

基于法布里-珀罗激光器自注入锁定的波长可调谐激光器

高毅¹, 王菊¹, 王文睿^{2*}, 于晋龙¹

¹天津大学电气自动化与信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072;

²浙江大学航空航天学院, 浙江 杭州 310058

摘要 提出了一种基于法布里-珀罗(F-P)激光器自注入锁定的可调谐激光器方案。F-P标准具从F-P激光器多纵模光谱滤出单个纵模,再注入F-P激光器,抑制边模,实现激光器单模运转。通过快速调谐F-P激光器驱动电流,改变F-P激光器的梳状多纵模光谱,利用变化的F-P激光器梳状光谱和固定的F-P标准具梳状透过谱的游标效应,实现波长的大范围调谐。对快速波长可调谐激光器的静态特性进行研究,得到18组可用单纵模,调谐范围为1535.2~1548.68 nm,单纵模的边模抑制比为40 dB,各波长输出功率差异小于15 dBm,频率间隔为100 GHz。对快速波长可调谐激光器进行波长调谐实验,不同波长之间的调谐时间在60~100 ns范围内,验证了该方案的可行性。

关键词 激光器; 波长可调谐激光器; 法布里-珀罗激光器; 法布里-珀罗标准具; 自注入锁定; 游标效应

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061401

Tunable Laser Based on Fabry-Perot Laser Self Injection Locking

Gao Yi¹, Wang Ju¹, Wang Wenrui², Yu Jinlong¹

¹Laboratory of Fiber Communication, School of Electrical and Information Engineering,

Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China

Abstract A novel tunable laser based on Fabry-Perot (F-P) laser self injection locking is proposed. A single longitudinal mode is filtered from the multi-longitudinal modes of the F-P laser by the F-P etalon and injected back into the F-P laser to suppress side mode. We can change the spectrum of the F-P laser by tuning the driving current rapidly, and realize a wide tuning range of the wavelength by virtue of the vernier effect between the varying spectrum of the F-P laser and the stable spectrum of the F-P etalon. The static characteristics of the tunable laser are studied and 18 sets of single longitudinal modes are available. The tuning range of wavelength is from 1535.2 nm to 1548.68 nm, and the side mode suppression ratio of the single longitudinal mode is 40 dB. The power difference of each wavelength is less than 15 dBm and the frequency interval is 100 GHz. A wavelength tuning experiment is carried out, and the tuning time for different wavelengths ranges from 60 ns to 100 ns. The feasibility of the scheme is verified.

Key words lasers; tunable lasers; Fabry-Perot lasers; Fabry-Perot etalon; self injection locking; vernier effect

OCIS codes 140.3600; 230.7405; 230.6080; 220.4830

1 引言

随着人们对网络传输容量和传输速度的要求越

来越高,目前的通信网络逐渐难以满足人们日益增长的需求。密集波分复用(DWDM)系统和全光网络可以有效提高网络传输容量和传输速度,而波长

收稿日期: 2017-10-20; 收到修改稿日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61205061)、教育部博士点基金(20120032120029)

作者简介: 高毅(1994—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: 3011204112@tju.edu.cn

导师简介: 王菊(1985—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事微波光子技术、光通信方面的研究。

E-mail: wangju@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangwenrui@zju.edu.cn

可调谐激光器将是 DWDM 系统和未来全光网络的关键器件^[1]。波长可调谐激光器可以减小波分复用网络中系统的复杂度,降低系统能耗,能够降低网络运营成本,提高光网络的动态性和灵活性^[2],对通信网络的持续发展具有重要意义。

近几十年来,各种波长可调谐激光器不断涌现,这些激光器根据调谐方法的不同可分为机械调谐、热调谐、电流调谐等。有外腔结构^[3]的波长可调谐激光器是最早提出的一种波长可调谐激光器。其中比较典型的外腔结构激光器是 Littman 体外栅外腔激光器,这种激光器由一个反射型光栅和量子阱激光二极管的一个解理面构成外腔镜,通过调谐反射角度改变腔长,进而调谐波长^[4]。这种激光器的调谐速度受限于机械部件,如 Iolon 公司研制的基于微机电系统(MEMS)的外腔可调谐激光器,调谐速率仅为 10 ms。随着垂直面发射激光器(VCSEL)技术的发展^[5-6],出现了基于 VCSEL 的波长可调谐激光器,这种激光器通过 MEMS 调节激光器腔长来调谐谐振频率,调谐时间仍然为毫秒量级。热调谐即通过控制温度来调谐波长,其原理是通过改变温度改变腔长,譬如可以通过改变温度来实现光纤法布里-珀罗(F-P)腔的腔长漂移进而改变波长^[7]。但是温度是一个难以控制的变量,因此对热调谐的研究较少。日本 NEC 公司将不同波长激光器的输出进行耦合,组成集成阵列波导激光器结构,通过电路选择不同激光器输出,实现波长调谐^[8]。这种激光器的调谐时间可达到纳秒量级,但是其可调谐波长由激光器数量决定,导致工艺复杂,成本极高。拉曼光纤激光器也可以实现波长调谐,通过级联拉曼频移,可以大范围拓宽激光输出波长范围^[9-10]。分布式布拉格反射(DBR)激光器也是当前快速波长可调谐激光器的研究热点。DBR 波长可调谐激光器有多种结构,但从调谐机理方面而言都是三段式结构,如带取样光栅的同向耦合器激光器(GCSR)由耦合器、DBR 区和相位区组成^[11-12],取样光栅 DBR 激光器(SG-DBR)由前 DBR 区、相位区和后 DBR 区构成^[13-14],这种激光器的调谐速率能达到纳秒量级,但是需要三个调谐电流精确组合才能实现波长的调谐,复杂度较高。近几年研究人员提出了基于狭缝 F-P 结构的快速波长可调谐激光器^[15-17],在普通的 F-P 激光二极管(LD)结构中加入狭缝结构,构成三段结构,使激光器实现单波长输出,理论上调谐速率能达到纳秒量级,但是这种激光器需要两个控制电流,仍然受限于电流驱动复杂度。

为了解决上述问题,本文提出一种新型的快速波长可调谐激光器方案。该方案利用一个 F-P 激光器经过 F-P 标准具滤波滤出单个纵模,再通过自注入锁定实现单模运转。选择合适的 F-P 标准具即可获得频率性较好的窄线宽单纵模激光^[18]。通过改变激光器驱动电流来改变激光器梳状谱,利用 F-P 激光器梳状谱和 F-P 标准具梳状谱的光学游标效应,实现大范围内波长的快速调谐,输出符合国际电信同盟标准的激光。与其他大范围波长可调谐激光器方案相比,本方案调谐波长与速度只受激光器驱动电流这一单个变量控制,极大地降低了系统复杂度。

2 工作原理与分析

基于 F-P 激光器自注入锁定的可调谐激光器原理主要包括 F-P 激光器自注入锁定机制和基于游标效应的滤波机制。注入锁定是指外部光信号注入激光器,当注入光波长与被注入激光器波长处于锁定范围内,被注入激光的自由振荡模式被抑制,使得其输出的频率被锁定在外部注入激光的频率上。如图 1(a)所示,F-P 激光器的光谱为一梳状光谱,有多个纵模起振。将一束单纵模激光(波长为 λ_m)注入 F-P 激光器中,当注入功率大于阈值功率时,激光器振荡将被 λ_m 控制,其他波长的纵模均会被抑制,F-P 激光器的输出波长被锁定在注入激光的波长上,其光谱如图 1(b)所示。基于 F-P 激光器的自注入锁定机制,是通过梳状谱滤波器滤出单个纵模,通过光纤腔注入 F-P 滤波器,实现波长锁定。当注入光光场对准 F-P 激光器自由振荡模式注入激光器中,则注入锁定的频率范围为

$$-\frac{c}{2\mu_g L} \sqrt{\frac{P_i}{P}(1+\alpha^2)} < \Delta\omega < \frac{c}{2\mu_g L} \sqrt{\frac{P_i}{P}}, \quad (1)$$

式中 P 为 F-P 激光器自由振荡条件下拟锁定纵模的光功率; P_i 为注入光的光功率; μ_g 为群速度折射率; L 为激光器腔长; α 为相位耦合因子^[19-20]。由(1)式可知,在波长锁定的情况下,改变 F-P 激光器驱动电流,即改变其自由振荡模式,会增大失谐量,超出频率锁定范围将导致失锁。失锁后选用合适的驱动电流,使 F-P 标准具滤出另一个单纵模,只要功率和失谐量满足(1)式,将进入另一个单纵模的锁定状态,实现由一个波长到另一个波长的调谐。

游标效应可以有效拓宽自由光谱范围(FSR)的可调节量,可以利用这一特性实现大范围的波长调谐。图 2 所示为游标效应的原理,纵坐标表示功率,横坐标表示波长。图 2(a)、(b)为电流调谐前后 F-P

激光器的光谱,图 2(c)、(d)为不变的 F-P 标准具透过谱,图 2(e)、(f)为电流调谐前后因游标效应滤出的单纵模光谱图。F-P 激光器和 F-P 滤波器有不同的多纵模光谱,只有两个光谱中对准的波长为 λ_1 的纵模能够通过滤波器。将滤出的纵模注入 F-P 激光器, F-P 激光器单模运转,输出波长为 λ_1 的光。

此时快速调节 F-P 激光器的驱动电流,改变 F-P 激光器的多纵模光谱,使光谱发生小范围的平移,与 F-P 滤波器透过峰对准的波长发生改变, F-P 激光器自注入锁定的单纵模波长从 λ_1 跳变到 λ_2 。选择合适的 F-P 激光器和 F-P 标准具,即可实现波长大范围快速调谐。

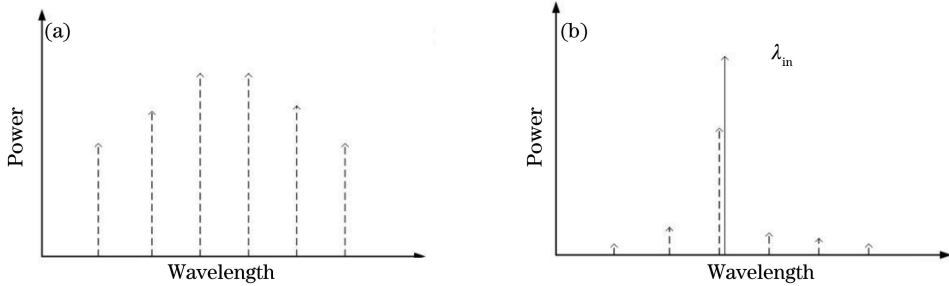


图 1 (a) F-P 激光器多纵模光谱; (b) F-P 激光器注入锁定

Fig. 1 (a) Spectrum of F-P laser; (b) injection locking of F-P laser

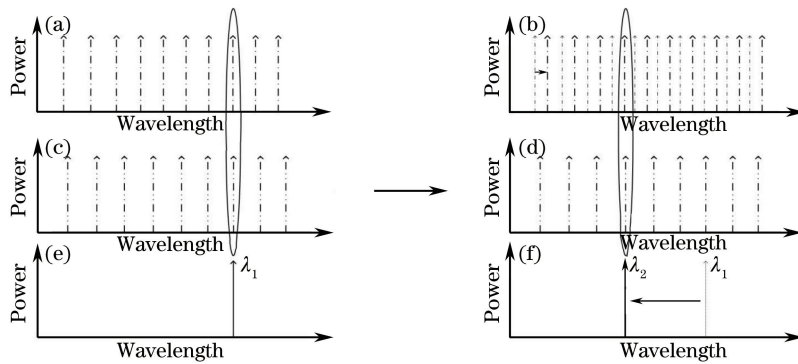


图 2 游标效应原理

Fig. 2 Vernier effect

由该波长可调谐激光器的原理可以看出,波长的调谐完全由 F-P 激光器驱动电流的调谐来决定,输出波长和驱动电流存在对应关系,波长调谐时间也由电流调谐时间决定,其复杂度远小于已有波长可调谐激光器方案。

3 实验结果与分析

3.1 波长可调谐激光器的静态特性

波长可调谐激光器实验装置如图 3 所示,由 F-P 激光器、F-P 标准具、环形器和耦合器组成。F-P 激光器和 F-P 标准具均加入温控元件,温度变化小

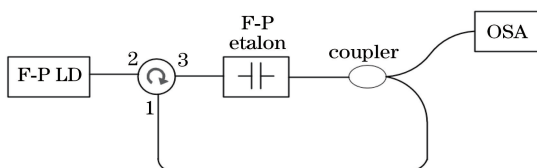


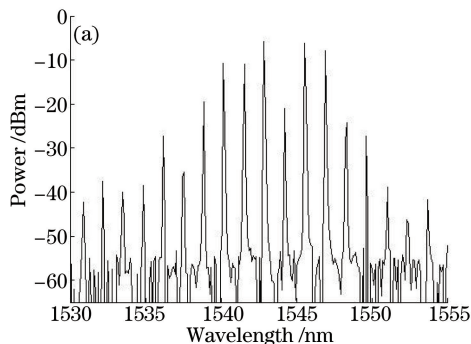
图 3 波长可调谐激光器实验装置

Fig. 3 Experimental setup of tunable laser

于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。环形器、F-P 标准具和耦合器形成光纤腔结构, F-P 标准具用于滤出单个波长模式, 环形器用于 F-P 激光器注入锁定以及保持腔内光信号单向运转, 耦合器将一部分光输出至光谱仪 (OSA), 另一部分经环形器实现自注入锁定。控制驱动电流, 改变 F-P 激光器的光谱, 即可改变输出光的波长模式。由于国际电信联盟标准中各波长间隔为 100 GHz , 选择透过谱间隔为 100 GHz 的 F-P 标准具作为光滤波器, 选择 168 GHz 纵模间隔的 F-P 激光器作为多纵模光源。图 4(a) 为驱动电流为 50 mA 时 F-P 激光器的多纵模光谱, 各纵模间隔约为 168 GHz , 阈值电流约为 10 mA 。图 4(b) 为最高纵模波长随激光器驱动电流的变化, 可以看出 F-P 激光器光谱随驱动电流的改变较为明显。

对波长可调谐激光器的静态特性进行测试, 控制激光器驱动电流在允许范围内由小到大变化。如图 5(a) 所示, 在 $10\sim 110\text{ mA}$ 电流范围内, 得到了

18组可用的输出波长(图中有8组重复的波长)。图5(b)为这18组单纵模波长光谱叠加在一起的结果,可通过不同的线型加以区分。图中从左到右各个单纵模波长分别为1535.20,1536.00,1536.80,1537.60,1538.36,1539.16,1539.92,1540.72,1541.52,1542.32,1543.12,1543.88,1544.68,



1545.48,1546.28,1547.08,1547.88,1548.68 nm。这18组输出波长的波长范围为1535.2~1548.68 nm,各波长之间的间隔约为100 GHz,各波长的功率差异小于15 dBm。各输出波长功率的差异可以通过饱和放大器进行削减,功率的调节可以通过加入半导体增益介质实现。

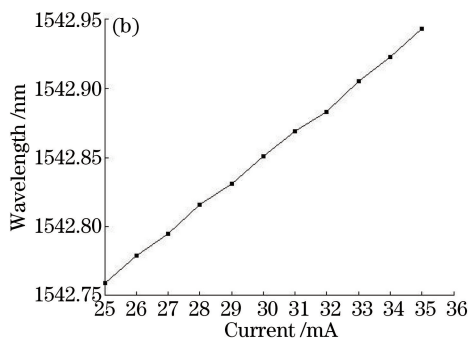


图4 (a) F-P激光器多纵模光谱;(b) F-P激光器最高纵模波长与驱动电流的关系

Fig. 4 (a) Spectrum of F-P laser; (b) relationship between the driving current and the wavelength of maximum longitudinal mode of F-P laser

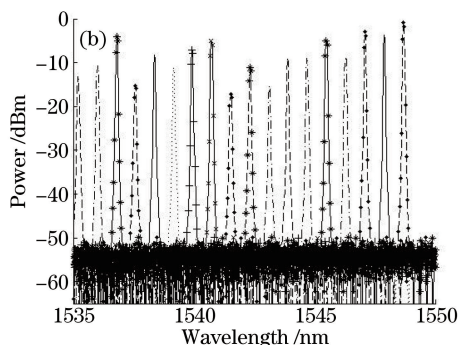
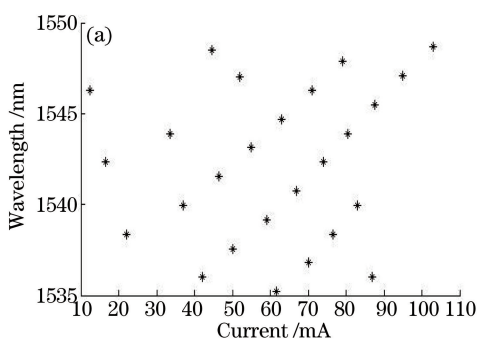


图5 (a)驱动电流与输出波长的关系;(b) 18组输出波长

Fig. 5 (a) Relationship between the driving current and the wavelength of tunable laser; (b) 18 wavelengths of tunable laser

如图6所示,选择其中一个典型的输出单纵模,即调节激光器驱动电流使之输出一个单纵模并保持不变,该输出光的波长为1544.68 nm,边模抑制比

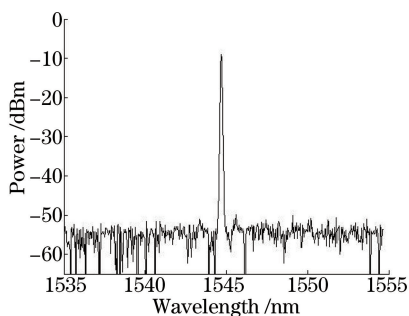


图6 输出波长为1544.68 nm时的光谱图

Fig. 6 Spectrum of tunable laser when wavelength is 1544.68 nm

大于40 dB,功率为-9.09 dBm,线宽约为0.2 nm。其他输出波长除输出功率以外,边模抑制比和线宽等参数与该典型波长的参数一致。该输出波长的频谱漂移较小,经过12 h长时间测试得频谱漂移为0.1 nm(光谱仪型号Anritsu ms9710c,分辨率0.05 nm),说明输出光能够长时间保持稳定,基本能够满足通信用光的需求。

3.2 波长可调谐激光器的动态特性

对波长可调谐激光器的调谐时间进行测试,测试装置如图7所示。调谐时间取决于F-P激光器的光谱改变时间,即驱动电流的跳变时间。微控制器(MCU)通过控制波长可调谐激光器驱动电流,周期性输出两个波长合适的光信号。其中,设计的驱动电路的驱动电流调谐时间约为20 ns。选择两个波

长分别为 1544.68 nm 和 1535.2 nm。微控制器控制激光器在这两个波长之间切换,切换周期控制在 10 ms。由于波长可调谐激光器各波长激光功率差异较小,若直接进行光电转换则电信号幅度变化过小,因此使用带宽为 0.26 nm 的窄带滤波器(NBF)将波长为 1535.2 nm 的光信号滤除。当输出波长为 1535.2 nm 时,光电探测器(PD)没有输出,当输出波长为 1544.68 nm 时,PD 可探测到电压,输出至示波器(OSC)显示。因此,通过观察电信号的上升沿和下降沿,即可测得两个波长相互切换的时间。

由示波器观测窄带滤波器滤波后的光信号波形,图 8(a)为波长切换过程中激光器波长

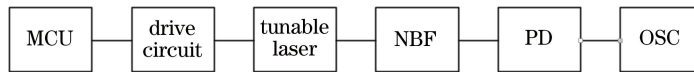


图 7 波长可调谐激光器切换时间测试框图

Fig. 7 Diagram of switching time test unit in tunable lasers

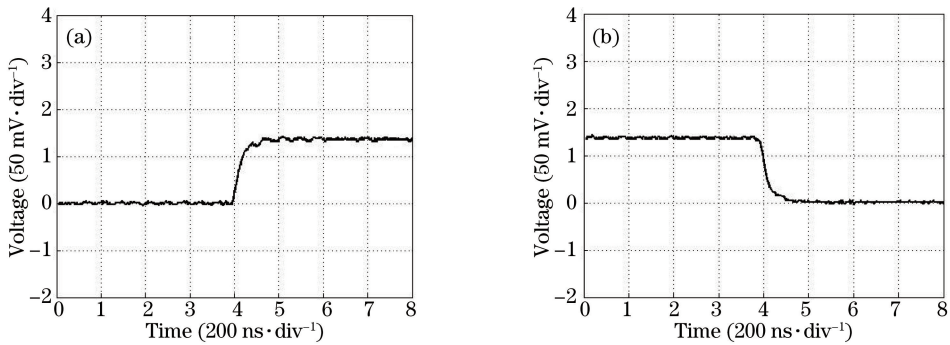


图 8 可调谐激光器在波长 1535.2 nm 与 1544.68 nm 切换时测得的(a)上升沿和(b)下降沿

Fig. 8 (a) Rising edge and (b) falling edge measured when tunable laser wavelength switches between 1535.2 nm and 1544.68 nm

4 结 论

提出了一种新型的基于 F-P 激光器自注入锁定的快速波长可调谐激光器,为波长可调谐激光器提供了新的思路。通过对激光器的静态测试,得到了 18 组可用波长,调谐范围达到了 15 nm,单个输出波长的边模抑制比达到了 40 dB,线宽约为 0.2 nm,各个输出波长间距达到了 100 GHz,可以满足通信用光的需求。对激光器的动态特性进行研究,得到该波长可调谐激光器的调谐时间在 100 ns 以下,远小于目前商用波长可调谐激光器的调谐时间。与其他可调谐激光器方案相比,该快速波长可调谐激光器仅需 F-P 激光器、F-P 标准具、环形器和耦合器就可以实现波长调谐,且实现了单一变量控制波长调谐,具有结构简单、成本较低的优点。未来进一步改善温控性能并增大激光器驱动电流的调谐

1544.68 nm 增大到 1535.2 nm 时光信号的上升沿图,上升沿约为 90 ns。图 8(b)为波长切换过程中激光器波长为 1535.2~1544.68 nm 时光信号的下降沿图,下降沿约为 80 ns。经过多次测量,不同波长切换时间在 60~100 ns 范围内,可以得到该波长可调谐激光器的调谐时间在 100 ns 以下。光信号上升沿与下降沿时间大于驱动电流调谐时间,两个波长切换过程中的上升沿和下降沿时间也不相同,这是因为改变 F-P 激光器驱动电流的同时,F-P 激光器的温度会有小幅的变化,导致功率存在一定起伏,经光电转换后表现为时间的不一致性,因此提高温控性能可以进一步缩短波长调谐时间。

时间,可以进一步提高波长调谐速度。

参 考 文 献

- [1] Takabayashi K, Takada K, Hashimoto N, *et al.* Widely (132 nm) wavelength tunable laser using a semiconductor optical amplifier and an acousto-optic tunable filter[J]. *Electron Letters*, 2004, 40(19): 1187-1188.
- [2] Wang S J, Liu J H, Li S C. Research development of tunable lasers for communication systems[J]. *Optical Devices Development and Application*, 2003, 27(4): 38-43.
王思劼, 刘俭辉, 李世忱. 国内外通信用可调谐激光器研究进展[J]. *光通信技术*, 2003, 27(4): 38-43.
- [3] Hawthorn C J, Weber K P, Scholten R E. Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam[J]. *Review of Scientific*

- Instruments, 2001, 72(12): 4477-4479.
- [4] Liu K, Littman M G. Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers[J]. Optics Letters, 1981, 6(3): 117-118.
- [5] Sprengel S, Andrejew A, Federer F, *et al.* Continuous wave vertical cavity surface emitting lasers at 2.5 μm with InP-based type-II quantum wells [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(15): 151102.
- [6] Koyama F, Nakahama M. Micromachined vertical cavity surface emitting lasers — athermalization, tuning, and multiwavelength integration [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(4): 1700310.
- [7] Fan Z, Wang S, Liu T G, *et al.* Research of optical fiber Fabry-Perot acoustic vibration sensing demodulation system based on dual tunable lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 042801.
樊茁, 王双, 刘铁根, 等. 基于双可调谐激光器的光纤法布里-珀罗声振动传感解调系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 042801.
- [8] Tang S, Lu J, Wang J, *et al.* Integrated buried heterostructure DFB laser array for WDM systems based on reconstruction equivalent chirp technique [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2015, 57(6): 1278-1281.
- [9] Feng Y, Jiang H W, Zhang L. Advances in high power Raman fiber laser technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201005.
冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201005.
- [10] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, *et al.* 1.5 μm fiber ethane gas Raman laser amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0514002.
陈育斌, 王泽锋, 顾博, 等. 1.5 μm 光纤乙烷气体拉曼激光放大器 [J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514002.
- [11] Rigole P J, Nilsson S, Backbom L, *et al.* Quasi-continuous tuning range from 1560 to 1520 nm in a GCSR laser with high power and low tuning currents [J]. Electronics Letters, 1996, 32(25): 2352-2354.
- [12] Sarlet G, Morthier G, Baets R. Control of widely tunable SSG-DBR lasers for dense wavelength division multiplexing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(8): 1128-1138.
- [13] Raring J W, Skogen E J, Johansson L A, *et al.* Widely tunable negative-chirp SG-DBR laser/EA-modulated transmitter [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 80-86.
- [14] Delorme F. Widely tunable 1.55 μm lasers for wavelength-division-multiplexed optical fiber communications [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(9): 1706-1716.
- [15] Zhao J, Shi K, Yu Y, *et al.* Theoretical analysis of tunable three-section slotted Fabry-Perot lasers based on time-domain traveling-wave model [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(5): 13499425.
- [16] Shi K, Smyth F, Reid D, *et al.* Characterization of a tunable three-section slotted Fabry-Perot laser for advanced modulation format optical transmission [J]. Optics Communications, 2011, 284(6): 1616-1621.
- [17] Liu K, Mu S X, Lu Y, *et al.* L-band wavelength-tunable MQW Fabry-Perot laser using a three-segment structure [J]. Photonics Technology Letters, 2013, 25(18): 1754-1757.
- [18] Wang S M, Shang J J, Cui K F. Laser frequency drift control based on refrigeration Fabry-Perot cavity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031401.
汪绍茂, 商俊娟, 崔凯枫. 基于制冷法布里-珀罗腔的激光频率漂移控制 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031401.
- [19] Gordon R. Fabry-Perot semiconductor laser injection locking [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42(4): 353-356.
- [20] Van Exter M P, Woerdman J P. Determination of alpha factor of Fabry-Perot-type semiconductor laser by injection locking [J]. Electronics Letters, 1992, 28(17): 1607-1608.