

功率稳定且波长可调谐的窄线宽分布式反馈半导体激光器

王琪^{1,2}, 郭锦锦¹, 陈伟¹, 刘建国^{1*}, 祝宁华¹

¹中国科学院半导体研究所固态光电信息技术实验室, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 提出一种新型的分布式反馈(DFB)半导体激光器,该激光器具有宽带波长可调谐、线宽窄、功率稳定的特点。该DFB激光器芯片通过采用非对称相移光栅结构,有效地压窄了输出光信号的线宽。基于高精度的温度和电流控制,有效控制激光器内部载流子动态特性与材料折射率,使得激光器输出波长可以实现宽带调谐,并且输出光功率保持稳定。其中,电流控制精度为 $10\ \mu\text{A}$,温度控制精度为 $0.004\ ^\circ\text{C}$,激光器的波长调谐范围为 $3.5\ \text{nm}$,输出光功率为 $7.4\ \text{mW}$,边模抑制比为 $52.7\ \text{dB}$,线宽约为 $220\ \text{kHz}$ 。该激光器有望应用于可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)的研究中。

关键词 激光器; 分布式反馈; 波长可调谐; 窄线宽; 功率稳定

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0101004

Widely Tunable Distributed Feedback Semiconductor Lasers with Constant Power and Narrow Linewidth

Wang Qi^{1,2}, Guo Jinjin¹, Chen Wei¹, Liu Jianguo¹, Zhu Ninghua¹

¹Laboratory of Solid State Optoelectronic Information Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A widely tunable distributed feedback (DFB) semiconductor laser with constant power and narrow linewidth is fabricated. The laser chip is based on the asymmetric phase-shifted DFB structure, which can effectively narrow the bandwidth of the output. By precisely controlling the temperature and driving current, the dynamic characteristic of internal carriers and the refractive index of the material can be controlled effectively, so wide-band tuning wavelength and constant output power are obtained. The wavelength tuning range is over $3.5\ \text{nm}$, the laser power is $7.4\ \text{mW}$, the linewidth is about $220\ \text{kHz}$ and the side mode suppression ratio is $52.7\ \text{dB}$. This laser has wide application prospects for tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS).

Key words lasers; distributed feedback; wavelength tunability; narrow linewidth; power stabilization

OCIS codes 140.3490; 140.3600; 300.3700

1 引言

可调谐半导体激光器的波长不仅可随电流或温度连续调谐,还具有线宽窄、频率稳定度高等优点,它在

收稿日期: 2016-08-25; 收到修改稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61307084, 61535014, 61527820)

作者简介: 王琪(1990—),男,博士研究生,主要从事可调谐激光器和窄线宽激光器方面的研究。

E-mail: qwang@semi.ac.cn

导师简介: 祝宁华(1959—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事微波光子学及高速光子集成器件与系统方面的研究。E-mail: nhzhu@semi.ac.cn

*通信联系人。E-mail: jgliu@semi.ac.cn

密集波分复用(DWDM)、相干光通信、可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)、光时域反射(OTDR)、光频域反射(OFDR)等方面具有广泛的应用^[1-5]。在这些应用中光源的频率稳定度、线宽及可调谐性是核心的技术指标^[6]。

目前,主要的可调谐激光器有分布布拉格反射镜(DBR)激光器、分布式反馈(DFB)激光器和外腔激光器(ECL)三种^[7-9]。其中,通过改变激光器驱动电流或者温度,可实现输出光波长可宽带调谐的DFB激光器,且其输出功率可以改变^[10]。在文献[11]中报道,将激光器工作温度从15℃调节至85℃,可使DFB激光器波长调谐范围达到9.7nm,同时保持线宽低于500kHz,但随着温度的变化,激光器的输出功率变化超过5dB;文献[12]中提出线宽可以达到100kHz以内,但是调谐范围只有1.3nm。文献[13]中报道了通过在激光器上集成一个较短的铂加热带,通过注入热电流对波长进行控制,得到了4.9nm的波长调谐范围,但是这一方法需要提供额外的热电流,使得系统变得较为复杂。为了有效地与密集波分复用器兼容,提高光通信的通信容量,DFB阵列激光器应运而生。在文献[14]中报道了一个32通道DFB阵列激光器,光波长覆盖范围达到25nm。

在TDLAS技术中,基于可调谐激光器波长调谐特性,通过扫描一定波长范围内气体的单个或者多个吸收峰,可获得待测气体的特征吸收谱线,进而对待测气体进行分析,当激光器输出波长与待测气体吸收峰一致时,气体对光的吸收最强。该技术对可调谐激光器工作波长调谐性和稳定性要求较高,而DFB半导体激光器可通过改变温度实现大范围的波长调谐满足以上需求。然而随着波长的宽带调谐,DFB半导体激光器的输出功率也会发生改变,输出光功率改变量甚至会超过气体对光的吸收强度,从而引入测量误差。迄今为止,国内外文献中往往更关注波长调谐范围,而不重视功率抖动,目前对可调谐激光器在波长扫描的同时对功率进行控制的报道很少。

本文提出了一种功率稳定、宽带波长可调谐的窄线宽DFB激光器。基于非对称相移光栅结构设计了激光器芯片结构^[15],克服了外部反射对激光器内部的影响,压窄了线宽,也极大地减小了相对强度噪声^[16]。基于激光器内部载流子的动态特性与材料折射率控制,通过对激光器模块温度和电流的优化,解决了DFB激光器波长调谐时功率不稳定的问题。

2 激光器装置与原理介绍

2.1 DFB 半导体激光器工作原理

通常情况下,需要在DFB半导体激光芯片中的光栅结构中引入对称的相移,但激光器解理面和镀膜的非对称性会对这种结构产生影响,使得输出波长和输出功率不稳定。针对以上不足,提出了非对称相移光栅结构,改进了DFB激光器芯片。图1为DFB激光器局部结构示意图。光栅层生长于有源层之上,光栅层采用非对称结构,在偏离光栅中心位置处引入 $\lambda/4$ 相移, λ 为输出激光波长,原光栅被分为两个长度为 L_1 和 L_2 的光栅段,其中 $L_1 > L_2$, L_1 与腔长 L 的比值为 $0.55 \sim 0.7$ 。在这种非对称结构中,相移点附近可以产生强烈的激光振荡。相移左侧的光栅段可视为高反射率的全反射镜,右侧的光栅段可视为低反射率的输出镜,因此从光栅段较短的 L_2 端将获得更大的激光功率输出。 L_1 端长于 L_2 端的光栅部分与原对称光栅段形成自注入锁定,从而达到压窄线宽的目的^[15]。

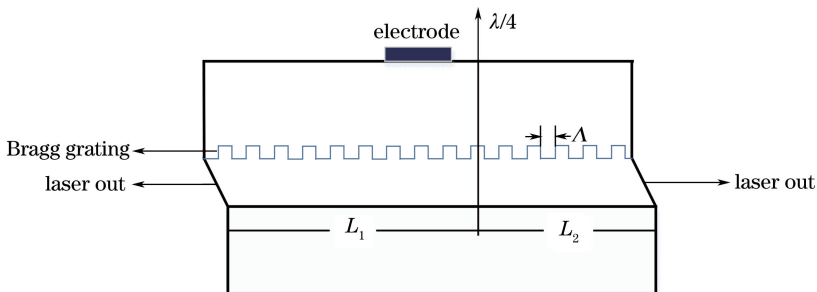


图1 DFB激光器局部结构示意图

Fig. 1 Schematic of local structure of DFB laser

DFB 激光器的波长调谐主要通过改变电流或温度来完成。在 DFB 激光器中只有满足布拉格反射定律的波长才能被反射,即

$$m\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda, \quad (1)$$

式中 λ_{Bragg} 为布拉格波长, m 为整数, n_{eff} 为有源区有效折射率实部, Λ 为光栅周期。由(1)式可以得到

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{Bragg}} \cdot \frac{\Delta n}{n_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

式中 Δn 为有效折射率变化量, $\Delta\lambda$ 为对应的波长变化量。注入电流的变化会改变有源区载流子的浓度,载流子浓度的变化会改变有源区折射率,进而改变波长。激光器工作温度的变化同样会改变材料折射率,导致波长变化。

在改变电流和温度进行波长调谐的过程中,激光器的输出功率也会发生变化。电流的变化导致有源区增益系数发生改变,宏观上反应为功率的变化^[10]。注入载流子扩散能量随温度的增加而增加,导致增益随之降低,这时,为了达到阈值就需要更多的载流子,在宏观上表现为阈值电流随温度增加而增大。阈值电流可表达为

$$I_{\text{th}} = I_0 \exp(T/T_0), \quad (3)$$

式中 I_{th} 为温度 T 下的阈值电流, I_0 为已知温度 T_0 下的阈值电流。激光器输出光功率随电流与温度的变化如图 2 所示。由图 2(a)可以看出,激光器阈值电流为 20 mA,而激光器输出光功率与激光器电流是准线性相关的,在达到阈值之后,输出光功率随着电流的增大以较好的线性度增加,最大输出功率为 25 mW。由图 2(b)可以看出,随着温度的增加,激光器功率单调减小,这与理论分析一致。其中,输出激光功率最低为 6.053 mW(7.82 dBm),最高为 8.495 mW(9.27 dBm),这个功率波动幅度很接近一些气体在 1550 nm 附近的吸收峰透射深度。

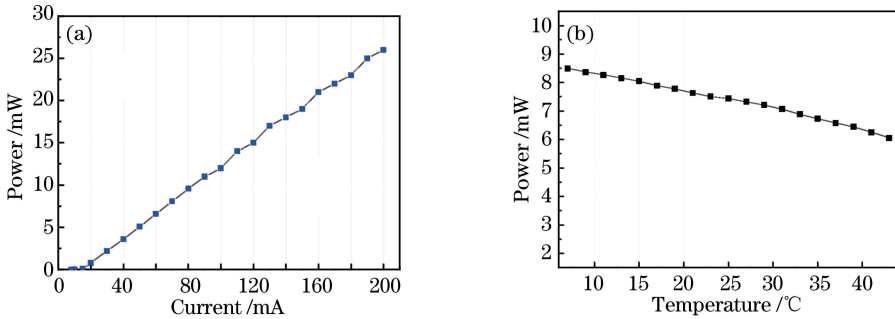


图 2 (a)激光器模块功率随电流变化曲线; (b)功率随温度变化曲线

Fig. 2 (a) Laser power versus current; (b) laser power versus temperature

2.2 激光器伺服系统原理介绍

激光器伺服系统原理图如图 3 所示。整个激光器伺服系统包含供电部分(power supply)、温控电路(TEC control circuit)、电流驱动电路(current drive circuit)、波长与功率控制电路。采用的微控制器(MCU)为 C8051F060,MCU 内置 16 位的数模转换器(DAC)和 16 位的模数转换器(ADC)。通过调节控制

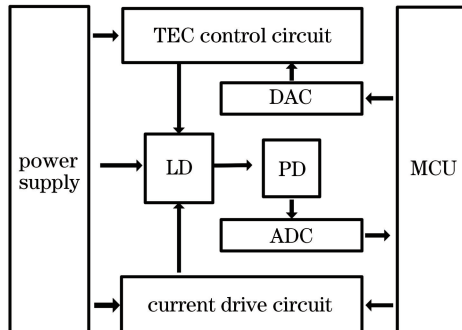


图 3 激光器模块原理图

Fig. 3 Schematic of laser module

激光器温度的 DAC 改变激光器温度,实现对波长的调谐。当温度变化时激光器功率会有波动,该波动可以由激光器内部背光功率探测器(PD)探测并转化为电压信号,再经 ADC 被 MCU 识别,进而对驱动电流进行微调。通过对温度与电流的优化设置实现对光波长的宽带调谐并维持输出光功率的稳定。

2.3 激光器模块频率稳定度分析

驱动电流的波动与温度漂移是造成激光器频率不稳定的两个主要因素。为了实现激光器输出光波长的稳定,良好的电流驱动电路和温控电路是必不可少的。实验中,激光器的电流驱动芯片采用 AD 公司的 ADN8810,驱动电流量程达到 300 mA。一般情况下,在波长 1550 nm 附近,1 mA 的驱动电流变化可引起输出光频率变化 300~400 MHz^[17]。图 4 为激光器电流驱动电路图,图中 AGND 表示模拟接地, U_i 表示输入电压。在激光器后串联一个阻值为 2 Ω 的精密采样电阻。由示波器(DPO4054B)探测到的此采样电阻两端的电压纹波可知,电压抖动在 20 μ V 以内时,对应的电流抖动为 10 μ A,相应的频率不稳定度为 4 MHz。

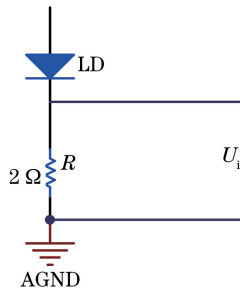


图 4 激光器电流驱动电路图

Fig. 4 Laser driving circuit diagram

激光器的温控电路采用美信公司的芯片 MAX1978^[18];在 14 针蝶形封装的激光器内部贴近芯片位置封装有热敏电阻(阻值为 R_{thm})与 TEC;热敏电阻阻值具有温度敏感性,可以感知激光器芯片的工作温度;TEC 由 MAX1978 控制改变激光器工作温度实现波长调谐。在 1550 nm 附近温度变化 1 $^{\circ}$ C,对应频率变化为 10 GHz,波长为 0.08 nm。图 5 为本模块温控电路的原理图,热敏电阻与一个 15 k Ω 的电阻串联在一起,2.5 V 高精度稳定电源电压(VCC)由 AD 公司的 AD291 提供,图中 GND 表示接地。设定温度点(FB+)由 DAC 提供,通过 MCU 调节 DAC 值大小,设定不同的温度。温度的变化改变热敏电阻阻值,从而改变实际温度(FB-)处的电位。 U_t 为热敏电阻两端电压。 U_t 与 R_{thm} 之间的关系可表述为

$$U_t = \frac{2.5 \times R_{thm}}{R_{thm} + 15} \quad (4)$$

使用 KEITHLEY 公司的精密万用表对热敏电阻两端电压进行测量,测量精度达到 0.000001 V。激光器温度设置为 25 $^{\circ}$ C,对应热敏电阻为 10 k Ω ,热敏电阻阻值与温度对应关系约为 0.256 k Ω / $^{\circ}$ C。实验中测量到 U_t 的波动低于 0.0001 V,对应 R_{thm} 的变化为 0.001 k Ω ,因而温度抖动低于 0.004 $^{\circ}$ C,换算成频率即 40 MHz。

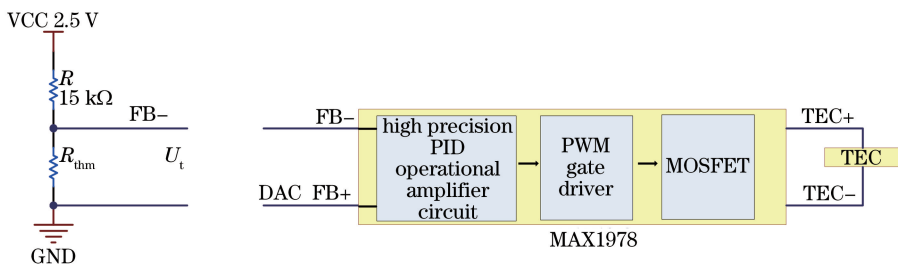


图 5 激光器温控原理图

Fig. 5 Schematic of temperature controlling circuit

3 实验数据及分析讨论

不同温度下输出激光光谱如图 6 所示。图 6(a)为温度设定在 25 °C 下的激光光谱,此时输出激光边模抑制比达到 52.7 dB;图 6(b)为通过控制激光器工作温度,以 3 °C 为间隔从 7 °C 调至 43 °C,采集到不同温度下的光谱图,其输出激光波长分别为 1536.275,1536.550,1536.860,1537.135,1537.440,1537.725,1538.000,1538.300,1538.580,1538.870,1539.165,1539.440,1539.780 nm。随着温度升高,激光器波长从 1536.275 nm 增至 1539.780 nm,调谐范围超过 3.5 nm。在改变温度进行调谐过程中激光器没有跳模。

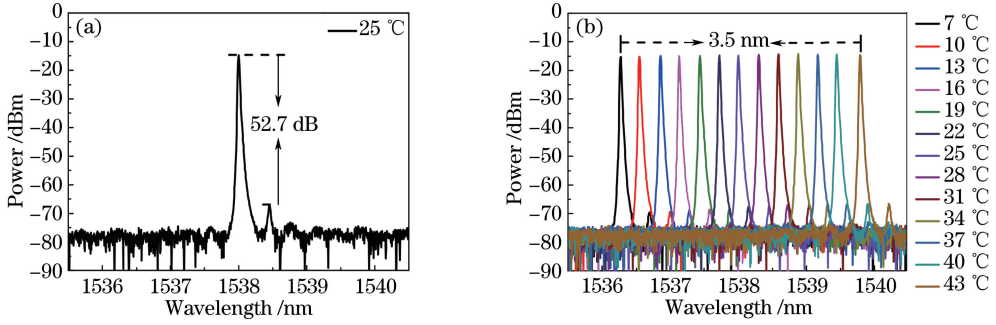


图 6 (a)25 °C 时光谱图;(b)不同温度下的激光输出光谱

Fig. 6 (a) Optical spectrum at 25 °C; (b) optical spectra at different temperatures

图 7 为不同温度下输出激光的功率变化,其中温度改变范围为 7 °C 至 43 °C,温度改变间隔为 2 °C。红色曲线为经过反馈控制后的激光器输出功率,黑色曲线与图 2(b)一致,为没有反馈控制的激光器输出功率。由图可以看出,通过对驱动电流进行控制,激光器功率波动已经得到大幅度抑制。激光器输出功率为 7.432 mW 时,输出光功率波动为 0.2 mW。值得注意的是,随着波长的增加,PD 对激光功率的响应微弱减小,使得在控制 PD 响应电压恒定所需的功率增大,因此经过控制后的激光功率有微弱增加的趋势。这个问题可以通过使用波长响应度更为平坦的 PD 解决。

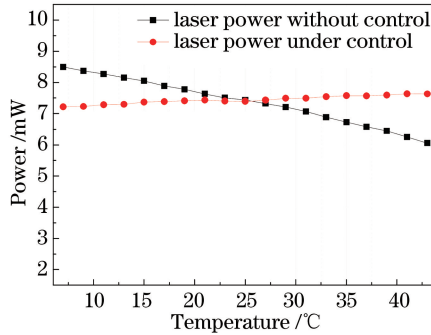


图 7 不同温度下激光器输出的功率变化

Fig. 7 Laser powers at different temperatures

基于延时自外差法测试了该半导体激光器的线宽^[19]。该激光器输出光信号经耦合器分为两路,一路经过声光调制器,另一路经过光纤延时,最后利用耦合器将两路光信号合为一路输入 PD 进行拍频。其中,采用的延时光纤为 25 km,采用的声光调制器移频频率为 110 MHz。图 8 为所测的不同温度下的激光器线宽,其中温度改变范围为 7 °C 至 43 °C,温度改变间隔为 2 °C。由图 8(a)可以看出,在整个温度变化过程中,线宽在 220 kHz 附近波动,可保持相对稳定,最小为 195 kHz,最大为 275 kHz。图 8(b)为激光器工作在 25 °C 下的线宽测试图,从图中可见,25 °C 下激光器模块线宽为 220 kHz。

4 结 论

研制了一款功率稳定、宽带波长可调谐的 DFB 激光器。基于非对称相移光栅结构重新设计了 DFB 激光器的芯片结构。基于激光器内部载流子动态特性及折射率控制,通过对激光器模块工作温度和电流的优

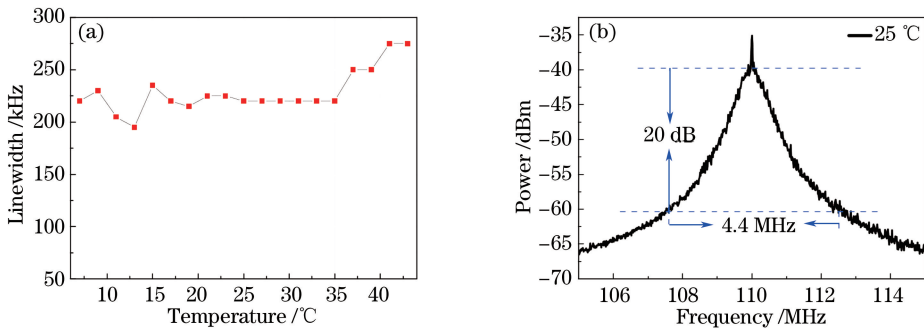


图 8 (a)不同温度下输出激光线宽;(b)25 °C下的线宽

Fig. 8 (a) Laser linewidths at different temperatures; (b) laser linewidth at 25 °C

化设置和精密控制,解决了DFB半导体激光器在波长调谐时功率不稳定的问题,实现了宽带波长调谐,并保持输出激光功率稳定。波长调谐范围超过3.5 nm,输出光功率为7.4 mW,调谐过程中,功率波动低于2%,线宽保持相对稳定,25 °C下线宽为220 kHz。该模块可以满足TDLAS技术中对于可调谐激光器的需求。

参 考 文 献

- [1] Oomori H, Ichino M, Miki A, *et al.* Extremely compact coaxial DFB-LD modules for 2.5 Gb/s DWDM metro application[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2011, 1(8): 1147-1153.
- [2] Kotaki Y, Ishikawa H. Wavelength tunable DFB and DBR lasers for coherent optical fibre communications[J]. IEE Proceedings J: Optoelectronics, 1991, 138: 171-177.
- [3] Xu L J, Liu C, Jing W Y, *et al.* Tunable diode laser absorption spectroscopy-based tomography system for on-line monitoring of two-dimensional distributions of temperature and H₂O mole fraction [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(1): 013101.
- [4] Koyamada Y, Nakamoto H. High performance single mode OTDR using coherent detection and fibre amplifiers[J]. Electronics Letters, 1990, 26(9): 573-575.
- [5] Takada K. High-resolution OFDR with incorporated fiber-optic frequency encoder [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(9): 1069-1072.
- [6] Xu Qingyang, Chen Shaowu. Tunable semiconductor lasers[J]. Physics, 2004, 33(7): 508-514.
徐庆扬, 陈少武. 可调谐半导体激光器研究及进展[J]. 物理, 2004, 33(7): 508-514.
- [7] Yu L Q, Wang H T, Lu D, *et al.* A widely tunable directly modulated DBR laser with high linearity [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 1-8.
- [8] Li L, Tang S, Huang L, *et al.* Experimental demonstration of a low-cost tunable semiconductor DFB laser for access networks[J]. Semiconductor Science and Technology, 2014, 29(9): 095002.
- [9] Wang Junzhen, Wang Yuefeng, Bai Huijun. A kind of narrow line width external cavity laser diode with wavelength stability and continuous tuning[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1202002.
王军阵, 汪岳峰, 白慧君. 一种波长稳定可调的窄线宽外腔二极管激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1202002.
- [10] Du Zhenhui, Li Jinyi, Qi Rubin, *et al.* Analytical model for the tuning characteristics of static dynamic and transient behaviors in temperature and injection current of DFB laser diodes[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 346-350.
杜振辉, 李金义, 齐汝宾, 等. DFB激光二极管电流-温度调谐特性的解析模型[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 346-350.
- [11] Faugeron M, Tran M, Parillaud O, *et al.* High-power tunable dilute mode DFB laser with low RIN and narrow linewidth[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(1): 7-10.
- [12] Okai M, Tsuchiya T. Tunable DFB lasers with ultra-narrow spectral linewidth[J]. Electronics Letters, 1993, 29(4): 349-351.
- [13] Sin Y, Presser N. Tunable InGaAsP/InP DFB lasers at 1.3 μm integrated with Pt thin film heaters deposited by focused ion beam[J]. Electronics Letters, 2003, 39(25): 1-2.
- [14] Li L, Tang S, Lu J, *et al.* Study of cascaded tunable DFB semiconductor laser with wide tuning range and high single mode yield based on equivalent phase shift technique[J]. Optics Communications, 2015, 352: 70-76.
- [15] 刘建国, 郭锦锦, 黄宁博, 等. 基于非对称相移光栅的窄线宽DFB半导体激光器: 201310019361.6[P]. 2013-05-01.

- [16] Liu J, Wang S, Chen W, *et al.* Narrow linewidth distributed-feedback laser with low relative intensity noise[C]. 2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 2015: 1-3.
- [17] Liu Jingwang, Li Zhongyang, Zhang Weizhong, *et al.* Dynamic wavelength characteristics of semiconductor laser in electric current tuning process[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(11): 3220-3223.
刘景旺, 李忠洋, 张卫中, 等. DFB 半导体激光器调谐动态波长特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(11): 3220-3223.
- [18] Li Xiaofei, Shui Jing, Zhang Jinliang, *et al.* Research of a wavelength-tunable laser characteristics [J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(9): 9-12.
李小飞, 税 静, 张金良, 等. 一种波长可调谐激光器的特性研究[J]. 光通信技术, 2013, 37(9): 9-12.
- [19] Okada K, Hashimoto K, Shibata T, *et al.* Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. Electronics Letters, 1980, 16(16): 630-631.