

doi:10.3788/gzxb20184701.0125002

# 温度对 InP 激光器波长蓝移影响的分析

薛正群<sup>1,2</sup>, 王凌华<sup>1</sup>, 苏辉<sup>1</sup>

(1 中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**对 AlGaInAs 多量子阱 FP TO-56 半导体激光器在不同环境温度、相同发热量下测量出光波长的变化来分析器件波长温度变化系数;并对器件在室温、不同发热功率下的出光波长变化进行测量,分析计算得到器件热阻为 183K/W.接着对器件进行不同高温应力试验,结果显示:环境温度从 120℃ 增加至 220℃ 时,器件峰值波长发生缓慢蓝移;当环境温度达到 225℃ 时,器件波长发生明显蓝移,从试验前 1 297 nm 蓝移至 1 265 nm;温度继续增加至 235℃,波长蓝移至 1 258 nm,同时光谱模式间隔从试验前 0.92 nm 降低至 0.84nm,即模式有效折射率从 3.66 增加至 3.77;温度继续增加至 240℃,器件失效无光.其主要原因可能为:高温应力下,激光器外延材料中波导层、量子阱量子垒中的 Al、Ga、In 金属元素往有源区方向迁移使得量子阱有效禁带宽度以及有源区波导折射率增大.该试验结果为进一步分析器件高温下器件的失效机理以及改善器件高温性能提供试验基础.

**关键词:** AlGaInAs 多量子阱激光器;高温失效;热阻;波长蓝移;发散角

**中图分类号:** TN248.4; O433.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2018)01-0125002-6

## Analysis the Influence of Temperature on the Wavelength Blue Shift of InP Laser

XUE Zheng-qun<sup>1,2</sup>, WANG Ling-hua<sup>1</sup>, SU Hui<sup>1</sup>

(1 Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The wavelength/temperature coefficient of AlGaInAs MQWs FP laser devices are measured by analyzing the wavelength changed with ambient temperature at the same heating power. Also, the wavelength of device changed with heating power under RT are measured, and the thermal resistance of device is calculated to be 183K/W. Then, the temperature stress storage experiment are carried out on the device, the results showed: a slowly increased of wavelength happened as the ambient temperature increased from 120℃ to 220℃; and, a obviously blue shifted of wavelength happened while the temperature arrived at 225℃, the wavelength of device shifted to 1 265 nm from 1 297 nm before experiment; as the temperature reached to 235℃, the wavelength of device shifted to 1 258 nm, and the mode spacing decreased from 0.92 nm before experiment to 0.84 nm, that the effective refractive index of optical mode increased from 3.66 to 3.77; finally, the device became failure as the temperature arrived at 240℃. The possible reasons were mainly due to the Al, Ga and In atoms in the waveguide, quantum well and barrier layers of epi-wafer migration and the composition of these layers changing under the high temperature stress. The results will more provide the foundation for failure mechanism analysis and performances improvement of device under high temperature.

**Key words:** AlGaInAs MQWs laser; High temperature failure; Thermal resistance; Wavelength blue shift; Divergence angle

**OCIS Codes:** 250.5960; 140.6810; 070.4790

**基金项目:**国家自然科学基金(No.61405198)和国家高技术研究发展计划(No.2013AA014202)资助

**第一作者:**薛正群(1984—),男,博士研究生,主要研究方向为 InP 激光器及其可靠性.Email: xzhengq77@163.com

**通讯作者:**苏辉(1971—),男,研究员,博士,主要研究方向为 InP 激光器及其应用化.Email: huisu@fjrisem.ac.cn

**收稿日期:**2017-07-12; **录用日期:**2017-09-04

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

## 0 引言

光通信中半导体激光器的可靠性是激光器在应用阶段的关键问题,虽然半导体激光器技术经过了多年的累积和发展,然而不同生产厂家器件制备工艺有所不同,即便同一厂家不同批次可靠性也有所差异;此外,在使用过程中的静电因素、环境温湿度等也是引起器件容易失效的一个重要原因.相关的研究报道表明:半导体激光器在使用过程中发生的电流或电压过载<sup>[1-3]</sup>、电浪涌、热过载<sup>[4-5]</sup>等因素是导致激光器失效的重要因素;其中电过载、电浪涌使得激光器内部累积大量的热量引起器件内部有源区发生不可逆的退化并导致器件失效,这两种因素作用在器件上总体表现的结果为器件温度过载.因此,分析激光器在高温应力下性能参数的变化对于进一步分析高温下激光器的失效机理以及改善激光器的高温性能具有重要作用.

本文对 AlGaInAs 多量子阱 FP 激光器的热阻进行分析和测量;对激光器进行高温应力试验,并分析高温下器件性能参数的变化情况;结合试验结果分析器件在实际使用过程中应避免大电流或温度的过载以免其发生不可逆的退化和失效.

## 1 试验

在 InP 衬底上,通过 MOCVD 沿生长方向依次生长 N-InP 缓冲层、AlGaInAs 下波导层、AlGaInAs 多量子阱有源层、AlGaInAs 上波导层、InGaAsP 腐蚀停止层、InP 空间层、InGaAsP 过渡层、P+-InGaAs 欧姆接触层,形成激光外延结构.对外延结构片进行脊型腐蚀、脊型开孔、P 面金属、N 型减薄、N 面金属、合金、解离、腔面镀膜等工艺形成 RWG-FP 激光器芯片,其芯片结构如图 1 所示;器件腔长为  $250\mu\text{m}$ ,室温和  $I_{\text{th}}+20\text{mA}$  电流下器件波长约为  $1295\text{nm}$ .对同一批次芯片进行 TO 器件封装,对器件进行 48 小时快速老化,剔除早期失效样品;对合格样品进行热阻测试和高温应力试验.

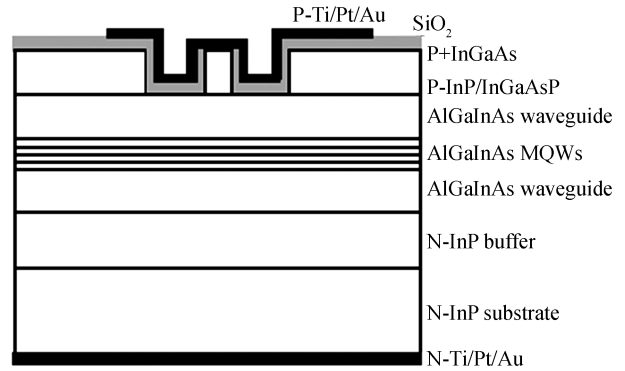


图 1 芯片结构示意图

Fig.1 Diagram of the structure of laser chip

## 2 试验结果和分析

### 2.1 半导体激光器热阻的测量

热阻为激光器热流路径上产生单位热量而引起的温度差,这里温度差为激光器的结区到参考点之间的温度差值,热阻反应了激光器的导热能力;通常对激光器的热阻测量采用 T3Ster 瞬态热阻测试仪进行器件热阻的测量,在实际过程中采用如下相对简便和有效的方法进行器件的热阻测量.半导体激光器的热阻  $R_{\text{th}}$  可以表示为<sup>[6-8]</sup>

$$R_{\text{th}} = (T_{\text{J}} - T_{\text{X}}) / P_{\text{them}} \quad (1)$$

式中  $T_{\text{J}}$  为激光器结区温度,  $T_{\text{X}}$  为指定参考点温度,这里为环境温度.假设在室温下,激光器在两个不同的发热功率  $P_{\text{them1}}$  和  $P_{\text{them2}}$  下,芯片结温分别为  $T_{\text{J1}}$  和  $T_{\text{J2}}$ ,器件发光峰值波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,则有

$$R_{\text{th}} \cdot P_{\text{them1}} = T_{\text{J1}} - T_{\text{X}} \quad (2)$$

$$R_{\text{th}} \cdot P_{\text{them2}} = T_{\text{J2}} - T_{\text{X}} \quad (3)$$

则式(2)、(3)相减得到

$$R_{\text{th}} = \frac{T_{\text{J1}} - T_{\text{J2}}}{P_{\text{them1}} - P_{\text{them2}}} = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2) / \alpha}{P_{\text{them1}} - P_{\text{them2}}} \quad (4)$$

式中  $\alpha$  为激光器的温度波长系数.因此,要计算器件的热阻则要测量得到器件的温度波长变化系数,以及波长对器件发热功率变化系数.

激光器的发热功率  $P_{\text{them}}$  可以表示为

$$P_{\text{them}} = I_f V_f - P_0 \quad (5)$$

式中  $I_f$  和  $V_f$  分别为激光器的正向工作电流和工作电压,  $I_f \times V_f$  代表了激光器工作时注入的电功率,  $P_0$  为激光器的输出光功率. 对激光器在 25℃、50℃、75℃ 环境温度下进行 LIV 测量, 如图 2(a) 所示; 并分析在不同环境温度下器件发热的变化, 选取在相同发热功率点下, 进行激光器输出光谱的测量. 在相同的发热功率下, 器件结区与环境的温度差一致; 则在不同环境温度以及相同发热功率下测量器件光谱, 可以计算器件的波长温度变化系数. 图 2(b) 和 (c) 为三个不同环境温度、50 mW 发热功率下器件光谱的变化, 从测量结果可得器件的温度波长变化系数为 0.577 nm/℃.

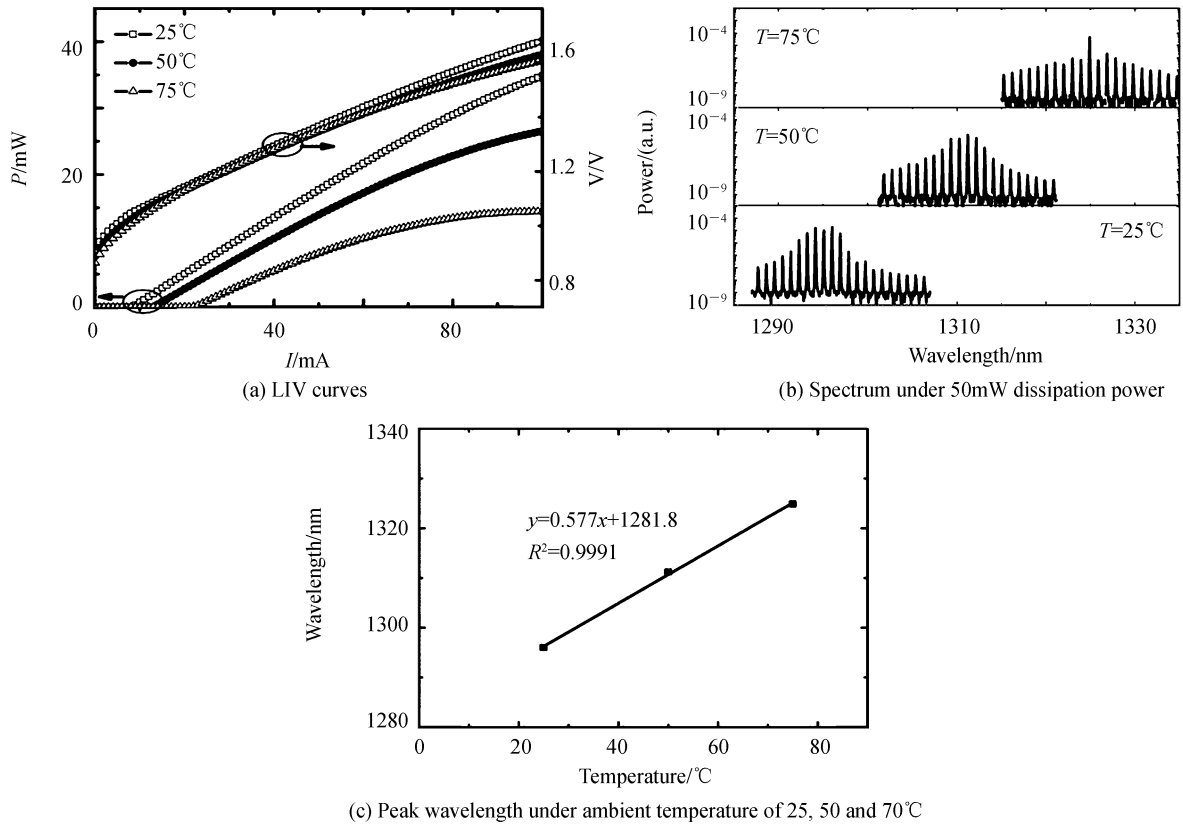


图 2 25、50、75℃ 环境温度下器件 LIV 曲线和 50 mW 发热功率下器件出光波长变化

Fig.2 LIV curves and the spectrum at 50mW dissipation power of device under ambient temperature of 25, 50 and 70℃

在室温环境温度下, 对器件在不同发热功率下进行输出光谱的测量, 如图 3 所示, 从测量结果可得, 器件的波长随发热功率的变化系数为 106nm/W. 则根据式(4)可得器件的热阻为 183K/W.

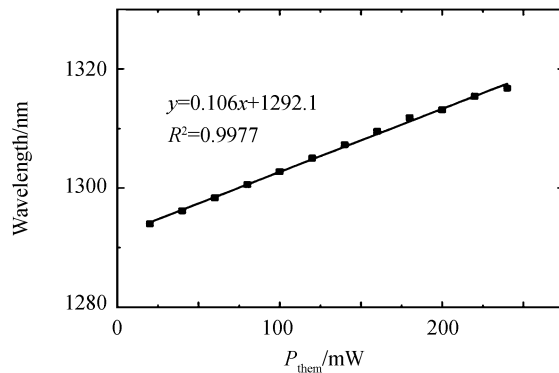


图 3 室温下, 不同发热功率下激光器的发光峰值波长

Fig.3 The peak wavelength of device under different heating power at RT

## 2.2 高温应力下激光器参数变化的分析

对 TO 激光器样品进行高温应力试验, 环境温度从 120℃ 开始, 每隔 5 或 10℃ 为一个步进, 每次时间长

度为 5 min.图 4 为不同高温应力作用后,激光器输出光谱的变化情况.从图中可以看出在环境温度为 120~220℃下器件的光谱发生缓慢蓝移;在温度为 225℃下,器件波长发生明显的蓝移,从试验前的 1 297 nm 蓝移至 1 265 nm.在温度达到 235℃时,器件波长为 1 258 nm,随着温度继续增加器件发生失效,整个试验过程器件波长的蓝移达到了 39 nm.目前还没有关于 AlGaInAs FP 激光器在高温下衰退并发生不可逆蓝移的相关研究报道;通常激光器在阈值以下随电流的增加,由于能带填充效应而发生蓝移<sup>[9]</sup>,此属于激光器的正常现象;另外有研究集中在量子阱生长采用不同温度进行退火,发生量子阱混在,引起波长的蓝移<sup>[10-12]</sup>.

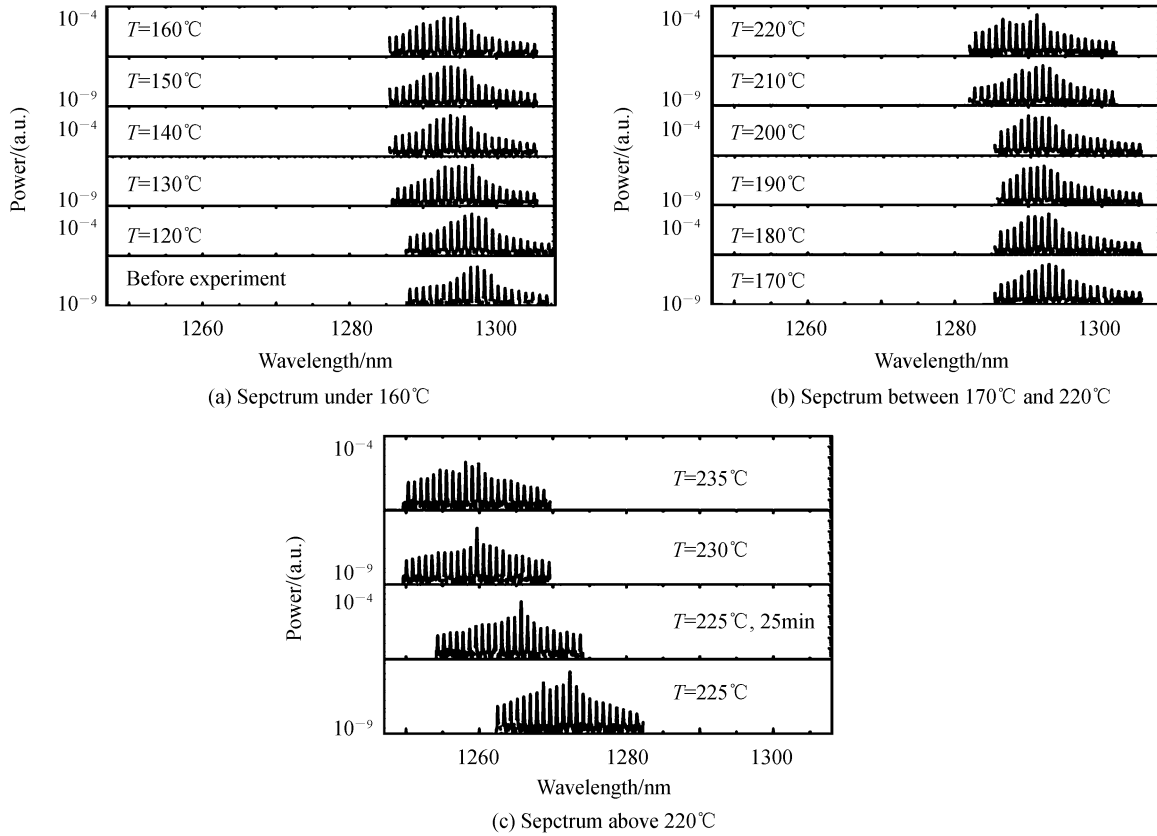


图 4 不同温度下激光器波长蓝移情况  
Fig.4 Blue shifted of wavelength under different ambient temperature

图 5 为室温下,器件在不同通电电压下其波长蓝移的情况,从测试结果可知:电压在 2.3V 以上时器件波长发生缓慢蓝移;当通电电压至 2.6V 时,器件波长发生较为明显蓝移,波长从试验前的 1 297 nm 蓝移至 1 272 nm 左右;电压继续增加器件失效.说明有源区高温的累积是引起器件波长蓝移的关键因素.半导体四元材料  $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$  禁带宽度近似满足 Vegard 定律<sup>[13,14]</sup>,可表示为

$$E_g(Al_xGa_yIn_{1-x-y}As) = xE_g(AlAs) + yE_g(GaAs) + (1-x-y)E_g(InAs) \quad (6)$$

通常 AlAs、GaAs、InAs 三种材料其禁带宽度有关系式:  $E_g(AlAs) > E_g(GaAs) > E_g(InAs)$ , 从式(6)可知,激光器输出波长蓝移,其量子阱材料的禁带宽度增大.高温应力导致的波长蓝移很可能与高温下,Al、Ga 等元素原子从含量高的波导层、量子垒迁移至含量相对低的量子阱区域,导致量子阱的有效禁带宽度增大.

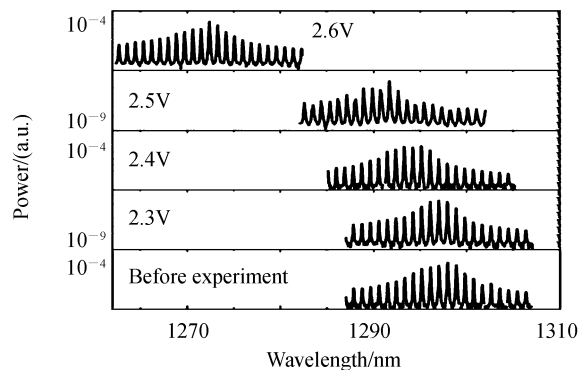


图 5 室温下不同通电电压下激光器波长蓝移情况  
Fig.5 Blue shift of wavelength under different voltage at room temperature

表 1 试验前和 235℃ 高温后器件光谱的对比  
Table 1 Spectrum of device before experiment and after 235℃ storage

Temperature	Peak wavelength/nm	Mode-spacing/nm	$n_{\text{eff}}$
Before experiment	1 297.4	0.92	3.66
235℃	1258.12	0.84	3.77

表 1 为试验前与经过 235℃ 高温后器件光谱变化的对比.FP 半导体激光器的模式间隔可近似表示为<sup>[15]</sup>

$$\Delta\lambda \approx (\lambda_m^2) / 2n_{\text{eff}}L \quad (7)$$

式中  $\lambda_m$  为峰值波长,  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率,  $L$  为芯片腔长, 这里芯片腔长为 250  $\mu\text{m}$ . 从表中可以看出高温的作用使得波长蓝移的同时, 器件的模式间隔变小, 同时其有效折射率从试验前的 3.66 增加至 3.77.

四元材料系 AlGaInAs 中 AlAs, GaAs, InAs 材料的折射率有关系式:  $n(\text{AlAs}) < n(\text{GaAs}) < n(\text{InAs})$ . 说明高温应力的作用使得 In, Ga 元素原子往有源区中心方向迁移导致光场模式的有效折射率提高.

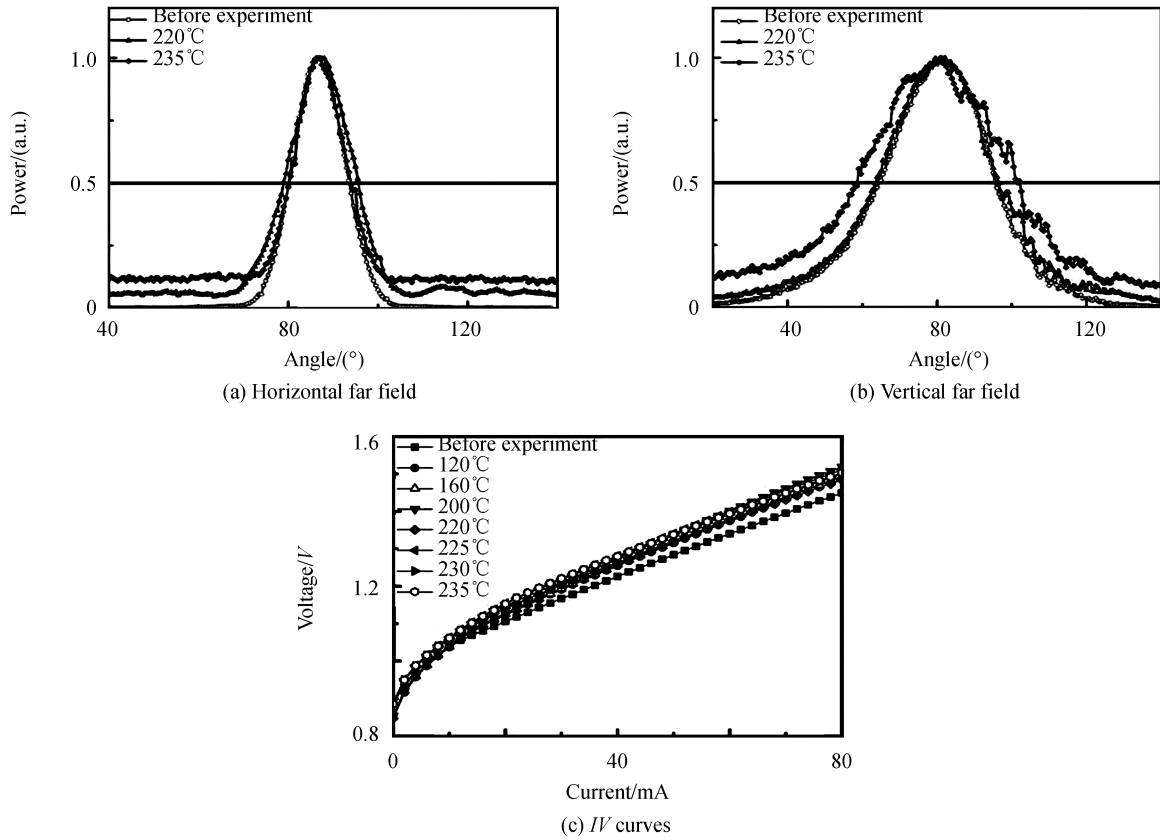


图 6 试验前后不同温度下器件远场和 IV 曲线变化

Fig.6 The far field and IV curves of devices before and after different temperature stress

图 6(a) 和 (b) 为不同温度下激光器的远场发散角变化情况. 测试结果显示: 波长蓝移时器件垂直发散角增大, 当环境温度达 235℃ 时, 其垂直发散角 (FWHM) 从试验前的 31° 增加至 43°; 而水平方向发散角无明显变化. 对于半导体激光器其束腰半径 (可近似为与激光器端面光斑的半径)  $\omega_0$  为

$$\omega_0 = (M^2) / \pi\lambda\theta \quad (8)$$

式中  $M^2$  为激光光束质量因子,  $\lambda$  为发光波长,  $\theta$  为发散角. 发散角的增大对应了激光器束腰半径的减小, 也对应了光波导折射率的增大, 这与表 1 的结果一致. 综合来看, 高温应力使有源区和靠近有源区区域 Al, Ga, In 元素原子发生迁移, 使得波导、量子阱、量子垒层材料的组分发生变化. 图 6(c) 为不同温度应力作用后, 器件的 IV 曲线变化. 半导体激光器正向电压  $V$  和注入电流  $I$  有如下关系

$$V = V_j + I \times R_s \quad (9)$$

式中  $V_j = h\nu/q$  为结电压,  $h\nu$  为光子能量,  $q$  为电子电量,  $R_s = R_c + R_b$  为器件的串联电阻, 它包含电极接触电阻  $R_c$  和外延材料的体电阻  $R_b$ . 从图中可以看出高温的作用使得器件在相同的注入电流下, 工作电压增大, 其主要应该有两方面的因素: 波长的蓝移使得结电压增大; 高温的作用使得器件退化, 材料缺陷增加电阻增大.



## 4 结论

对 AlGaInAs 多量子阱 RWG-FP 半导体激光器进行热阻的测量和分析, 得到试验器件的热阻为 183 K/W。对激光器在不同高温环境应力试验, 试验结果表明: 在高温应力作用下, 激光器材料内部的波导层、量子阱、量子垒中的 Al、Ga、In 元素原子发生迁移, 使得材料的组分发生变化; 并使器件的波长发生不可逆的蓝移、光场模式有效折射率增加、器件工作电压增大, 高温的过程伴随着器件性能的衰退。这些结果表明在实际应用过程中, 当激光器的温度累积超过 200℃ 时或者存在超过 400 mA 左右的电浪涌, 即便在较短的时间内也会对器件造成不可逆的损坏作用。该试验结果对进一步分析器件在高温下的失效机理以及改善器件的高温性能提供试验基础。

### 参考文献

- [1] ZHANG Quan-de, LIU Feng-qi, ZHANG Wei, *et al.* Thermal induced facet destructive feature of quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(14): 141117.
- [2] UEDAO. On degradation studies of III-V compound semiconductor optical devices[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, **49**(9R): 090001-1-09000-8.
- [3] TAKESHITA T, SATO T, MITSUHARA M, *et al.* Degradation analysis of InP buried heterostructure layers in lasers using optical-beam-induced-current technique[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2010, **10**(1): 142-148.
- [4] TAKESHITA T, SATO T, MITSUHARA M, *et al.* Long-term degradation behavior of 2.3  $\mu\text{m}$  wavelength highly strained InAs/InP MQW-DFBLasers with a p-/n-InP buried heterostructure[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, **59**(4): 1056-1062.
- [5] QIAO Y B, FENG S W, XIONG C, *et al.* Spatial hole burning degradation of AlGaAs/GaAs laser diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(10): 103506.
- [6] HOU Li-feng, ZHONG Gang, ZHAO Ying-jie, *et al.* High-power VCSEL with Radial bridge electrodes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 1-5.  
侯立峰, 钟刚, 赵英杰, 等. 径向桥电极高功率垂直腔面发射激光器[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 1-5.
- [7] MA Xiang-zhu, ZHANG Si-yu, ZHAO Bo, *et al.* Thermal Characteristic of VCSEL with AlN Film Passivation Layer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2114-2117.  
马祥柱, 张斯钰, 赵博, 等. 基于 AlN 膜结构 VCSEL 热特性的研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(12): 2114-2117.
- [8] 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.
- [9] FUKUDA M, MISHIMA T, NAKAYAMA N, *et al.* Temperature and current coefficients of lasing wavelength in tunable diode laser spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2010, **100**(2): 377-382.
- [10] LEE K H, ROYCROFT B, CALLAGHAN J O, *et al.* Integration of AlInGaAs-MQW fabry-pérot lasers with emission at two wavelength ranges via quantum-well intermixing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(1): 27-29.
- [11] HOU L P, HAJI M, DYLEWICZ R, *et al.* 10-GHz mode-locked extended cavity laser integrated with surface-etched DBR fabricated by quantum-well intermixing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(2): 82-84.
- [12] BEAL R, AIMEZ V, DUBOWSKI J. Excimer laser induced quantum well intermixing; a reproducibility study of the process for fabrication of photonic integrated devices[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(2): 1073-1080.
- [13] GRASSE C, BOEHM G, MUELLERM, *et al.* Empirical modeling of the refractive index for (AlGaIn)As lattice matched to InP[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2010, **25**: 1-4.
- [14] AISSAT A, ELBEY M, BESTAM R, *et al.* Modeling and simulation of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>In<sub>1-y</sub>As/InP quaternary structure for photovoltaic[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(27): 15287-15291.
- [15] HUNGER D, STEINMETZ T, COLOMBE Y, *et al.* A fiber Fabry-Perot cavity with high finesse[J]. *New Journal of Physics*, 2010, **12**: 1-23.