

文章编号: 0258-7025(2008)01-0044-05

基于双光纤布拉格光栅的抽运激光器波长锁定器

胡双双 李毅 蒋群杰 武斌

(上海理工大学光学与电子信息工程学院, 上海 200093)

摘要 运用耦合模理论推导了双光纤布拉格光栅(FBG)的透射率和反射率的解析表达式,进一步推导出带双光纤布拉格光栅激光器的增益方程。利用相关表达式讨论双光纤布拉格光栅的反射特性与透射特性,并探究对激光器增益曲线的影响。双光纤布拉格光栅由结构和特性相同的单光纤布拉格光栅构成,通过优化两光纤布拉格光栅之间的距离得到最佳的锁模特性。在工作温度为0℃,20℃,70℃时,分别测量了带双光纤布拉格光栅和单光纤布拉格光栅波长锁定器的非致冷抽运激光器的输出光谱。其结果表明带双光纤布拉格光栅的非致冷抽运激光器输出光谱的稳定性得到了显著改善。在0~70℃温度范围内能稳定工作,波长漂移为0.2 nm,边模抑制比达45 dB,半峰值宽度小于1.57 nm。

关键词 激光器;980 nm 抽运激光器;双光纤布拉格光栅;波长锁定器;边模抑制比

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Wavelength Locker of Pump Laser Based on Dual Fiber Bragg Grating

Hu Shuangshuang Li Yi Jiang Qunjie Wu Bin

(College of Optical and Electronic Information Engineering, University of Shanghai
for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract The analytical expression of transmissivity and reflectivity of dual fiber Bragg grating (FBG) has been given based on the mode coupled theory, and the gain equations of the pump laser with dual FBG are also obtained. The characteristics of reflection and transmission for dual FBG were analyzed by relevant expression, and the effects of laser gain curve were studied. The dual FBG is composed of a pair of FBGs with the same structure and properties. The spacing of the two FBGs has been optimized to get the best mode-locking characteristics. The output spectral characteristics of the uncooled pump laser with dual FBG or single FBG wavelength locker are practically measured when the operating temperature are 0℃, 20℃, 70℃, respectively. The results show that the output spectral characteristics of the uncooled pump laser with dual FBG have been greatly improved. The uncooled pump laser can work steadily in the temperature range from 0 to 70℃. The wavelength shift is 0.2 nm. The side mode suppression ratio is more than 45 dB, and the spectral band width is less than 1.57 nm.

Key words lasers; 980 nm pump laser; dual fiber Bragg grating; wavelength locker; side mode suppression ratio

1 引言

高功率单模 980 nm 抽运激光器是光通信系统中光纤放大器的关键器件。随着密集波分复用通道数的增加和光接入网的发展,要求放大器成本越来越低,性能越来越高,如响应时间、功耗、增益带宽、平坦性、噪声系数、输出功率等。为了满足这些要求

必须研究和开发性能优越的材料^[1]、激光器芯片及封装技术。非致冷 Mini-DIL 980 nm 抽运激光器的输出功率可达 200 mW,且具有动态范围宽、可靠性高、热电性能稳定等特点,而且省去了热电致冷器,体积比常规的蝶形封装减小了 20%~30%。满足光纤放大器对抽运激光器小体积、高功率、低成本和

收稿日期:2007-05-17; 收到修改稿日期:2007-08-29

基金项目:国家 863 计划(2006AA03Z348),教育部科学技术研究重点项目(207033),上海市科学技术委员会科技攻关计划项目(06DZ11415)和上海市教委科学技术研究重点项目(06ZZ32)资助课题。

作者简介:胡双双(1983—),女,浙江人,硕士研究生,主要从事光通信器件的研究。E-mail:rushuang15@163.com

导师简介:李毅(1964—),男,云南人,教授,主要从事光电子材料、器件、模块、子系统等的研究。

E-mail:optolyclp@263.net

高可靠性的要求,市场前景十分广阔。但是,980 nm抽运激光器在非致冷条件下的稳定性较差^[2],其波长漂移超过20 nm,边模抑制比也很低,即使采用单光纤布拉格光栅(FBG)波长锁定器^[3,4]也很难满足高性能的要求。因此根据非致冷抽运激光器芯片的光电特性和频谱特性,设计和加工双光纤布拉格光栅波长锁定器,在尽可能不牺牲出纤功率的情况下提高非致冷980 nm抽运激光器的边模抑制比和波长稳定性,这对提高抽运激光器在非致冷条件下的稳定性有着重要的意义。

本文对双光纤布拉格光栅波长锁定器进行了理论分析,给出了双光纤布拉格光栅的光强反射率与透射率的表达式,并对两光纤布拉格光栅之间的距离进行优化;测量了双光纤布拉格光栅波长锁定器对非致冷980 nm抽运激光器输出光谱的影响,并与单光纤布拉格光栅波长锁定器进行了比较;并测量了双光纤布拉格光栅对抽运激光器出纤功率的影响。

2 理论分析

双光纤布拉格光栅波长锁定器主要是由两个结构和特性相同的均匀光纤布拉格光栅组成。光纤布拉格光栅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光纤布拉格光栅组成了一个类似于法布里-珀罗(F-P)腔的谐振腔^[5]。光波只能在光纤布拉格光栅的反射带宽内产生谐振,在反射带宽外没有谐振峰。双光纤布拉格光栅组成的谐振腔锁定非致冷抽运激光器的基本结构如图1所示。

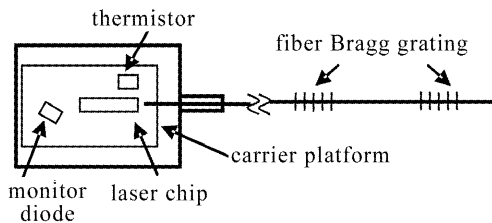


图1 双光纤布拉格光栅锁定非致冷抽运激光器的基本结构

Fig.1 Diagram of dual fiber Bragg grating locked uncooled laser

光纤布拉格光栅的反射特性可以用耦合模理论^[6]描述。以弱反射光栅为例,其反射率可表示为

$$R_g = \frac{k^2 \sinh^2(SL_{BG})}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL_{BG}) + S^2 \cosh^2(SL_{BG})}, \quad (k^2 > \Delta\beta^2) \quad (1)$$

$$R_g = \frac{k^2 \sinh^2(QL_{BG})}{\Delta\beta^2 - k^2 \cos^2(QL_{BG})}, \quad (k^2 < \Delta\beta^2) \quad (2)$$

式中 k 为耦合系数; $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = 2n\pi/\lambda - 2n\pi/\lambda_B$, 为失谐波矢量, β 和 β_0 是不同波长光波的传播常数, λ 为光波波长; $S = (k^2 - \Delta\beta^2)^{1/2}$, $Q = (\Delta\beta^2 - k^2)^{1/2}$; L_{BG} 为光栅长度; $\lambda_B = 2n\Lambda$, 为中心波长; n 为有效折射率, Λ 为折射率变化的周期(栅距)。

对双光纤布拉格光栅而言,光波在两光栅之间的光纤上只发生相位的变化^[7,8]。由(1)式可以得到光栅反射系数的相位角 ϕ_r , 即光波经光纤布拉格光栅反射后的相位变化为

$$\phi_r = \pi + \arctan\left[\frac{S \cosh^2(SL_{BG})}{\Delta\beta \sinh^2(SL_{BG})}\right], \quad \lambda \leq \lambda_B \quad (3)$$

$$\phi_r = \arctan\left[\frac{S \cosh^2(SL_{BG})}{\Delta\beta \sinh^2(SL_{BG})}\right]. \quad \lambda > \lambda_B \quad (4)$$

该实验中的双光纤布拉格光栅由两个结构和特性相同的光纤布拉格光栅组成,则两个光纤布拉格光栅反射率相同,即 $R_g = R_{g1} = R_{g2}$ 。结合文献^[7,8]可推导出双光纤布拉格光栅谐振腔的光强透射率和反射率为

$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + F \sin^2(\beta L_{FP} - \phi_r)}, \quad (5)$$

$$R(\lambda) = \frac{F \sin^2(\beta L_{FP} - \phi_r)}{1 + F \sin^2(\beta L_{FP} - \phi_r)}, \quad (6)$$

式中 $F = 4R_g/(1 - R_g)^2$, L_{FP} 为两光栅之间的距离。

非致冷980 nm抽运激光器的后端面腔镜的反射率为95%,前端面腔镜反射率根据激光器芯片的长度和外延结构来设计。从激光器的高效和稳定性方面来考虑,其数值范围应在0.005~0.05之间。在非致冷激光器模块中,监控光电探测器靠近激光器后端面,用来监控激光器的光功率。热敏电阻用来监控激光器的温度。双光纤布拉格光栅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。

当激光器工作在多模相干失效状态^[9,10]时,由双光纤布拉格光栅谐振腔影响而得到的前端有效反射率为

$$R_{eff}(\lambda) = R_f + \eta^2 \frac{(1 - R_f)^2 R(\lambda)}{1 - R_f R(\lambda)}, \quad (7)$$

式中 R_f 为前端面反射率, $R(\lambda)$ 为双光纤布拉格光栅反射率, η 为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^[11]

$$g_{mod}(\lambda) = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln\left[\frac{1}{R_b R_{eff}(\lambda)}\right], \quad (8)$$

式中 α_i 为激光器腔内损耗, L 为激光器腔长, R_b 为后端面反射率。由(8)式可以看出,激光器的增益峰被

锁定在光纤布拉格光栅的反射带宽内。但是,激光器的增益曲线会随着电流和温度的变化而漂移,如果双光纤布拉格光栅的中心波长和激光器的最大增益波长不匹配,而且双光纤布拉格光栅的反射率不能满足(8)式,双光纤布拉格光栅的锁模能力就会降低。所以要考虑激光器在电流和温度等条件下的工作状态来设计双光纤布拉格光栅的波长锁定器。本文主要从两光栅之间的距离 L_{FP} 来分析锁模特性。

由(5),(6)式可知双光纤布拉格光栅为其反射带宽以内的光波提供反馈,形成法布里-珀罗腔的多谱线输出,谐振谱线数(即输出谱线数目)由双光纤布拉格光栅的反射带宽和两光栅之间的距离决定: L_{FP} 越长,反射带宽越宽,谐振谱线数越多;反之越少。用 Matlab 模拟结果如图 2 所示,图 2(a),(b),(c)分别为不同 L_{FP} 时双光纤布拉格光栅的透射率情况。其他参数为 $\lambda_B = 977.56$ nm,有效折射率 $n = 1.4545$, $k = 5 \times 10^{-7}$, $L_{BG} = 0.25$ mm。由图 2 可

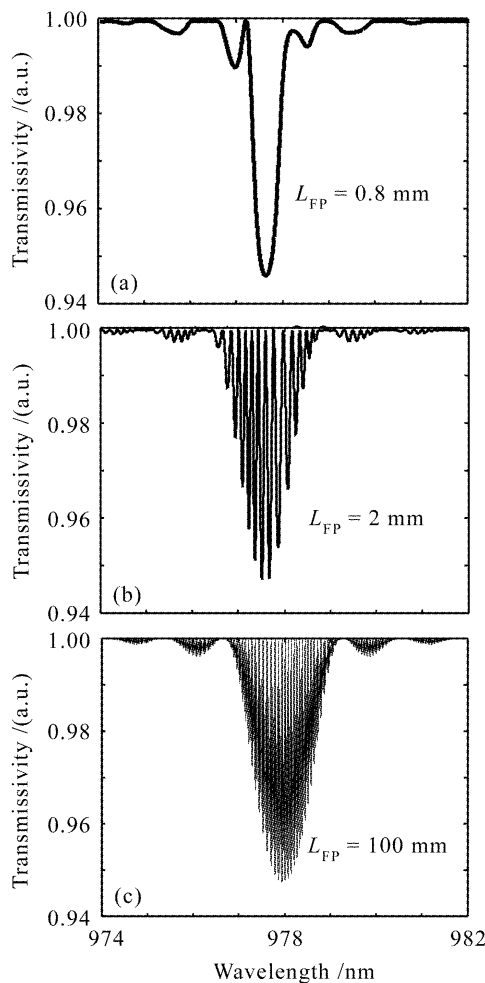


图 2 两光栅间距不同的双光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔透射率

Fig. 2 Transmissivity spectra of Fabry-Perot cavity with different spacing of the two FBGs

知, L_{FP} 越长,线宽越窄,谐振谱线数越多。线宽越窄,激光器经双光纤布拉格光栅选模振荡后,输出线宽越窄;谐振谱线数越多,激光器由于工作电流的变化而产生的输出功率线性抖动越小。所以,为了得到较窄的线宽与稳定的功率,要求两光栅距离 L_{FP} 越长。但是,随着 L_{FP} 的增大,边模抑制比会变小,激光器的稳定性会变差^[12]。因此,在选择两光栅距离 L_{FP} 时,要二者兼顾。

选择 L_{FP} 时,还要考虑与激光器前端面到第一个光纤布拉格光栅的距离 D 的匹配问题。实验中在 40~140 cm 范围内,每 20 cm 选取一个 D 值,对应每个 D 值,在 10~150 mm 范围内对 L_{FP} 取值测试。结果发现,当 D 取值大于 60 cm 时, L_{FP} 在 50~120 mm 之间,激光器都能工作在多模相干失效状态,输出光谱稳定。综合上述因素,最终选取 $D = 110$ cm, $L_{FP} = 62$ mm。

根据该设计,且设激光器两端面反射率分别为 $R_f = 1\%$, $R_b = 95\%$,耦合效率 $\eta = 75\%$,腔内损耗 $\alpha_i = 2$ cm⁻¹,腔长 $L = 0.5$ mm。由(7),(8)式可得带有该双光纤布拉格光栅激光器的增益曲线如图 3 实线所示。由图 3 可知激光器经过双光纤布拉格光栅选模后,其谐振谱线产生振荡,双光纤布拉格光栅的反射带宽起着对输出谱线数目的限制作用。图 3 中虚线为带单光纤布拉格光栅激光器的增益曲线,该单光纤布拉格光栅峰值反射率与双光纤布拉格光栅总的峰值反射率相同。由图 3 可知,带双光纤布拉格光栅波长锁定器的激光器增益曲线的半峰全宽 $\Delta\lambda_H$ 明显小于带单光纤布拉格光栅的半峰全宽,而且其边模抑制比良好。

双光纤布拉格光栅的反射率对最终输出的功率

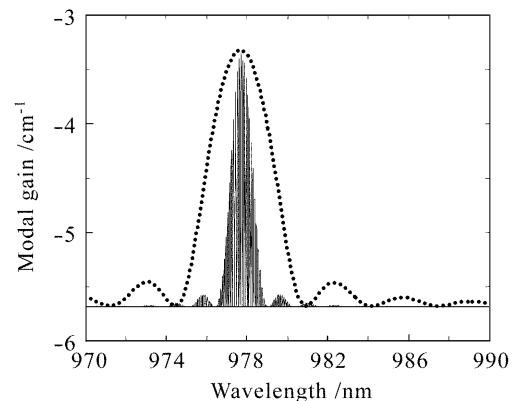


图 3 带单光纤布拉格光栅和双光纤布拉格光栅的非致冷 980 nm 抽运激光器的增益曲线

Fig. 3 Gain of uncooled 980 nm pump laser with single FBG and dual FBG

大小有直接影响。980 nm抽运激光器要求高功率输出,功率越大,抽运效果越好,因此反射率越小越好。但是反射率越小,边模抑制比越低。所以,反射率大小的选择需在高功率和强锁模能力二者之间权衡。经过反复实验,在保证 0~70 °C 锁模的前提下,反射率控制在 3%到 8%之间较为适宜。该结果与参考文献[13]中的结果一致。

3 实验结果

实验中采用的非致冷 980 nm 抽运激光器的管壳大小为 12.7 mm×7.4 mm×5.2 mm,工作温度为 0~70 °C,中心波长为 980 nm,谱宽为 3 nm,阈值电流为 30 mA,出纤功率为 120 mW,功耗小于 1 W。非致冷 980 nm 抽运激光器芯片采用法布里-珀罗腔,激光器的输出峰值波长会随着注入电流和温度的变化而变化,温度漂移系数约为 0.3 nm/°C。

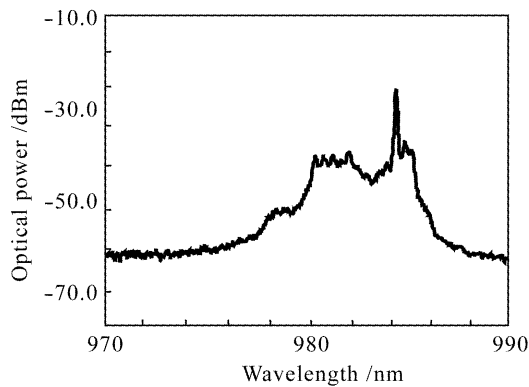


图 4 不带光纤布拉格光栅的非致冷 980 nm 抽运激光器在 20 °C 时的输出光谱

Fig. 4 Spectrum of uncooled 980nm pump laser without FBG, when the module operated at 20 °C

图 4 是不带光纤布拉格光栅的非致冷 980 nm 抽运激光器在室温 20 °C 下,工作电流为 200 mA 时的输出光谱。可以看出激光器的光谱很宽,中心波长在 985 nm 附近,边模抑制比低,模式很多且不稳定,容易发生跳模现象,这也导致了激光器输出功率的不稳定。

为了更好地测量和评估带双光纤布拉格光栅的非致冷 980 nm 抽运激光器的性能,分别将带单光纤布拉格光栅和双光纤布拉格光栅波长锁定器的非致冷 980 nm 抽运激光器和驱动模块放置在恒温恒湿箱进行不同温度下的性能测试,温度范围为 0~70 °C,以说明和验证双光纤布拉格光栅结构设计的可行性和合理性。实验中测试的双光纤布拉格光栅波长锁定器具体参数为: $D = 110$ cm, L_{FB} =

62 mm, $\lambda_{\text{B}} = 977.56$ nm, $L_{\text{BG}} = 0.25$ mm;单光纤布拉格光栅具体参数为: $D = 150$ cm, $\lambda_{\text{B}} = 977.56$ nm, $L_{\text{BG}} = 1.2$ mm。图 5 分别给出了带单光纤布拉格光栅(a)和双光纤布拉格光栅(b)的非致冷 980 nm 抽运激光器在工作温度为 0 °C, 20 °C, 70 °C 下,工作电流为 200 mA 时相应的输出光谱。其中单光纤布拉格光栅峰值反射率与双光纤布拉格光栅的峰值反射率均为 5.24%。

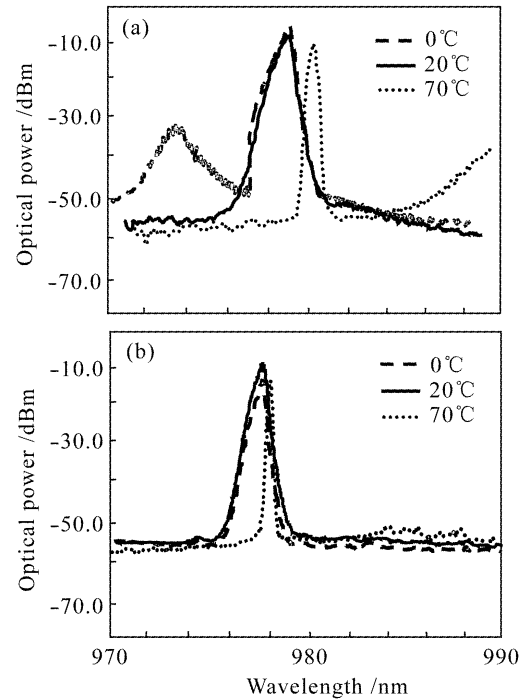


图 5 带单光纤布拉格光栅(a)和双光纤布拉格光栅(b)的非致冷 980 nm 抽运激光器在不同温度时的输出光谱
Fig.5 Spectrum of uncooled 980 nm pump laser with FBG (a) and dual FBG (b), when the module operated at different temperatures

从图 5 可以看出,带波长锁定器的非致冷 980 nm 抽运激光器的输出特性得到改善。但是带单光纤布拉格光栅的抽运激光器输出光谱的带宽为 2.43 nm,边模抑制仅为 25 dB,而且因温度变化而引起的漂移现象严重。带双光纤布拉格光栅的输出光谱在 0~70 °C 之间输出非常稳定,中心波长漂移仅为 0.2 nm,带宽保持在 1.57 nm 之内,边模抑制比保持在 45 dB 以上。其锁模特性明显优于单光纤布拉格光栅波长锁定器,该实验结果与理论模拟结果相吻合。

在工作电流为 200 mA 时,对不同温度条件下的带双光纤布拉格光栅和单光纤布拉格光栅波长锁定器的激光器输出功率进行比较。工作温度为 0 °C, 20 °C, 70 °C 时,带单光纤布拉格光栅激光器的出纤功率分别为 106.32 mW, 104.67 mW,

93.02 mW,带双光纤布拉格光栅激光器的出纤功率分别为101.13 mW,103.89 mW,86.45 mW。与单光纤布拉格光栅相比,双光纤布拉格光栅波长锁定器导致的功率损耗小于几个毫瓦。从双光纤布拉格光栅波长锁定器良好的锁模特性考虑,对输出功率达120 mW的非致冷抽运激光器而言,该损耗是在允许范围内的。

图6给出了带双光纤布拉格光栅的非致冷980 nm抽运激光器在工作温度分别为0℃,20℃,70℃时相应的功率与电流外微分效率曲线。从测试结果可以看出,在0~70℃的温度范围内,出纤功率保持稳定;在注入电流不断增大的情况下,激光器功率的线性抖动一直保持很小。

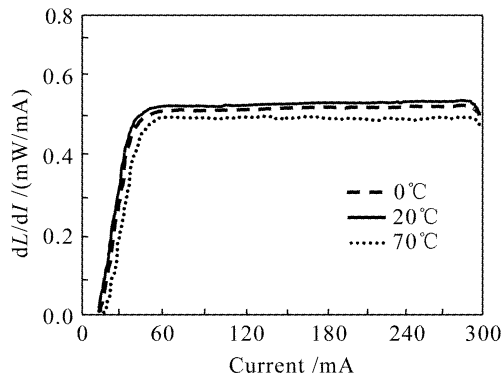


图6 带双光纤布拉格光栅的非致冷980 nm抽运激光器
在不同温度时的dL/dI特性参数曲线

Fig.6 dL/dI characteristics curves of uncooled 980 nm
pump laser with dual FBG, when the module
operated at different temperatures

4 结 论

通过采用结构和特性相同的两个均匀光纤布拉格光栅组成的双光纤布拉格光栅波长锁定器,优化两光栅之间的距离,得到最佳的锁模特性与稳定的输出。观察带双光纤布拉格光栅的非致冷980 nm抽运激光器在不同温度下的输出光谱,并同峰值反射率与双光纤布拉格光栅相同的单光纤布拉格光栅波长锁定器进行比较。结果表明,采用双光纤布拉格光栅波长锁定器后出纤光波的边模抑制比达45 dB,半峰全宽小于1.57 nm。而且明显地改善了由于温度变化而引起的漂移现象,在0~70℃之间,波长漂移为0.2 nm,而且出纤功率非常稳定。针对不同的980 nm抽运激光器,因其腔内增益以及其随温度和电流的变化并不一定相似,所以具体参

数需要适当调整,以求对激光器实现最佳匹配,达到良好的锁模效果。

参 考 文 献

- 1 Yi Li, Xinjian Yi, Tianxu Zhang. Nanostructure and thermal-optical properties of vanadium dioxide thin films [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(12):719~721
- 2 Wei Wensheng. Temperature characteristics of 980 nm semiconductor laser diode [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(7):558~560
韦文生. 980nm 半导体激光二极管的温度特性[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(7):558~560
- 3 C. R. Giles, T. Erdogan, V. Mizrahi. Simultaneous wavelength-stabilization of 980 nm pump lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8):907~909
- 4 B. F. Ventrudo, G. A. Rogers, G. S. Lick *et al.*. Wavelength and intensity stabilization of 980 nm diode lasers coupled to fibre Bragg grating [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(25):2147~2149
- 5 Wu Bo, Liu Yongzhi, Zhang Qianshu *et al.*. High efficient narrow linewidth fiber laser based on fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):350~353
伍波,刘永智,张谦述等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效窄线宽光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):350~353
- 6 Hu Guijun, Pan Yuzhai, Guo Yubin *et al.*. High-power fiber laser based on fiber grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):405~407
胡贵军,潘玉寨,郭玉彬等. 基于光纤光栅的高功率光纤激光器[J]. *光子学报*, 2004, **33**(4):405~407
- 7 Guan Baiou, Yu Youlong, Ge Chunfen *et al.*. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1):34~38
关柏鸣,余有龙,葛春风等. 光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1):34~38
- 8 Liang Meng, Fang Qiang, Wang Yongchang. Theoretical analysis on characteristics of fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(8):821~824
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
- 9 Martin Achtenhagen, Stefan Mohrdiek, Tomas Pliska *et al.*. L-I characteristics of fiber Bragg grating stabilized 980-nm pump laser modules [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5):415~417
- 10 Stefan Mohrdiek, Martin Achtenhagen, Christoph Harder. Detuning characteristics of fiber Bragg grating stabilized 980 nm pump lasers [C]. *Conference on Optical Fiber Communication*, 2000. 168~170
- 11 Tomas Pliska, Sebastian Arlt, Rainer Battig *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
- 12 Ma Yan, He Jun, Xie Fuzeng. 980 nm non-anti-reflection-coated fiber grating laser for single-longitudinal mode operation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6):34~38
马艳,何军,谢福增. 980 nm 单模运转未镀膜增透膜光纤光栅激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6):34~38
- 13 Devin Crawford, Roger McGowan. Observation of spectral power exchange in fiber bragg grating stabilized 980 nm pump lasers [C]. *Proceedings of 27th European Conference on Optical Communication, ECOC*, 2001. 170~171