光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021083104

MG-Y 激光器波长温度特性研究

陈振华[1,2]，王永千[1,2]，张　旭[3]，任　帅[1,2]，祝连庆[1,2*]

（1. 北京信息科技大学 光电测试技术及仪器教育部重点实验室，北京 100192；
2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室，北京 100016；3. 天津大学，天津 300072）

摘　要： 为了探究调制光栅 Y 分支(MG-Y)激光器在光纤传感应用中的温度适应性，设计并搭建了波长稳定性为 0.6 pm 的测试系统，分别对 MG-Y 激光器内外不同温度下的波长特性进行分析，采用 25 ℃温度下 20 pm 间隔的查找表进行实验。结果表明当内部温度为 25 ℃、外界温度在－20～50 ℃范围内以 10 ℃步进时，92.30%的波长漂移量在±7 pm 内，内外温差±5 ℃范围内波长最大漂移量为 3 pm；当外界温度为 25 ℃、内部温度在 25～30 ℃范围内以 1 ℃步进时，波长调谐段切换处会出现跳模现象，调谐段内近似线性调谐，调谐系数区间为 85～115 pm/℃，证明 MG-Y 激光器的最佳温度应控制在内外温差±5 ℃范围内，为解决温度变化造成的波长漂移问题提供了参考。

关键词： MG-Y 激光器；温度特性；波长漂移；温度控制

中图分类号： TH744　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0818－05

Research on Temperature Characteristics of Wavelength of MG-Y Laser

CHEN Zhenhua[1,2], WANG Yongqian[1,2], ZHANG Xu[3], REN Shuai[1,2], ZHU Lianqing[1,2]

(1. Key Lab. of Photoelectric Testing Technology and Instrument of the Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, CHN; 2. Beijing Key Lab. of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, CHN; 3. Tianjin University, Tianjin 300072, CHN)

Abstract: In order to explore the temperature adaptability of modulated grating Y-branch (MG-Y) laser in optical fiber sensing application, a test system with wavelength stability of 0.6 pm was designed and built. The wavelength characteristics of MG-Y laser at different internal and external temperatures were explored respectively, and the experiments were carried out with a look-up table with an interval of 20 pm at 25 ℃. The results show that 92.30% of the wavelength drift is within ±7 pm when the internal temperature is 25 ℃ and the external temperature is in the range of －20～50 ℃ and steps by 10 ℃, and the maximum wavelength drift is 3 pm with the internal and external temperature difference of ±5 ℃. When the external temperature is 25 ℃ and the internal temperature is in the range of 25～30 ℃ and steps by 1 ℃, the mode hopping phenomenon will appear at the switching of the wavelength tuning section. The tuning coefficient range is 85～115 pm/℃. It is proved that the optimal temperature of MG-Y laser should be controlled within the range of internal and external temperature difference of ±5 ℃, which provides a reference for solving the problem of wavelength drift caused by temperature change.

Key words: modulated grating Y-branch laser; temperature characteristics; wavelength drift; temperature control

收稿日期：2021－08－31.
基金项目：国家自然科学基金重点项目(51535002,61903042)；高等学校学科创新引智计划项目(D17021).
* **通信作者：**祝连庆

0　引言

光纤光栅传感器具有抗电磁干扰性强、灵敏度高等特点[1]，能在复杂环境中对温度、应变等参数进行实时监测。为实现高精度测量，光纤传感系统对关键光器件即激光器的性能提出了更高要求[2-4]。调制光栅 Y 分支(MG-Y)激光器是一种利用特殊的 Y 状双光栅设计的新型可调谐激光器，具有高边模抑制比、宽可调谐范围、稳定输出功率、纳秒量级调谐速度的特点，其诸多优势使其在光纤传感领域获得了广泛应用[4]。

MG-Y 激光器由电流驱动，工作时会产生热量，工作温度的变化影响光功率、光波长，温度过高甚至会损坏激光器[5-6]，因此有必要对 MG-Y 激光器的波长温度特性进行研究。诸多学者已对激光器的温度特性进行了研究。辛倩倩等[7]基于激光器内部机理，推导出了激光器波长随温度变化的数值模型，但该模型仅针对中心波长为 808 nm 的 F-P 腔激光器进行了仿真，不具有普适性；何永勃等[8]建立了以速率方程为基础的激光器数学模型，并采用分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser，DFB)典型参数进行了仿真，但缺乏实验验证；张亚标等[9]解析了不同温度下激光器的弛豫振荡、频率啁啾等特性，但同样只进行了仿真分析。另外，目前针对激光器波长温度特性的研究多为对其他类型激光器的建模仿真分析，鲜有针对 MG-Y 激光器波长温度特性的研究。

基于上述分析，本文以 Finisar 公司 S7500 型 MG-Y 激光器为研究对象，设计并搭建激光器波长温度特性测试系统，在 MG-Y 激光器内部温度恒定、外界温度变化与外界温度恒定、内部温度变化两种情况下，分别对查找表进行扫描实验，并对 MG-Y 激光器的输出波长温度特性进行研究与分析。

1　MG-Y 激光器波长调谐特性

MG-Y 激光器结构如图 1 所示，左光栅反射区电流 I_{LR}、右光栅反射区电流 I_{RR}、相位区电流 I_{PH} 联合控制输出波长，增益区电流 I_{GN}、半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier，SOA)电流 I_{SOA} 共同控制输出功率[10-11]。通过改变调谐区驱动电流使载流子浓度发生变化，进而改变折射率，实现 MG-Y 激光器波长的调谐和控制。MG-Y 激光器频谱与 I_{LR} 和 I_{RR} 的对应关系如图 2 所示，每个对角线有许多形状相似的区域，可称为“通道”，将所有通道的波长范围连接起来，就可覆盖整个 C 波段范围[12-13]。

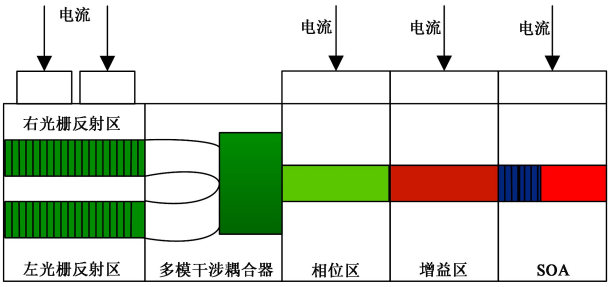


图 1　MG-Y 激光器结构示意图

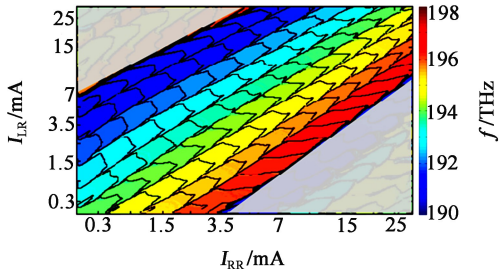


图 2　左、右反射区电流与频谱的对应关系

MG-Y 激光器为温度敏感器件，当电流驱动激光器调谐波长时，会产生波长漂移现象，如图 3 所示。驱动电流变大，输出波长因“载流子效应”发生蓝移。随后由于 MG-Y 激光器芯片内部产生热量而降低了折射率，导致输出波长发生红移[14]。

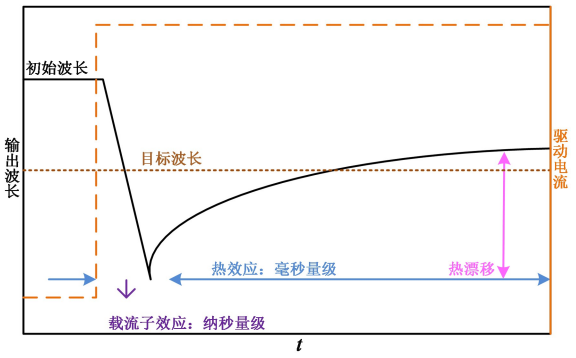


图 3　波长漂移示意图

2　MG-Y 激光器温度特性测试系统

为更好地研究 MG-Y 激光器的温度特性，设计并搭建了 MG-Y 激光器温度特性测试系统。测试系统如图 4 所示，由计算机(PC)、MG-Y 激光器、激光器驱动控制系统、波长计等四部分组成。系统所选用的波长计为 YOKOGAWA 公司的 AQ6151，波长分辨率为 0.1 pm，波长精度为 0.3 pm。测试时通过 PC 机 LabVIEW 平台向 MG-Y 激光器驱动控制

系统下发控制参数，驱动激光器输出，利用波长计实时采集波长信息并将结果发送给 PC 机存储。

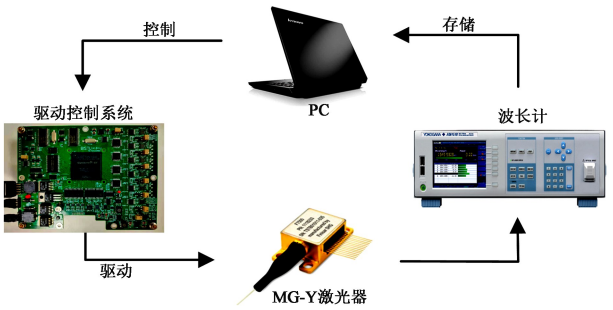


图 4 测试系统构成

其中，MG-Y 激光器驱动控制系统中 I_{LR}，I_{RR}，I_{PH} 的输入范围分别为 0～33 mA，0～33 mA，0～7.5 mA，采用 14 bit 分辨率电流型芯片；I_{GN}，I_{SOA} 的输入范围分别为 0～100 mA，0～167 mA，采用 14 bit 分辨率电压型芯片实现压控恒流。温度控制 PID 电路设计如图 5 所示，选择通用的Ⅱ型补偿网络[15]，经数学推导后得其传递函数 $G(S)$ 为

$$G(S)=\frac{1+R_2C_2S}{R_1((C_1+C_2)S+R_2C_1C_2S^2)} \quad (1)$$

根据传递函数的零点与极点特性，最终得到 $R_1=49.9\ \text{k}\Omega$，$R_2=240\ \text{k}\Omega$，$C_1=22\ \text{nF}$，$C_2=10\ \mu\text{F}$。

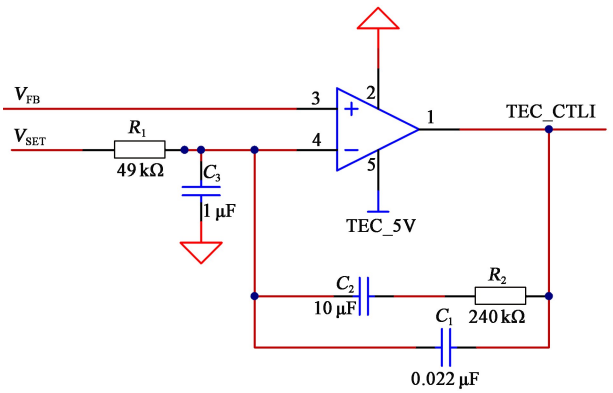


图 5 温度控制 PID 电路

3 实验结果与分析

为研究温度对 MG-Y 激光器波长的影响规律，进行了 MG-Y 激光器波长温度特性测试系统性能实验和 MG-Y 激光器内、外界温度变化对波长影响实验。首先对温度特性测试系统的稳定性进行测试实验，以检验所搭建测试系统的性能；其次对 MG-Y 激光器的波长温度特性进行测试实验，以得出不同温度变化对波长漂移的影响规律。

3.1 测试系统稳定性实验

为了验证 MG-Y 激光器波长温度特性测试系统能够用于温度对波长影响实验，在 1 525～1 570 nm 波长范围内以 4 nm 间隔选取 10 个波长点，MG-Y 激光器内及外界温度均设置为 25 ℃，对测试系统进行稳定性测试，连续测试 2.5 h。结果表明，2.5 h 内 MG-Y 激光器波长漂移量在 0.6 pm 以内，如图 6 所示。计算 2.5 h 内采集的波长标准差，10 个波长点中标准差最大为 0.19 pm，如表 1 所示。证明了 MG-Y 激光器特性测试系统稳定性好，可用于后续实验。

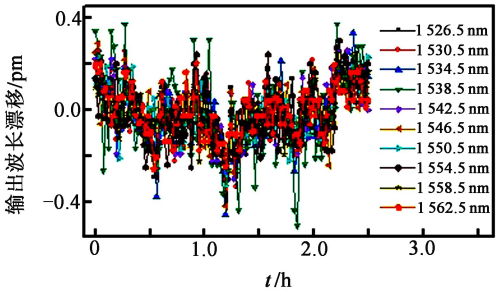


图 6 测试系统稳定性

表 1 2.5 h 内的波长标准差

波长/nm	标准差/pm	波长/nm	标准差/pm
1 526.5	0.12	1 546.5	0.13
1 530.5	0.13	1 550.5	0.12
1 534.5	0.14	1 554.5	0.14
1 538.5	0.19	1 558.5	0.11
1 542.5	0.13	1 562.5	0.11

3.2 外界温度对 MG-Y 激光器波长影响实验

为研究外界温度变化对 MG-Y 激光器波长的影响，将 MG-Y 激光器放置在恒温箱中，设置恒温箱温度在－20～50 ℃，步长为 10 ℃，按照查找表进行扫描。查找表是在 MG-Y 激光器内外温度均设置为 25 ℃ 条件下，在 1 525～1 570 nm 内，生成的以 20 pm 间隔波长的 2 001 个电流组合。结果表明，有多个波长点发生跳模现象，如图7所示，可能

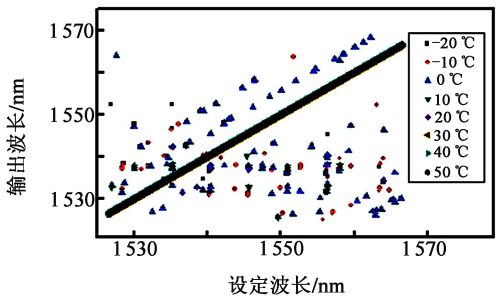
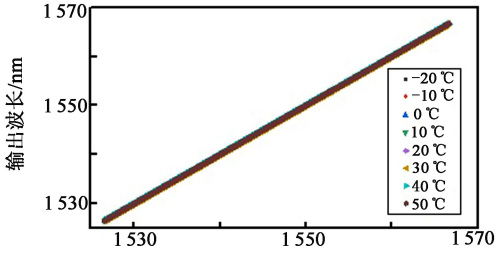


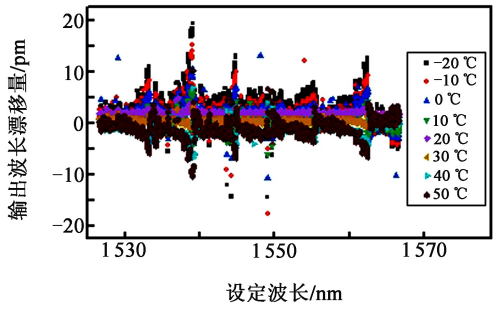
图 7 不同外界温度下波长扫描曲线

原因是当 MG-Y 激光器内外存在较大温差时，内部温度发生变化，导致扫描查找表时波长发生漂移。

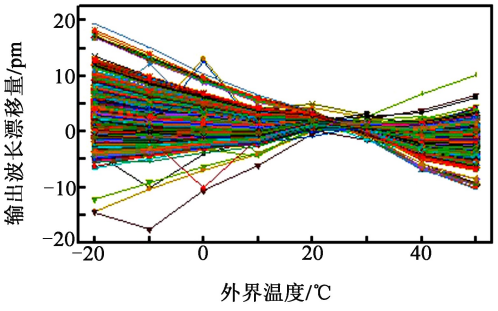
为消除 MG-Y 激光器内部温度影响，扫描开始前在固定单一波长输出的情况下调整温度控制参数，使内部温度维持在 25 ℃后，在不同外界温度下对查找表进行扫描。单一波长驱动参数为：I_{LR}，I_{RR}，I_{PH}，I_{GN}，I_{SOA} 分别为 21.255，11.869，6.546，80.000，80.000 mA。结果表明，不同外界温度下 MG-Y激光器波长线性度较好，查找表中波长漂移



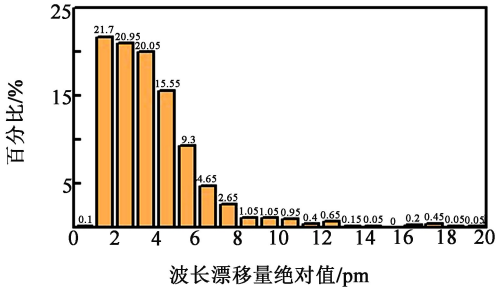
（a）　扫描曲线



（b）　波长漂移量分布图



（c）　波长漂移随外界温度变化图

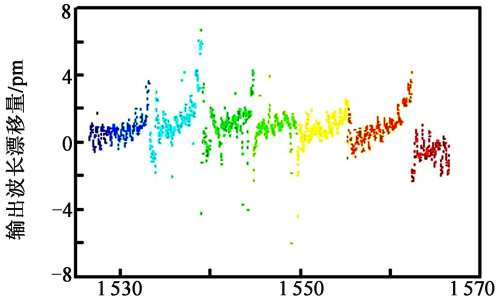


（d）　2001 个波长点漂移百分比

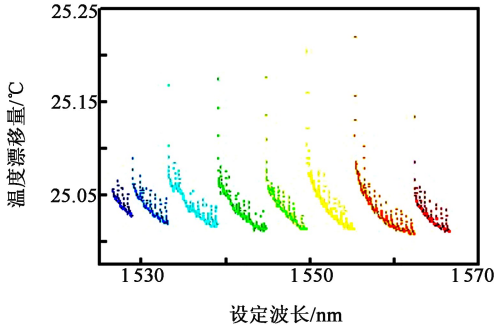
图 8　外界温度变化对波长的影响

为±7 pm 区间的占比为 92.30%，内外温差在±5 ℃范围内波长漂移量为±3 pm，如图 8 所示。证明了 MG-Y 激光器在进行查找表扫描前调整内部温度的必要性，使 MG-Y 激光器内部温度与对应查找表的工作温度一致，温度控制方案的 MG-Y 激光器内外温差需控制在±5 ℃内。

为进一步分析波长漂移量的分布规律，以 MG-Y 激光器处在 10 ℃外界环境下的输出波长漂移为例进行分析。结果如图 9 所示，不同颜色代表不同通道，漂移量较大的波长点主要分布在通道连接处，波长漂移较大时 MG-Y 激光器的内部温度波动大于 0.1 ℃。进一步分析可知，扫描查找表时采取输出波长从小到大的策略，导致通道之间相互切换时 MG-Y 激光器驱动电流波动较大，内部温度发生较大波动，波长漂移现象明显。如若按照不同通道间电流大小顺序扫描，难以保证 MG-Y 激光器应用的光纤传感系统实时解调的需求。目前常用的波长校准方法采用 F-P 标准具作为光鉴频器，调节相位区电流实现输出波长的检测和校准[16]，但这种方法同样面临无法实时解调的问题。



（a）　不同通道波长漂移量



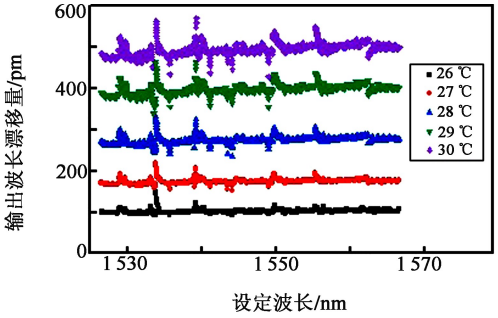
（b）　MG-Y 激光器内部温度漂移量

图 9　10 ℃外界环境下波长漂移结果分析

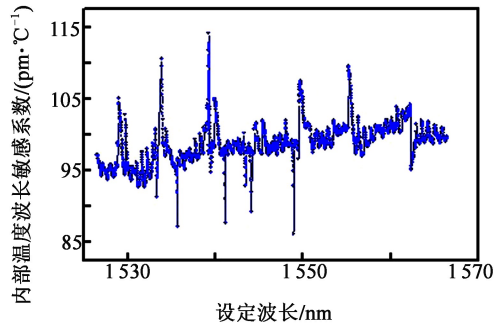
3.3　MG-Y 激光器内部温度对波长影响实验

当 MG-Y 激光器温度控制功率不足时，内部温度会发生变化，导致扫描特定工作温度下的查找表

时波长发生漂移、跳模现象。为研究 MG-Y 激光器内部温度对波长的影响，将 MG-Y 激光器放置在恒温箱中，设置恒温箱温度为 25 ℃保持恒定，设置 MG-Y 激光器内部温度在 25～30 ℃，步进间隔为 1 ℃，按照工作温度为 25 ℃的查找表进行扫描。去除发生跳模的波长点，结果表明波长漂移较大的波长点主要分布在通道切换处，如图 10(a)所示；在 1 525～1 570 nm 内，MG-Y 激光器的内部温度每升高 1 ℃，输出波长也近似线性增长，波长变化范围区间为 85～115 pm，如图 10(b)所示。证明了利用 MG-Y 激光器温度特性，实现不同工作温度下查找表校准的可行性。



(a) 内部温度变化波长漂移图



(b) 内部温度波长敏感系数曲线

图 10 内部温度变化对波长的影响

4 结论

为了研究温度变化对 MG-Y 激光器波长的影响，搭建了温度特性测试系统，分别在 MG-Y 激光器内部温度恒定、外界温度变化与外界温度恒定、内部温度变化两种情况下，对按照波长大小顺序排列、波长范围为 1 525～1 570 nm、工作温度范围为 25 ℃的查找表进行了扫描实验。结果表明 MG-Y 激光器内部或外界温度变化后，输出波长均会发生漂移、跳模现象，漂移的波长点相同且均位于通道切换处；MG-Y 激光器内外温差较大时，波长漂移量增大，漂移波长点增多；查找表工作温度为 25 ℃时，MG-Y 激光器的最佳温度控制范围为 20～30 ℃；MG-Y 激光器内部温度升高，波长呈近似线性增长。所得规律为基于 MG-Y 激光器的光纤传感系统实现高速实时、高精度解调提供了思路。

参考文献：

[1] 彭泳卿，陈青松，戴保平. 现代航天传感器技术发展趋势分析[J]. 计测技术，2019，39(4)：64-72.
Peng Y Q，Chen Q S，Dai B P. Analysis of development trend of modern aerospace sensor technology[J]. Metrology & Measurement Technol.，2019，39(4)：64-72.

[2] 张鑫鹏，刘 佳，贺 庆，等. MG-Y 型可调谐激光器驱动电路设计[J]. 工具技术，2018，52(7)：122-126.
Zhang X P，Liu J，He Q，et al. Drive circuit design of MG-Y type tunable laser[J]. Tool Technol.，2018，52(7)：122-126.

[3] 吕 辉，余永林，黄德修，等. 可调谐半导体激光器的动态波长切换控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2011，39(7)：67-70.
Lü H，Yu Y L，Huang D X，et al. Dynamic wavelength switching control of tunable semiconductor lasers[J]. J. of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition)，2011，39(7)：67-70.

[4] 郑胜亨，杨远洪. 调制光栅 Y 分支可调谐激光器高精准波长调谐特性[J]. 中国激光，2019，46(2)：9-16.
Zheng Sh H，Yang Y H. High precision and accuracy wavelength tuning characteristics of modulated grating Y-branch tunable lasers[J]. Chinese J. of Lasers，2019，46(2)：9-16.

[5] 付建国. 一种可调谐激光器控制系统的研究与实现[D]. 上海：上海交通大学，2019.
Fu J G. Study and implementation of one kind of control system for tunable laser[D]. Shanghai：Shanghai Jiaotong University，2019.

[6] 周根弟. 高稳定度激光光源温度控制算法研究和实现[D]. 北京：北京邮电大学，2019.
Zhou G D. Research and application of temperature control system for high stability laser source[D]. Beijing：Beijing University of Posts and Telecommunications，2019.

[7] 辛倩倩，万 熠，毕文波，等. 半导体激光器波长温度特性的建模与试验研究[J]. 工具技术，2017，51(12)：132-134.
Xin Q Q，Wan Y，Bi W B，et al. Study on modeling and experiment of wavelength temperature characteristic for semiconductor laser[J]. Tool Technol.，2017，51(12)：132-134.

[8] 何永勃，杨 伟，范广永，等. 基于速率方程的半导体激光器温度特性研究[J]. 应用激光，2019，39(5)：880-885.
He Y B，Yang W，Fan G Y，et al. Temperature characteristics of semiconductor lasers based on rate equation[J]. Appl. Laser，2019，39(5)：880-885.

(下转第 838 页)

参考文献：

[1] Dahiya R S, Metta G, Valle M, et al. Tactile sensing-from humans to humanoids[J]. IEEE Trans. on Robotics, 2010, 26(1): 1-20.

[2] 陈宝成，覃 双，张 旭，等. 基于PVDF的高压电性薄膜制备工艺研究[J]. 传感器与微系统，2019，38(10)：33-35，43.
Chen Baocheng, Qin Shuang, Zhang Xu, et al. Study on preparation process of high-voltage electrothinfilm based on PVDF[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(10): 33-35, 43.

[3] Kolesar E S, Dyson C S. Object imaging with a piezoelectric robotic tactile sensor [J]. J. of Microelectromechanical Systems, 1995, 4(2): 87-96.

[4] 唐火红，栾 铸. 基于PVDF压电传感器的采摘机械手研究[J]. 压电与声光，2019，41(3)：387-391.
Tang Huohong, Luan Zhu. Research on picking manipulator based on PVDF piezoelectric sensor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(3): 387-391.

[5] Wei Zou, Werner Karl Schomburg. PVDF sensor foils employed to measure shear stress and temperature of friction welding [J]. Sensors, 2020, 20(16): 45-65.

[6] 许煜寰. 铁电与压电材料[M]. 北京：科学出版社，1978：65-68.
Xu Yuhuan. Ferroelectric and Piezoelectric Materials [M]. Beijing: Science Press, 1978: 65-68.

[7] Wang T T, Herbert J M, Glass A M. The Applications of Ferroelectric Polymers[M]. Glasgow: Blackie and Son, 1988: 44-70.

[8] Zhao Jingjing, You Zheng, Jian Linni. Models for 31-mode PVDF energy harvester for wearable applications [J]. The Scientific World J., 2014: 893496.

[9] 张 庭. 仿人型假手指尖三维力触觉传感器及动态抓取研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014：10-11.
Zhang Ting. Research on 3D force-tactile sensor and dynamic grasping of humanoid prosthetic fingertip[D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2014: 10-11.

作者简介：

陈 婷(1996—)，女，硕士，研究方向为PVDF压力传感器；

袁严辉(1974—)，男，副教授，研究方向为微机电系统(MEMS)以及智能材料。

(上接第822页)

[9] 张亚标，肖永川，王 超，等. 一种带温度参量的半导体激光器速率方程及仿真求解[J]. 半导体光电，2020，41(1)：50-53，58.
Zhang Y B, Xiao Y C, Wang C, et al. Semiconductor laser rate-equation with temperature parameter and emulation solving [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 50-53, 58.

[10] 林 屹. 可调谐半导体激光器波长检测与控制的研究[D]. 武汉：华中科技大学，2015.
Lin Y. Study on wavelength monitoring and control of monolithic tunable semiconductor lasers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

[11] 刘 强，荆振国，李 昂，等. 调制光栅Y分支激光器准连续调谐特性[J]. 中国激光，2020，47(12)：263-271.
Liu Q, Jing Zh G, Li A, et al. Quasi-continuous tuning characteristics of modulated grating Y-branch lasers [J]. Chinese J. of Lasers, 2020, 47(12): 263-271.

[12] Finisar Application Note AN-2095 Controlling The S7500 CW Tunable Laser[Z]. 2011.

[13] 刘 佳，祝连庆，何 薇，等. 基于MG-Y型可调谐半导体光源的光纤光栅解调系统研究[J]. 仪器仪表学报，2020，41(3)：87-96.
Liu J, Zhu L Q, He W, et al. Research on optical interrogation system based on MG-Y tunable diode laser[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 87-96.

[14] Yoo S, Lee J K, Kim K. Suppression of thermal wavelength drift in widely tunable DS-DBR laser for fast channel-to-channel switching[J]. Opt. Express, 2017, 25(24): 30406-30417.

[15] Mattingly D. Designing stable compensation networks for single phase voltage mode buck regulators [H]. Intersil Technical Brief, 2003: 1-10.

[16] Heininger H. Longitudinal cavity mode referenced spline tuning for widely tunable MG-Y branch semiconductor laser [J]. Radioengineering, 2014, 23(1): 496-503.

作者简介：

陈振华(1993—)，男，河北省邯郸市人，硕士研究生，主要从事光纤传感技术方面的研究；

祝连庆(1963—)，男，浙江省兰溪市人，博士，教授，博士生导师，主要从事光纤传感技术和光学测量方面的研究。