文章编号：1000-7032(2012)06-0647-04

1.06 μm InGaAs/InGaAsP 量子阱半导体激光器的温度特性

李再金*，芦 鹏，李 特，曲 轶，薄报学，刘国军，马晓辉
（长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室，吉林 长春 130022）

摘要： 研究了 1.06 μm InGaAs/InGaAsP 量子阱半导体激光器厘米 bar 模块的温度特性，测试分析了该模块的输出光功率、阈值电流、转换效率和光谱随注入电流及管芯温度变化的特性。结果表明，器件在 15 ~ 55 ℃ 范围内所测的输出光功率由 40.7 W 降低到 29.4 W，阈值电流由 9.29 A 升高到 17.24 A，转换效率由 54.22% 降低到 37.55%，光谱漂移为 0.37 nm/℃，特征温度为 68.6 K。实验结果表明，为保持器件性能的稳定，在实际应用过程中应该使器件的温度控制在 15 ~ 25 ℃ 范围内。

关 键 词： 半导体激光器；1.06 μm；阈值电流；温度特性
中图分类号： TN248.4 **文献标识码：** A **DOI：** 10.3788/fgxb20123306.0647

Temperature Characteristic of 1.06 μm InGaAs/InGaAsP Quantum Well Laser Diode

LI Zai-jin*, LU Peng, LI Te, QU Yi, BO Bao-xue, LIU Guo-jun, MA Xiao-hui
(*National Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding Author, E-mail: lizaijin@126.com*

Abstract: The temperature characteristic of 1.06 μm InGaAs/InGaAsP quantum well laser diode was studied. The output optical power, threshold current, conversion efficiency and spectra of the module were measured and analyzed when the module was operated with different current at different temperature. The results show that the module's characteristic changes with the temperature in the range of 15 ℃ to 55 ℃. The module's CW output optical power reduced from 40.7 W to 29.4 W. The threshold current increased from 9.29 A to 17.24 A. The conversion efficiency reduced from 54.22% to 37.55%. The lasing wavelength shift is 0.37 nm/℃ and the characteristic temperature is 68.6 K. The temperature of the device in the actual application process should be controlled in the range of 15 ℃ to 25 ℃ to maintain the stability of the device performance.

Key words: semiconductor laser; 1.06 μm; threshold current; temperature characteristic

1 引 言

激射波长为 1.06 μm 的 Nd: YAG 激光器在焊接、打孔、切割、打标、划片、医学等领域有着广泛的应用。与 Nd: YAG 激光器相比，半导体激光器有许多优点，如体积小、重量轻、效率高、寿命长、可直接调制、易于集成等[1-3]。这些优点使得 1.06 μm 半导体激光器直接代替 Nd: YAG 激光器

收稿日期： 2012-03-23；**修订日期：** 2012-04-06
基金项目： 国家自然科学基金(61107054)；吉林省科技发展计划(201201124)资助项目
作者简介： 李再金(1980 -)，男，吉林榆树人，博士，主要从事大功率半导体激光器技术的研究。

成为可能,特别是在短距离测距和瞄准系统等对体积、结构要求严格的军事领域,1.06 μm 半导体激光器更是具有无可比拟的优势和广阔的应用前景。国外对 1.06 μm 半导体激光器的研究已经比较成熟。2010 年,A. Pietrzak 等采用多量子阱超大光腔结构使单管器件连续输出功率达到 30 W,列阵器件连续功率超过了 100 W[4]。

对于不同波长半导体激光器的温度特性已经有了一些研究。2001 年,Ma Chunsheng 等研究了 1.55 μm InGaAs/InGaAsP 压应变多量子阱半导体激光器的温度特性[5];2002 年,Yi Qian 等研究了 14*xx*-nm AlGaInAs/InP 半导体激光器的温度特性[6],Nelson 等研究了 1.17 μm InGaAs-GaAsP-GaAs 量子阱激光器的温度特性[7];2006 年,Shigeru Kanazawa 等研究了 1.2 μm 高温工作的 GaInAs/GaAs 量子阱激光器的温度特性[8];2007 年,K. Shinoda 等报道了激光波长为 1.3 μm 的 InGaAlAs/InGaAsP 半导体激光器的热特性[9]。然而,对 1.06 μm InGaAs/InGaAsP 半导体激光器的温度特性的研究尚未见诸报道。

本文从应用的角度出发,研究了 1.06 μm InGaAs/InGaAsP半导体激光器厘米 bar 模块的输出光功率、阈值电流、转换效率和光谱随注入电流及管芯温度的变化特性。半导体激光器在工作时会产生一定的热量,特别是对高功率的器件,热特性问题就更为突出。在实际应用高功率半导体激光器模块的系统中,必须准确掌握半导体激光器基本参数随温度变化的规律,了解其性能特点,以便根据系统的实际需要设置半导体激光器的工作点,调试系统达到最佳性能。测试结果表明:温度变化会引起阈值电流、斜率效率、最大输出功率和光谱的变化,器件工作时温度应该控制在 15 ~ 25 ℃范围内才能保持器件性能稳定。

2 半导体激光器芯片材料结构

半导体激光器的激射波长主要由材料组分、量子阱宽度、应变量等因素决定。本激光器材料采用 InGaAs/InGaAsP 材料体系。为了扩展 InGaAs应变量子阱的激射波长大于 1 μm,必须增加其中的 In 组分。In 组分增加会使 InGaAs 应变量子阱应变增大,不利于器件的稳定工作。为了使器件稳定工作,我们在量子阱旁引入了应变补偿层[10]。采用低压金属有机化学气相沉积在 Si 掺杂 GaAs(100)衬底上生长,生长温度为 685 ℃,在 7 nm 的 2.1% 压应变 InGaAs 量子阱有源层和 50 nm 的 InGaAsP 波导层之间生长 10 nm 的 0.7% 张应变 GaAsP 势垒层,来补偿 InGaAsP 波导层和 1nGaAs 量子阱层之间的应变,生长出高质量晶体。图 1 为采用应变补偿的 InGaAs/InGaAsP单量子阱分别限制激光器材料结构图,上下限制层分别为 p-$In_{0.49}Ga_{0.51}P$ 和 n-$In_{0.45}Ga_{0.55}As_{0.05}P_{0.95}$。

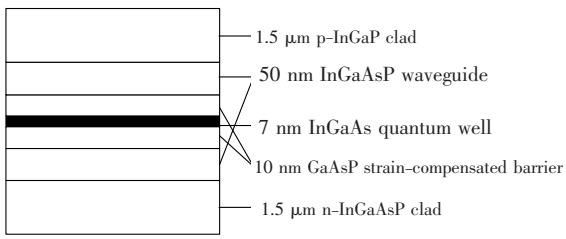

图 1 InGaAs/InGaAsP 单量子阱分别限制激光器材料结构图

Fig. 1 InGaAs / InGaAsP single quantum well separate confinement laser material structure

3 器件结构

半导体激光器器件有单管、列阵(厘米 bar)和叠阵(多 bar 堆叠)几种结构,这里采用厘米 bar 结构。半导体激光器厘米 bar 一般由数十个发光单元组成,为了提高器件的各项工作性能指标,每个发光单元制作周期为 500 μm,发光区宽度为 100 μm。首先利用磁控溅射的方法在外延片表面沉积一层 SiO_2,然后利用标准的光刻技术和湿法化学腐蚀技术在激光器发光单元条之间形成隔离区以限制光场横向振荡,同时以 SiO_2 为绝缘层制备出电极条形出光窗口。在外延片的 P 面沉积 TiPtAu 欧姆接触层形成 P 面电极。从衬底 N 面减薄到 150 μm 左右后抛光,在 N 面沉积 AuGeNi 欧姆接触层,优化合金条件,降低串联电阻,形成 N 面电极。之后,在腔面蒸镀增透膜,以减小腔面的光吸收。最后将外延片解理成厘米 bar,用焊料将厘米 bar 在氮气保护下 P 面朝下烧结在无氧铜热沉上,做好电极焊接后即完成器件的制作。

4 结果与讨论

图 2 是半导体激光器在 15 ~ 55 ℃范围内所测试的 *P-I* 和 *V-I* 特性曲线。从图 2 中可以看出,随着温度的升高,在相同的电流下激光器输出功

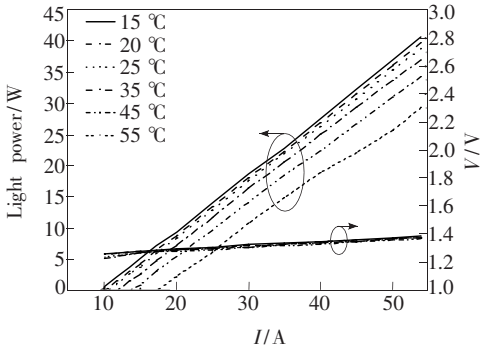

图 2　15 ~ 55 ℃范围内器件的 *P-I* 和 *V-I* 特性曲线

Fig. 2　The device *P-I* and *V-I* characteristic curves in 15 ~ 55 ℃ temperature range

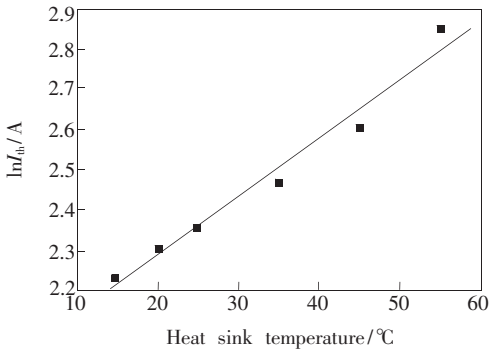

图 3　器件的阈值电流随温度变化的特性曲线

Fig. 3　The device threshold current as a function of different temperature

率下降，在该范围内最大输出功率由 40.7 W 降低到 29.4 W。这是因为半导体激光器在阈值以上的输出功率定义为：

$$P_0 = \eta_d \frac{A_m}{A_i + A_m}(I - I_{th}) \frac{\hbar\omega_e}{q}, \qquad (1)$$

式中 η_d 为激光量子效率，A_i 是谐振腔内部的光波损耗，A_m 是谐振腔端面的光波损耗，I_{th} 为阈值电流，$\hbar$ 为约化普朗克常数，ω_e 为激光的角频率，q 为电量。随着温度的升高，半导体激光器的 A_i 及载流子的泄漏增大，致使 P_0 减小。从图 2 中还可看出，I_{th} 随温度的升高而增大，I_{th} 增大，阈值电流密度也增大，致使增益减小。这是因为随温度的升高，注入的载流子能量分布展宽，造成透明载流子浓度增加所引起的。同时，为了达到激射阈值，必须增加载流子密度，载流子密度增加会增大内部损耗，增益和内部损耗的变化以及载流子的泄漏等因素导致激光器的阈值电流随温度改变。温度对输出功率的影响比对阈值电流的影响更显著，输出功率的降低导致斜率效率随温度升高而降低。当温度从 15 ℃升高到 55 ℃时，实验测得器件的斜率效率由 0.904 W/A 降到 0.796 W/A。实验还测得阈值电流 $\ln I_{th}$ 随温度 T 的变化曲线，如图 3 所示。由

$$I_{th} = I_0 \exp(T/T_0), \qquad (2)$$

可知该曲线的斜率的倒数即为器件的特征温度，实验测得的温度特征值 T_0 为 68.6 K。

图 4 是器件在 15 ~ 55 ℃温度范围内测得的转换效率随温度变化的特性曲线。从图 4 可以看出，随着温度的升高，在相同的电流驱动下激光器转换效率下降。当电流达到一定值时，转换效率达到饱和值。有些器件的转换效率可能有所下降。

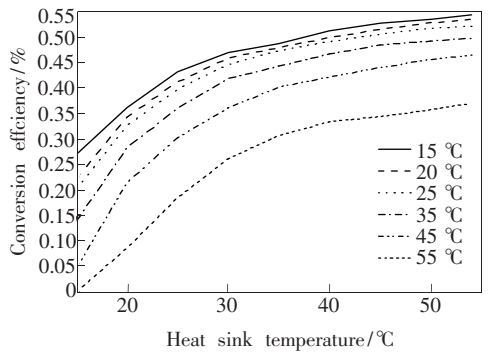

图 4　器件在 15 ~ 55 ℃范围内转换效率随温度变化的特性曲线

Fig. 4　The device conversion efficiency changes in 15 ~ 55 ℃ temperature range

半导体激光器的最大功率转换效率可以由下式表示：

$$\eta_{p,max} = \eta_{ext} \frac{V_F}{V_0}(1 - 2\sqrt{R_s I_{th}/V_0}), \qquad (3)$$

式中 η_{ext} 为输出的斜率效率，V_F、V_0 为内建电场，R_s 为串联电阻，I_{th} 为阈值电流。从式(3)可以看

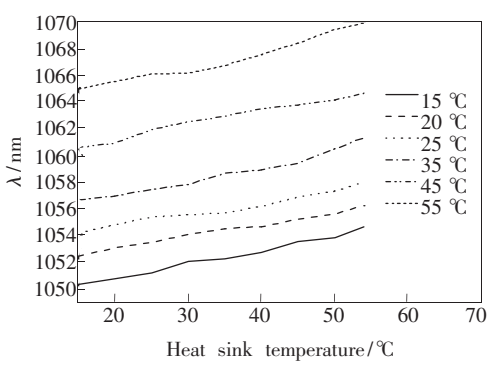

图 5　器件在 15 ~ 55 ℃范围内激射波长随温度变化的特性曲线

Fig. 5　The lasing wavelength changes in 15 ~ 55 ℃ temperature range

出,为了提高功率转换效率,应当增加输出斜率效率 η_{ext},减小串联电阻 R_s、阈值电流 I_{th} 以及内建电场 V_0。从激光器结构设计考虑,量子阱层引入应变可以降低阈值电流;提高温度稳定性可以在较高工作结温下保证高的斜率效率;优化掺杂形貌可以减小串联电阻和内建电场;优化光限制因子可以减少自由载流子吸收,从而减小阈值电流和提高斜率效率。图5是器件在15~55 ℃温度范围内激射波长随温度的变化关系,从图5中可清楚地看到激射波长随温度升高向长波方向漂移,光谱漂移为0.37 nm/℃。

5 结 论

研究了1.06 μm半导体激光器厘米bar模块输出光功率、光谱和转换效率随注入电流及管芯温度的变化特性。在15~55 ℃范围内,器件的输出光功率由40.7 W降低到29.4 W,阈值电流由9.29 A升高到17.24 A,转换效率由54.22%降低到37.55%,光谱漂移为0.37 nm/℃,特征温度为68.6 K。在实际应用过程中应该使器件的温度控制在15~25 ℃范围内,以保持器件性能稳定。

参 考 文 献:

[1] Zhu Hongbo, Liu Yun, Hao Mingming, *et al.* High efficiency module of fiber coupled diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(11):1147-1151 (in Chinese).

[2] Gu Yuanyuan, Feng Guangzhi, Deng Xinli, *et al.* 808 nm and 980 nm high power laser diode stack with wavelength coupling [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学 精密工程), 2009, 17(1):8-13 (in Chinese).

[3] Feng Guangzhi, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, *et al.* 808 nm high power diode lase stack with polarization coupling [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, 29(4):695-700 (in Chinese).

[4] Pietrzak A, Crump P, Wenzel H, *et al.* High power 1 060 nm ridge waveguide lasers with low-index quantum barriers for narrow divergence angle [C]//Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2010, San Jose, USA: OSA, 2010:CWE2.

[5] Ma Chunsheng, Guo Wenbin, Liu Shiyong. High temperature characteristics of 1.55 pm InGaAs/InGaAsP strain-compensated multiple quantum well lasers [J]. *SPIE*, 2001, 4602:173-177.

[6] Qian Y, Hohl-AbiChedid A, Li J. High-performance AlGaInAs/InP 14*xx*-nm semiconductor pump lasers for optical amplifications [J]. *SPIE*, 2002, 4905:37-46.

[7] Tansu N, Mawst L J. Analysis temperature of characteristics of highly-strained InGaAs-GaAsP-GaAs ($\lambda > 1.17$ μm) quantum well lasers [J]. *SPIE*, 2002, 4646:302-312.

[8] Kanazawa S, Takeda K, Miyamoto T, *et al.* High temperature operation of 1.2 μm single-transverse-mode highly strained GaInAs/GaAs QW laser [J]. *SPIE*, 2006, 6352:63520L-1-6.

[9] Shinoda K, Makino S, Kitatani T, *et al.* Highly reliable operation of InGaAlAs/InGaAsP integrated lasers [C]// 2007 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Matsue, Japan: IEEE, 2007:39-42.

[10] Hayakawa T, Akinaga F, Kuniyasu T, *et al.* Highly reliable and high power operation of 1.05 μm InGaAs/GaAsP strained compensated single quantum well laser diodes for pumping Tm-doped fiber amplifier [C]//Optical Fiber Conf., 2002, Anaheim, CA, USA: IEEE, 2002:479-481.