

doi:10.3788/gzxb20154401.0114003

## 980 nm 半导体激光器输出光谱特性的改善

陈少娟<sup>1</sup>, 李毅<sup>1,2</sup>, 袁文瑞<sup>1</sup>, 陈建坤<sup>1</sup>, 郑鸿柱<sup>1</sup>, 郝如龙<sup>1</sup>, 孙瑶<sup>1</sup>, 唐佳茵<sup>1</sup>,  
刘飞<sup>1</sup>, 王晓华<sup>1,3</sup>, 方宝英<sup>1</sup>, 佟国香<sup>1</sup>, 肖寒<sup>1</sup>

(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 上海电力学院, 上海 200090)

**摘 要:** 为了改善 980 nm 半导体激光器的输出光谱特性, 采用传输矩阵分析法推导了双布喇格光纤光栅谐振腔的传输表达式, 对布喇格光纤光栅长度和谐振腔腔长对输出光谱的影响进行模拟仿真, 结果表明布喇格光纤光栅长度对输出光谱的影响大于谐振腔腔长对输出光谱的影响, 加长布喇格光纤光栅长度能压缩输出光谱线宽. 在 980 nm 半导体激光器尾纤上写入不同布喇格光纤光栅长度的双布喇格光纤光栅谐振腔, 验证了引入双布喇格光纤光栅谐振腔在压缩 980 nm 半导体激光器输出光谱线宽的同时改善了其输出光谱的稳定性. 当环境温度在 0~75℃ 范围内变化时, 980 nm 半导体激光器输出中心波长仅变化 0.06 nm.

**关键词:** 光通信; 激光器; 光纤光栅; 谐振腔; 光谱; 稳定性; 半峰值全宽度

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0114003-7

## Improvement of the Spectral Characteristics of 980 nm Semiconductor Laser

CHEN Shao-juan<sup>1</sup>, LI Yi<sup>1,2</sup>, YUAN Wen-rui<sup>1</sup>, CHEN Jian-kun<sup>1</sup>, ZHENG Hong-zhu<sup>1</sup>,  
HAO Ru-long<sup>1</sup>, SUN Yao<sup>1</sup>, TANG Jia-yin<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, WANG Xiao-hua<sup>1,3</sup>, FANG Bao-ying<sup>1</sup>,  
TONG Guo-xiang<sup>1</sup>, XIAO Han<sup>1</sup>

(1 School of Optical-Electrical 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 Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In order to improve the output spectral characteristics of 980 nm semiconductor laser, the expression of transmittivity of dual fiber Bragg grating was deduced by the transfer matrix theory. The influence of fiber Bragg grating length and cavity length on output spectrum was conducted by simulation, the result shows that the fiber Bragg grating length's influence on output spectrum is greater than fiber Bragg grating cavity length's, and the width of output spectrum can be reduced by lengthening the fiber Bragg grating length. The dual fiber Bragg grating was fabricated on the tail fiber of 980 nm semiconductor laser to reduce the output spectral width of laser and to improve the stability of the laser output spectrum. The experimental results show that the center wavelength of 980 nm semiconductor laser changes only 0.06 nm when the environment temperature changes within the range of 0℃ to 75℃.

**Key words:** Optical communication; Laser; Fiber Bragg grating; Resonant cavity; Spectrum; Stability; Full width at half maximum

**基金项目:** 上海市研究生创新基金项目(No. JWCXSL1402)、国家高技术研究发展计划(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)和上海市教育委员会科技创新重点项目(No. 10ZZ94)资助

**第一作者:** 陈少娟(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信等. Email: sjch2202@163.com

**导师(通讯作者):** 李毅(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电子材料、器件、模块、子系统等. Email: liyi@usst.edu.cn

**收稿日期:** 2014-05-26; **录用日期:** 2014-09-04

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

## 0 引言

随着光通信的发展,密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)光传输网在未来的网络中将提供一个经济、大容量、高可靠的传输基础设施,具有极其诱人的发展前景. 980 nm 半导体激光器由于具有小体积、高功率、低成本和高可靠性等优势而成为掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)常使用的抽运激光器<sup>[1]</sup>. DWDM 系统信道的逐渐增加对抽运激光器的线宽、稳定性等性能要求也越来越高. DWDM 系统中的 EDFA 增益曲线较窄<sup>[2]</sup>,若抽运激光器的中心波长远离了 EDFA 的最大吸收波长区,则会大大降低抽运效率<sup>[3]</sup>. 并且,980 nm 半导体激光器由于大功率的因素使其中心波长也容易随结构、材料、环境温度和驱动电流发生漂移<sup>[4-5]</sup>. 一般情况下,半导体激光器中心波长随温度升高向长波漂移,半导体激光器因长期工作之后,器件温度升高将导致中心波长远离了 EDFA 最大吸收波长区,降低了抽运效率. 因此,压缩 980 nm 半导体激光器输出线宽以及提高激光器输出稳定性显得非常重要.

对半导体激光器输出光谱稳定性的研究已取得了一定的成果<sup>[6-8]</sup>. 提高半导体激光器输出光谱稳定性方法有:光纤参量放大器法<sup>[9]</sup>、单光子吸收法<sup>[10]</sup>、放大自发辐射法<sup>[11]</sup>、自放大分布反馈法以及传统的加入自动温度控制(Automatic Temperature Control, ATC)系统法. 由激光器理论可知,半导体激光器的谱线线宽与半导体激光器有源区的长度成反比. 腔长是影响激光器线宽的重要因素之一<sup>[12]</sup>,在其它条件不变的前提下,可以通过加长激光器有源区长度实现激光器线宽的缩窄. 但半导体激光器由于其小型化的要求在现实运用中不可能无限制地增加有源区的长度. 因此通过设置外腔等效于增加谐振腔腔长,从而压缩激光器输出光谱线宽<sup>[13]</sup>. 尽管 JDSU 等公司研究和开发了光纤波长锁定器,但都是针对特定激光器芯片的固有特性,并非适用于所有激光器芯片. 因此必须根据半导体激光器的输出特性,设计和开发相应的光纤光栅波长锁定器才能保证激光器有较好的稳定性和光谱特性.

本文在 980 nm 半导体激光器尾纤上写入两个光纤光栅组成双光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)谐振外腔,一方面双 FBG 外腔的引入增加了谐振腔腔长,压窄了激光器输出光谱线宽;另一方面,由于布喇格光纤光栅的中心波长随温度变化很小,温漂系数约为 0.005~0.009 nm/°C,远小于激光器的温漂系数 0.3 nm/°C,所以引入光纤光栅能很好地稳定激光器光谱输出,综合改善 980 nm 半导体激光器的输出光谱特性.

## 1 理论分析

在光纤上写入光栅可通过紫外光束干涉法或者相位掩膜法实现. 光纤光栅的传输示意图如图 1. 其中,  $a(0)$  和  $b(0)$  分别为后向传播模式光振幅和前向传播模式光振幅,光纤光栅长度为  $L$ .

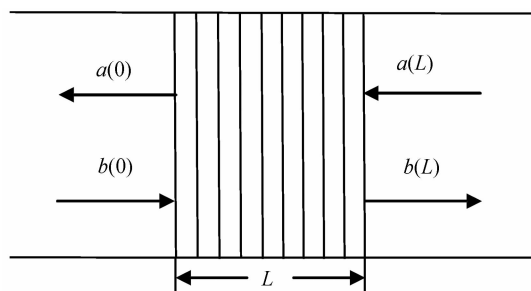


图 1 光纤光栅传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG transmission

运用 Turan Erdogan 的耦合模理论模型<sup>[14-15]</sup>分析光纤光栅传输特性,由图 1 所示光纤光栅示意图得传输矩阵式为

$$\begin{bmatrix} b(0) \\ a(0) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} b(L) \\ a(L) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{T}$  为二维传输矩阵,其所包含的元素为

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{11} = \cosh(sL) - i(\Delta\beta/s)\sinh(sL) \\ \mathbf{T}_{12} = -i(k/s)\sinh(sL) \\ \mathbf{T}_{21} = i(k/s)\sinh(sL) \\ \mathbf{T}_{22} = \cosh(sL) + i(\Delta\beta/s)\sinh(sL) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $L$  为光栅长度;  $\lambda_B$  为光栅布喇格波长;  $\Delta n$  为折射率深度;  $k$  为耦合系数且  $k = \pi\Delta n/\lambda$ ;  $\beta$  为传播常量;  $n_{\text{eff}}$  为光栅有效折射率;失谐波矢量为  $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_B)$ ;  $s = \sqrt{k^2 - (\Delta\beta)^2}$ . 式(1)满足

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{11} = \mathbf{T}_{22}^* \\ \mathbf{T}_{12} = \mathbf{T}_{21}^* \\ |\mathbf{T}| = \mathbf{T}_{11}\mathbf{T}_{22} - \mathbf{T}_{12}\mathbf{T}_{21} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

$\mathbf{T}$  矩阵包含了光栅所有参量,代表了光纤光栅的作用,因而可以由  $\mathbf{T}$  矩阵来分析光纤光栅的性能.

当两个光纤光栅有一定距离而组成光纤光栅谐振腔,如图 2. 其中,  $b(0)$ 、 $b(L_1)$ 、 $b(L_1+h+L_2)$  分别为经过 FBG<sub>1</sub> 前、经过 FBG<sub>1</sub> 后和经过 FBG<sub>2</sub> 后的前向传播

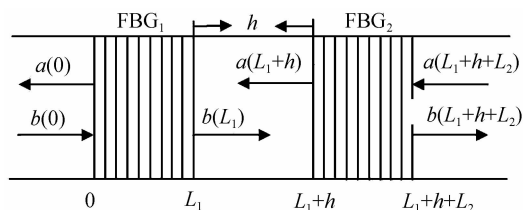


图 2 光纤光栅谐振腔结构

Fig. 2 Schematic diagram of FBG cavity

模式光振幅; $a(L_1+h+L_2)$ 、 $a(L_1+h)$ 、 $a(0)$ 分别为经过FBG<sub>2</sub>前、经过FBG<sub>2</sub>后和经过FBG<sub>1</sub>后的后向传播模式光振幅。

两光栅之间的距离即光纤光栅谐振腔长,此处并未写入光栅,其对入射光输出的影响为相位的延迟,则传输矩阵可以表示为

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \exp(-i\beta h) & 0 \\ 0 & \exp(i\beta h) \end{bmatrix} \quad (4)$$

为了简化整理,取两个FBG各参量均相同即传输矩阵相同,则双FBG谐振腔总传输矩阵为

$$\begin{aligned} [\mathbf{T}'] &= [\mathbf{T}][\mathbf{N}][\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{T}_{12} \\ \mathbf{T}_{21} & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{bmatrix} \exp(-i\beta h) & 0 \\ 0 & \exp(i\beta h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{T}_{12} \\ \mathbf{T}_{21} & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{T}'_{11} & \mathbf{T}'_{12} \\ \mathbf{T}'_{21} & \mathbf{T}'_{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

双FBG谐振腔前后两端光场关系为

$$\begin{bmatrix} b(0) \\ a(0) \end{bmatrix} = [\mathbf{T}'] \begin{bmatrix} b(L_1+h+L_2) \\ a(L_1+h+L_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}'_{11} & \mathbf{T}'_{12} \\ \mathbf{T}'_{21} & \mathbf{T}'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b(2L+h) \\ a(2L+h) \end{bmatrix} \quad (6)$$

给定理想边界条件: $b(0)=1$ 、 $a(2L+h)=0$ ,则双FBG谐振腔反射系数可表示为

$$r_{\text{FBG}} = a(0)/b(0) = \mathbf{T}'_{21}/\mathbf{T}'_{11} = \{ik[\text{scosh}(sL) - i\Delta\beta \cdot \sinh(sL)]\sinh(sL) + ik[\text{scosh}(sL) + i\Delta\beta \cdot \sinh(sL)]\sinh(sL) \exp(i2\beta h)\} / \{[\text{scosh}(sL) - i\Delta\beta \sinh(sL)]^2 + k^2 \sinh^2(sL) \exp(i2\beta h)\} \quad (7)$$

则双FBG谐振腔反射率为

$$R_{\text{FBG}} = |r_{\text{FBG}}|^2 \quad (8)$$

双FBG谐振腔在其带宽内对光的耦合反射作用加强了激光器的前端反射率,则激光器整体反射率可表示为

$$R(\lambda) = R_f + \eta^2 \frac{(1-R_f)^2 R_{\text{FBG}}}{1-R_f R_{\text{FBG}}} \quad (9)$$

式中 $R_f$ 为激光器前端面反射率, $R_{\text{FBG}}$ 为双FBG谐振腔反射率, $\eta$ 为光纤与激光器芯片耦合效率。由式(7)可知, $L$ 和 $h$ 作为双FBG谐振腔的重要参量影响着其传输特性,运用Matlab对式(9)进行模拟仿真分析,探讨 $L$ 对激光器输出光谱的影响,结果如图3所示。

由图3可知,随着 $L$ 从0.25 mm增大到8 mm,输出光谱线宽由2.8 nm减小到1.3 nm,所以一定程度上可以通过增大 $L$ 值来压缩激光器输出光谱线宽。

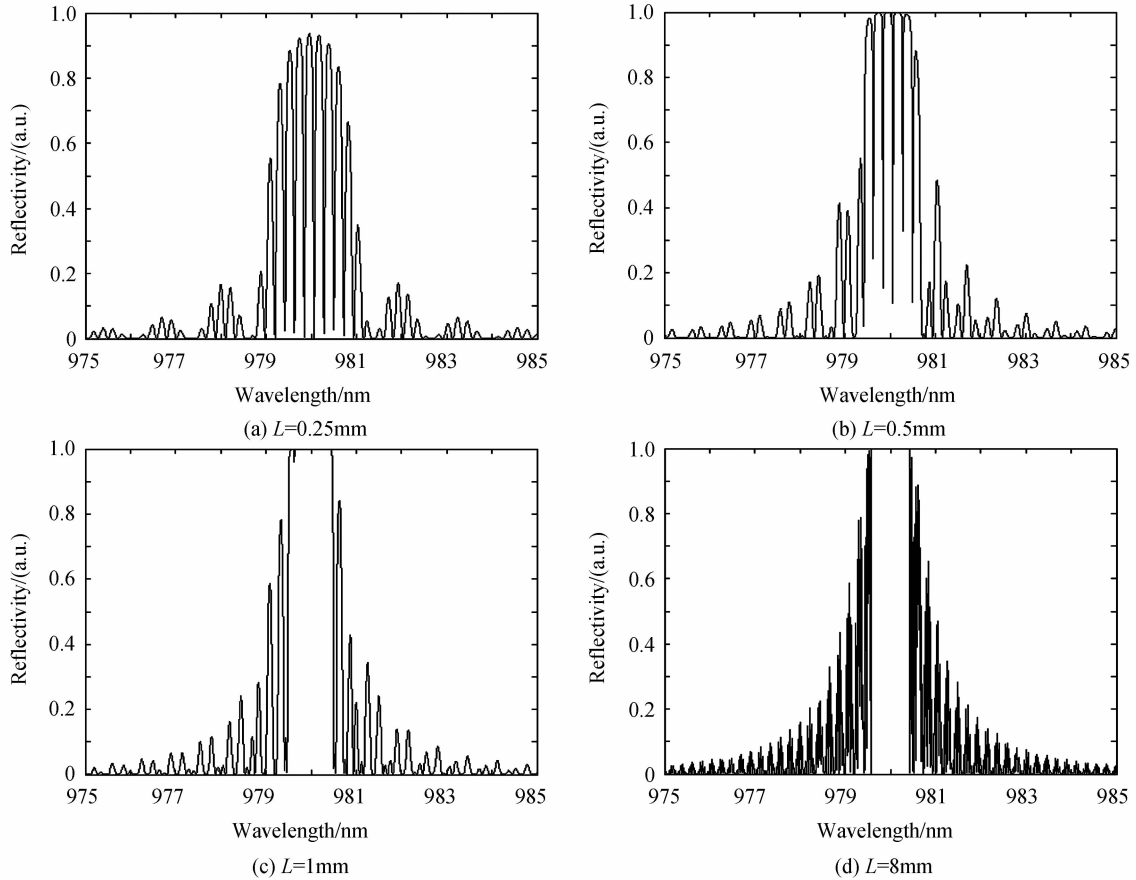


图3 不同光纤光栅长度输出光谱

Fig. 3 Output spectra with different FBG lengths

由式(7)可知, $h$ 也是输出光谱的一个影响因素。图4为Matlab仿真不同 $h$ 值得到的输出光谱图。

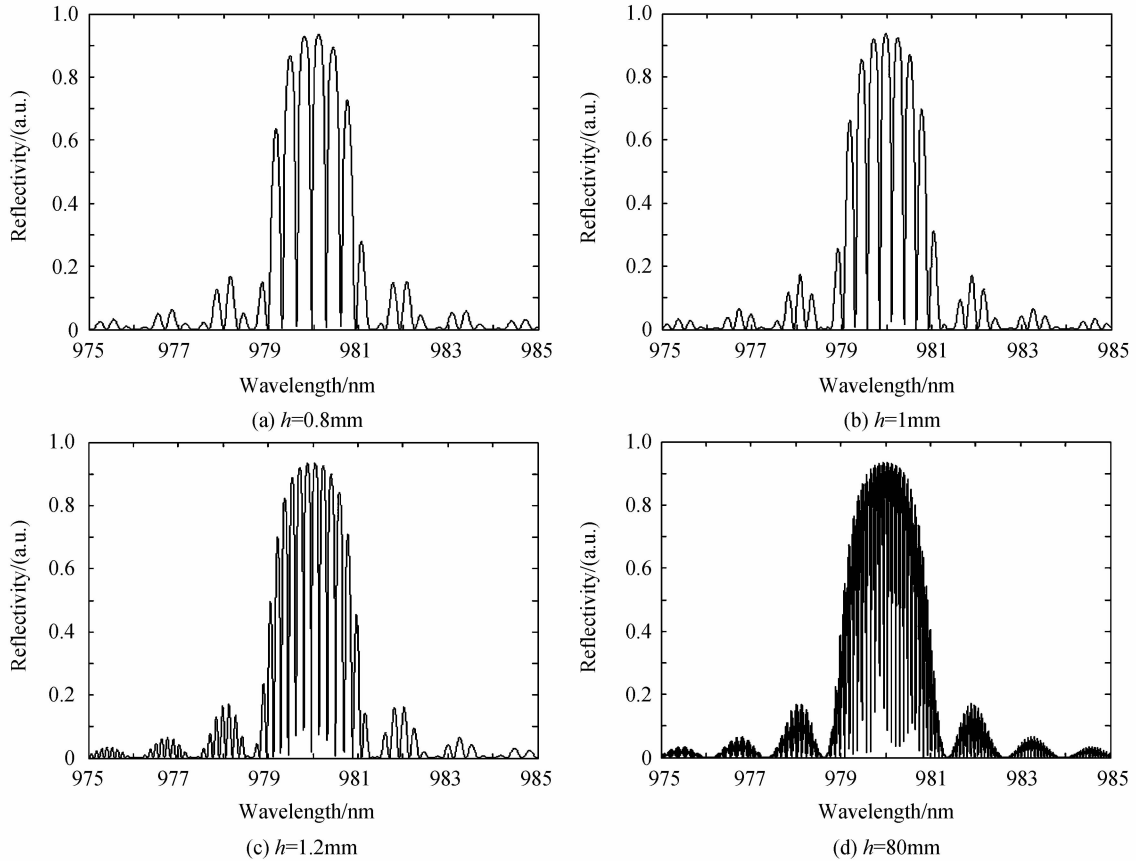


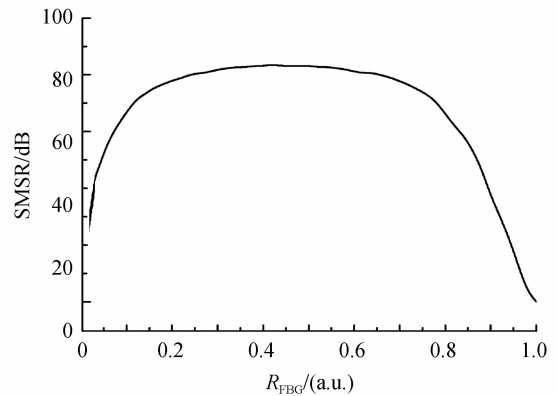
图4 双FBG构成的不同谐振腔腔长的输出光谱

Fig. 4 Output spectra with different lengths of FBG cavity constituted by dual FBG

由图4可以看出,随着 $h$ 的增大,谐振谱线越多,输出光谱的每个线宽也就越窄.线宽越窄,激光器经过双FBG选模之后输出的线宽也越窄.同时,谐振谱线的增多也会使激光器随工作电流变化而产生的输出功率线性抖动变小.然而,随着谐振腔腔长的增大,边模抑制比会减小,激光器的稳定性会变差.综合分析图3与图4可以得出光纤光栅长度对输出光谱的影响大于谐振腔腔长对输出光谱的影响,该结论与黄毅泽等研究人员理论推导的结果一致<sup>[16-17]</sup>.所以,在增大谐振腔腔长减小输出光谱线宽的同时也要权衡考虑激光器的稳定性.

FBG长度以及双FBG谐振腔腔长影响着双FBG谐振腔反射率,由式(9)可知双FBG谐振腔反射率一定程度上决定了激光器反射率,从而影响了激光器输出功率以及边模抑制比.图5为双FBG谐振腔反射率和边模抑制比关系图.双FBG谐振腔反射率从0增大到19%时,边模抑制比也随之增大;双FBG谐振腔反射率在20%到70%之间,边模抑制比变化不大;双FBG谐振腔反射率大于70%后,边模抑制比随之减小.在双FBG谐振腔反射率大于4%时边模抑制比大于45dB,根据式(9)可得主模功率占95%时双FBG谐振腔反射率约为7%到10%.综合考虑边模抑制比以及高输出功率,双FBG谐振腔反射率应为7%到10%

之间.

图5 SMSR- $R_{\text{FBG}}$ 关系Fig. 5 SMSR with different  $R_{\text{FBG}}$ 

## 2 实验结果

实验中采用小型双列直插(Mini-Dil)封装的非制冷980 nm半导体激光器,外壳长宽高分别为12.7 mm、7.4 mm和5.2 mm,输出尾纤是康宁1060光纤.实验所选取的光栅参量为:1号光纤光栅的光栅长度 $L$ 为0.75 mm,2号光纤光栅的光栅长度 $L$ 为1.75 mm.其余光栅参量如下:光栅折射率 $n=1.4545$ ,折射率调制深度 $\Delta n=0.0008$ ,光栅到激光器前端面距离 $D=40$  cm,光栅中心波长 $\lambda_B=979.5$  nm,

双 FBG 谐振腔腔长  $h=50$  mm.

图 6 为 25℃、驱动电流 100 mA 条件下带 1 号 FBG 和带 2 号 FBG 的激光器所测得的输出光谱以及理论模拟输出光谱.

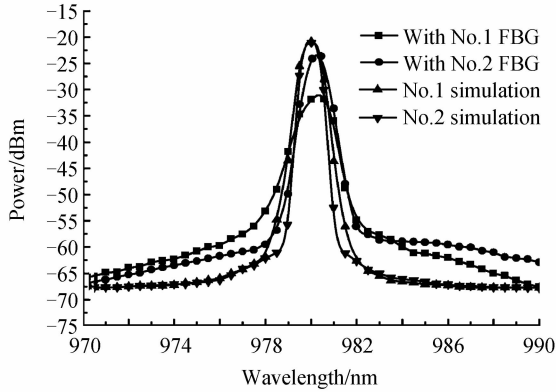
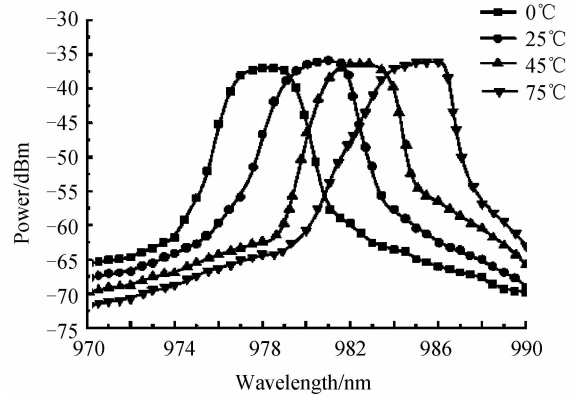


图 6 带 1 号 FBG、带 2 号 FBG 的激光器输出光谱和理论模拟输出光谱

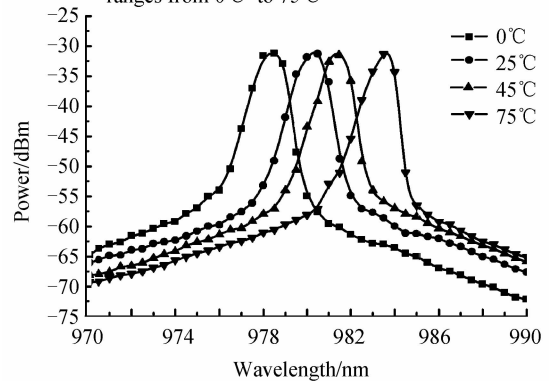
Fig. 6 Spectrum of laser with No. 1 FBG and with No. 2 FBG and simulant spectrum

由图 6 可得,带 1 号 FBG 的激光器和带 2 号 FBG 的激光器其半峰值全宽度分别为 3.2 nm、2.2 nm,与 1 号 FBG、2 号 FBG 相同参量模拟输出光谱半峰值全宽度分别为 2.3 nm 和 1.7 nm.不带 FBG 原激光器半峰值全宽度约 4.5 nm,实验结果表明引入双 FBG 谐振腔能很好地压缩激光器输出光谱线宽,并且在一定范围内 FBG 长度越长激光器输出光谱线宽越窄,与理论分析吻合.目前使用自放大分布反馈法压缩光谱线宽得到光谱线宽约为 3.7 nm<sup>[18]</sup>,与之相比,写入双 FBG 谐振腔压缩光谱更方便有效.实验所得输出光谱半峰值全宽度比模拟曲线大的原因包括:1)由于工艺因素,光纤光栅的实际参量并不能达到与理论参量完全一致;2)激光器芯片在测量运行时与理论模型有一定的差距.

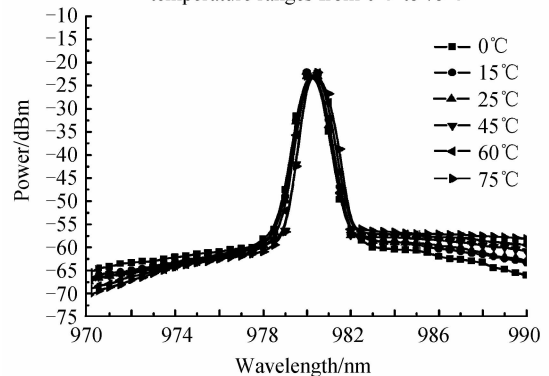
图 7(a)、(b)、(c)分别为驱动电流为 100 mA 时不带 FBG 的激光器、带 1 号 FBG 的激光器和带 2 号 FBG 的激光器在不同环境温度下的输出光谱特性.当环境温度上升时,激光器输出光谱中心波长向长波长漂移.图中显示当温度从 0℃变化到 75℃时,不带 FBG 的激光器其中心波长漂移了 7.1 nm,温漂系数约为 0.095 nm/℃;带 1 号 FBG 的激光器其中心波长漂移了 5.2 nm,温漂系数约为 0.069 nm/℃;带 2 号 FBG 的激光器其中心波长漂移了 0.06 nm,温漂系数约为 0.000 8 nm/℃,该漂移量相对于激光器输出光谱的线宽而言是可以接受的,因此双 FBG 谐振腔对激光器输出光谱起到很好的稳定作用.加拿大 JDSU 公司也在研究和开发带 FBG 激光器,根据报导其单 FBG 激光器温漂系数约为 0.002 nm/℃.



(a) Spectrum of laser without FBG when the temperature ranges from 0℃ to 75℃



(b) Spectrum of laser with No.1 FBG when the temperature ranges from 0℃ to 75℃



(c) Spectrum of laser with No.2 FBG when the temperature ranges from 0℃ to 75℃

图 7 不带 FBG 的激光器、带 1 号 FBG 和带 2 号 FBG 的激光器在 0~75℃时的输出光谱

Fig. 7 Spectra of laser without FBG and with No. 1 FBG and with No. 2 FBG when temperature ranges from 0℃ to 75℃

图 8 为 25℃、45℃和 75℃时不带 FBG 的激光器、带 1 号 FBG 的激光器和带 2 号 FBG 的激光器其输出功率随驱动电流变化曲线,左纵轴为输出功率,右纵轴为功率-电流微分.(a)图中,当驱动电流为 300 mA 时,不带 FBG 的激光器、带 1 号 FBG 的激光器和带 2 号 FBG 的激光器其出纤功率分别为 176.84 mW、171.76 mW和 165.78 mW.可以看出,写入双 FBG 谐振腔会在一定程度上减小 980 nm 半导体激光器的输出功率,但是输出功率的减小量在 980 nm 半导体激光

器作为大功率器件的范围内是可以接受的. 并且, 图 8 说明写入 1 号和 2 号 FBG 谐振腔使得 980 nm 半导体激光器输出功率随驱动电流变化的线性度更好, 从另一方面体现了 980 nm 半导体激光器稳定性的提高. 从图(a)到图(c)随着温度的上升激光器的输出  $P-I$  曲线稳定性下降, 但是带 2 号 FBG 的激光器稳定性下降量微小. 可以认为  $0\sim 75^\circ\text{C}$  范围内, 接入 2 号 FBG 大大提高了激光器  $P-I$  曲线的温度稳定性.

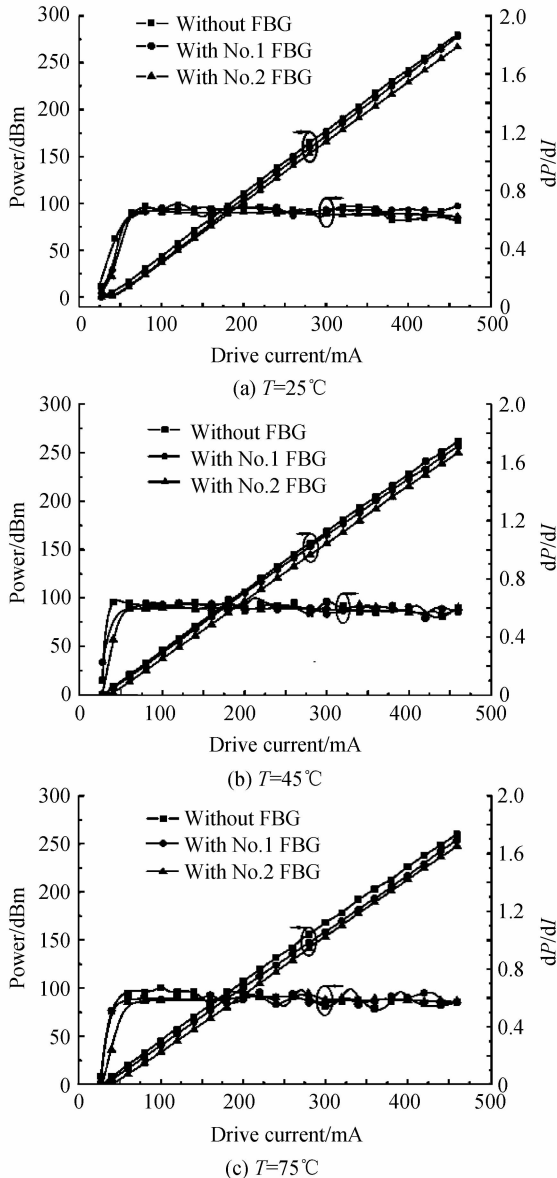


图 8 25 $^\circ\text{C}$ 、45 $^\circ\text{C}$  和 75 $^\circ\text{C}$  时, 不带 FBG、带 1 号 FBG 和带 2 号 FBG 的激光器功率-电流特性

Fig. 8  $P-I$  characteristics of laser without FBG and with No. 1 FBG and with No. 2 FBG in temperature of 25 $^\circ\text{C}$ , 45 $^\circ\text{C}$  and 75 $^\circ\text{C}$

### 3 结论

基于光纤光栅传输矩阵理论推导了双 FBG 光纤光栅传输表达式, 对 FBG 长度和谐振腔腔长对输出光

谱的影响进行模拟仿真. 通过接入不同光栅长度的双光纤光栅谐振腔实现了对半导体激光器输出光谱线宽的压缩, 实验选取接入的 2 号 FBG 将半导体激光器输出光谱半峰值全宽度压缩为 2.2 nm, 与理论分析模拟吻合. 写入双 FBG 谐振腔在压缩激光器输出光谱的同时也对半导体激光器输出光谱起到稳定的作用. 实验中, 当半导体激光器环境温度从  $0^\circ\text{C}$  到  $75^\circ\text{C}$  变化时, 激光器输出光谱中心波长仅仅漂移了 0.06 nm, 大大提高了半导体激光器输出光谱的稳定性.

#### 参考文献

- [1] SHEN Yan-long, HUANG Ke, ZHU Feng, *et al.* Laser diode-pumped watt-level single mode heavily erbium-doped mid-infrared fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(3): 0314002.  
沈炎龙, 黄珂, 朱峰, 等. LD 泵浦瓦级单模高掺铒中红外光纤激光器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(3): 0314002.
- [2] ZHAO Yi-hao, WANG Jun, WANG Cui-luan, *et al.* Study of high-power broad area distributed-feedback laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(8): 0802005.  
赵懿昊, 王俊, 王翠鸾, 等. 大功率宽条分布反馈激光器研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802005.
- [3] LI Yi, HUANG Yi-ze, WANG Hai-fang, *et al.* Wavelength stabilizer with dual fiber Bragg grating for 980 nm semiconductor laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(7): 1468-1475.  
李毅, 黄毅泽, 王海方, 等. 980 nm 半导体激光器双布喇格光纤光栅波长锁定器[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(7): 1468-1475.
- [4] HUANG Yi-ze, YI Li, WANG Hai-fang, *et al.* Wavelength stabilization of a high-power uncooled dual FBG stabilized 980 nm semiconductor laser module[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(3): 031403.
- [5] PI Hao-yang, XIN Guo-feng, CHENG Can, *et al.* Wavelength locked high power semiconductor laser linear array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 822-825.  
皮浩洋, 辛国锋, 程灿, 等. 高功率半导体激光器线阵列的波长锁定技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 822-825.
- [6] GLEBOV L. Optimizing and stabilizing diode laser spectral parameters[J]. *Photonics Spectra*, 2005, **1**: 90-94.
- [7] VOLDIN B L, DOLGY S V, MELNIK E D, *et al.* Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(16): 1891-1893.
- [8] MA Wei-guang, ZHAO Gang, FU Xiao-fang, *et al.* Stability analysis of fiber electro-optic modulator based PDH frequency locking technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(1): 1150021-1150026.  
马维光, 赵刚, 付小芳, 等. 基于光纤光电调制器的 PDH 频率锁定稳定性研究[J]. *中国激光*, 2014, **41**(1): 1150021-1150026.
- [9] ZHANG Xiao-yuan, YU Jin-long, LUO Jun, *et al.* Optical pulses compression based on fiber-optical parametric amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1292-1296.  
张晓媛, 于晋龙, 罗俊, 等. 基于光纤光参量放大的光脉冲压缩技术的研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1292-1296.
- [10] WANG Xiao-bo, MA Wei-guang, WANG Jing-jing, *et al.* Single photon wavelength modulation absorption spectrum of acetylene for 1.5  $\mu\text{m}$  laser wavelength stabilization[J]. *Acta*

- Physica Sinica*, 2012, **61**(10): 1042051-1042055.
- 王晓波, 马维光, 王晶晶, 等. 单光子波长调制吸收光谱用于 1.5  $\mu\text{m}$  激光器的波长锁定[J]. 物理学报, 2012, **61**(10): 1042051-1042055.
- [11] MENG Hong-yun, LI Chang-xi. Amplified spontaneous emission injection wavelength-locked Fabry-Perot laser diodes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(8): 1181-1184.
- 蒙红云, 李昌熹. 放大自发辐射注入波长锁定法布里-珀罗激光器[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1181-1184.
- [12] TONG Xin-lin, WEN Chang-shan, ZHU Xiao-long, *et al.* Control of the cavity length consistency of miniaturization optical fiber F-P sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 1-5.
- 童杏林, 文昌山, 朱小龙, 等. 微型化光纤法布里-珀罗传感器腔长一致性的控制研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(1): 1-5.
- [13] JIANG Peng-fei, ZHOU Yan, XIE Fu-zeng. Study of blaze grating feedback external-cavity semiconductor laser with narrow-line width[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(6): 869-870.
- 江鹏飞, 周燕, 谢福增. 闪耀光栅外腔反馈压窄半导体激光器线宽技术的研究[J]. 光学技术, 2006, **32**(6): 869-870.
- [14] YU Ying, YU Zhen-hong, ZHAO Ling-jun, *et al.* Analysis of regular fiber Bragg grating performance[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, **30**(6): 11-13.
- 鱼瑛, 余震虹, 赵玲君, 等. 常用光纤 Bragg 光栅特性分析[J]. 传感器与微系统, 2011, **30**(6): 11-13.
- [15] DONG Xiao-wei, LIU Wen-kai, WANG Dong-yu, *et al.* Study on Fabry-Perot cavity consisting of two chirped fiber Bragg gratings[J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, **18**(4): 209-214.
- [16] HUANG Yi-ze, LI Yi, ZHU Hui-qun, *et al.* Theoretical investigation into spectral characteristics of a semiconductor laser with dual-FBG external cavity [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(12): 2960-2965.
- [17] HUANG Yi-ze, LI Yi, WANG Hai-fang, *et al.* Coherence collapse of the dual fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(1): 0142011-01420110.
- 黄毅泽, 李毅, 王海方, 等. 双光纤光栅外腔半导体激光器相干失效研究 [J]. 物理学报, 2012, **61**(1): 0142011-01420110.
- [18] SONG Zhi-qiang, QI Hai-feng, GUO Jian, *et al.* Characteristics of self-amplified distributed feedback fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0206005.
- 宋志强, 祁海峰, 郭健, 等. 自放大结构分布反馈光纤激光器输出特性[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 0206005.