusst@sina.com



王海方(1984—),男,河北保定人,硕士研究生,2007年于山西大学获理学学士学位,主要从事光学材料的研究。E-mail: jiangbaitian@163.com



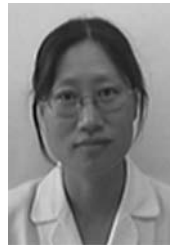
俞晓静(1984—),女,上海嘉定人,硕士研究生,2007年于上海理工大学获理学学士学位,主要从事光学材料和光学器件的研究。E-mail: yuxiaojing@hotmail.com



张虎(1987—),男,山东泰安人,硕士研究生,2008年于曲阜师范大学获理学学士学位,主要从事LED封装技术的研究。E-mail: zhanghu@hotmail.com



张伟(1984—),女,安徽淮南人,硕士研究生,2007年于安徽理工大学获理学学士学位,主要从事衍射微透镜阵列与紫外焦平面阵列单片集成的研究。E-mail: woshishu5758@163.com



朱慧群(1965—),女,广东江门人,博士研究生,副教授,1987年于广州大学获理学学士学位,2008年于中山大学获工学硕士学位,主要从事光电纳米材料和半导体器件的研究。E-mail: huiqunzhu@163.com