

文章编号: 1000-7032(2018)03-0343-06

半导体激光器巴条封装应力及评价

张哲铭, 薄报学, 张晓磊, 顾华欣, 刘力宁, 徐雨萌, 乔忠良, 高 欣*

(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: 为了快捷而有效地检测半导体激光器的封装应力,设计了一种通过检测激光器巴条各个单元偏振度揭示出其封装应力分布的实验方法。实验测试半导体激光器巴条的各项参数,并利用有限元软件模拟,通过半导体能带与应力理论,说明偏振度与封装应力的影响关系。实验表明,巴条个别发光单元的偏振度较低、阈值电流较高是由于封装应力较大。通过计算,封装应力为 141.92 MPa,偏振等效应力最大为 26.73 MPa。实验器件在阈值以下的偏振度较好地反映了封装应力的分布趋势。利用阈值电流以下测量器件偏振度,可以为选择热沉及焊料材料、焊接工艺参数的改进等方面提供一个较为快捷而有效的检测方法。

关键词: 巴条; 偏振度; 封装应力; 偏振等效应力

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183903.0343

Evaluation of Packaging Induced Stress of Semiconductor Laser Bar

ZHANG Zhe-ming, BO Bao-xue, ZHANG Xiao-lei,

GU Hua-xin, LIU Li-ning, XU Yu-meng, QIAO Zhong-liang, GAO Xin*

(State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: gaixin@cust.edu.cn

Abstract: In order to detect the packaging induced stress of semiconductor lasers quickly and effectively, an experimental device which can reveal the encapsulation stress by detecting the polarization degree of each unit of laser bar was designed. The parameters of the semiconductor laser bar were experimentally tested and the finite element software was used to simulate the relationship between the degree of polarization and the packaging induced stress through the theory of the semiconductor energy band and stress. The experiment results show that the individual light-emitting unit of the bar is less polarized, the higher threshold current is due to the larger packaging stress. Through the calculation, the packing stress is 141.92 MPa, and the polarization equivalent stress is 26.73 MPa. The degree of polarization of the device below the threshold reflects the distribution trend of the packaging induced stress, and the degree of polarization of the device can be measured by using the following threshold current. It can provide a quicker and more efficient method for selecting the heat sink and the solder material and the improvement of the welding process parameters.

Key words: laser bar; polarization; packaging induced stress; polarization equivalent stress

收稿日期: 2017-07-05; 修订日期: 2017-08-19

基金项目: 国家重点研发计划(SQ2017YFGX020046); 国家自然科学基金(61176048,61177019,61308051); 吉林省科技发展计划(20150203007GX,20160203017GX,20170101047JC,20170203014GX)资助项目
Supported by National Key Research and Development Program of China(SQ2017YFGX020046); National Natural Science Foundation of China(61176048,61177019,61308051); Jilin Province Science and Technology Development Plan(2050503007GX,20160203017GX,20170101047JC,20170203014GX)

1 引 言

随着大功率半导体激光器的芯片加工与封装技术的快速发展,其应用范围也日趋广泛,进而对大功率半导体激光器的可靠性要求日渐提高。在高功率半导体激光器(HPLD)的封装过程中,减小封装应力有利于保证 HPLD 设计的优良工作参数,减小由于封装引入有源区的应变及晶格缺陷,从而延长激光器的使用寿命^[1-4]。

近年来,国内外学者发表了大量研究应力与半导体激光器器件性能的文献,其中最有代表性的是德国的 TOMM 领导的课题组提出了诸如微区拉曼光谱、微区光致发光、电致发光光谱法等众多方法^[5-8],其检测原理是通过测量微米或纳米级别有源区材料的带隙变化或晶格变化,计算出由于封装引入有源区的应力大小。其优点是可以探测出芯片每一个发光单元甚至各个点的应力变化,分辨率最高可达纳米级别。但由于其要求实验设备较为昂贵,测量方法较为繁琐,且着重于理论研究,对大批量实际商业应用涉及较少。

本文利用应力与半导体能带的关系,设计了一种快速有效的检测半导体激光器巴条封装应力的实验装置。通过理论推导封装应力对半导体激光器波长、偏振的影响,并测量巴条各个单元偏振度、阈值电流的变化趋势,较为详细地解释了实验数据。实验证明,利用偏振法测量半导体激光器的封装应力是一种快捷而有效的试验方法。

2 应变理论与分析

应力会改变半导体材料的能带结构与带隙宽度。在张应力的情况下,半导体能带中导带下移,价带上移,造成其禁带宽度变窄从而激射波长红移;在压应力的情况下,造成带隙宽度变宽,激射波长蓝移。在半导体材料的带隙宽度随应力改变的同时,价带底部也会发生微小变化。如图 1 所示,C(Conduction band)为导带,HH(Heavy hole)、LH(Light hole)和 SO(Spin-orbit split band)分别为重空穴带、轻空穴带和自旋-轨道分裂带。在压应变或无应力状态下,重空穴带(HH)在上,轻空穴带(LH)在下,由此被激发时,TE 模占主导。封装过后张应力将导致 LH 上升,由此造成 TE 模减小 TM 模增大。

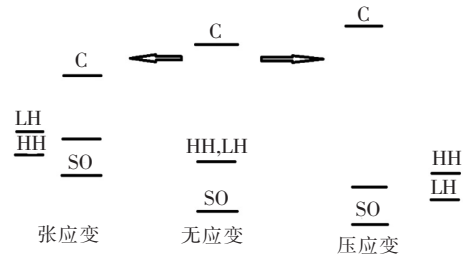


图 1 应力对半导体能带的影响^[9-12]

Fig. 1 Effect of stress on semiconductor energy band^[9-12]

在半导体激光器巴条封装过程中,由于巴条宽度约为 1 cm,腔长为 0.1 ~ 0.3 cm,长宽比很大,为计算简便可用单轴应力模型^[9-10]:

$$\Delta E_{hh, lh}(\varepsilon)_{\text{biaxial}} = \left[-a \frac{C_{11} - C_{12}}{C_{11} + C_{12}} \pm b \frac{C_{11} + 2C_{12}}{2(C_{11} + C_{12})} \right] \varepsilon, \quad (1)$$

其中, $\Delta E_{hh, lh}(\varepsilon)_{\text{biaxial}}$ 为应变造成的禁带宽度变化量, ε 为封装引入有源区的应力, C_{11} 、 C_{12} 分别为弹性劲度系数, a 、 b 分别为静压形变势和切形变势。本实验采用巴条芯片为 GaAs, 其各项参数如下: $a = -8.33$, $b = -1.7$, $C_{11} = 11.879$, $C_{12} = 5.376$, 由胡克定律整理可得

$$\Delta E_{hh, lh}(\varepsilon)_{\text{biaxial}} = 2.0357\varepsilon, \quad (2)$$

由于半导体激射波长由禁带宽度决定,代入上式即可得到波长漂移与封装应力的关系:

$$\sigma = E \times \left(\frac{1.24}{\lambda_0} - \frac{1.24}{\lambda} \right) / 2.035, \quad (3)$$

半导体激光器在阈值以上工作时,由于热效应及载流子的重新分布,偏振特性不能准确得出封装引入的应变变量,而较小电流工作时的增益不足以补偿腔内损耗,即只有自发发射时,偏振特性才可以直接反映其受到的应力变化。LD 激射光束的偏振特性可用偏振度表示^[6-8]:

$$\rho = \frac{I_{\text{TE}} - I_{\text{TM}}}{I_{\text{TE}} + I_{\text{TM}}}, \quad (4)$$

I_{TE} 、 I_{TM} 分别表示由光电二极管探测得出的 TE、TM 模光电流强度。对于同一个激光器,TE 模和 TM 模的自发发射功率主要差别体现在发射速率与光子频率不同。自发发射速率可表示为^[11-12]:

$$R_{\text{sp}} = A \frac{m_r^*}{d\pi\hbar^2} f(E_2)(1 - f(E_1)), \quad (5)$$

式中 m_r^* 是谐振子有效质量, d 为有源区厚度, $f(E_1)$ 、 $f(E_2)$ 为费米狄拉克分布方程, A 是自发发射系数。故 TE 模与 TM 模的功率比值为:

$$\frac{P_{TM}}{P_{TE}} = \frac{E_{qTM}^5 \left(\frac{m_{vTM}^* (m_c^* + m_{vTE}^*)}{m_{vTE}^* (m_c^* + m_{vTM}^*)} \right) \exp\left(2 \frac{E_{qTE} - E_{qTM}}{kT}\right)}{E_{qTE}^5} \quad (6)$$

其中, m_{vTM}^* 、 m_{vTE}^* 分别为轻空穴与重空穴的有效质量, E_{qTE} 、 E_{qTM} 分别为激光器量子阱的导带到重空穴与轻空穴的带隙, k 为玻尔兹曼常数^[12]。

$$E_{qj} = E_{g0} + \Delta E_j + \frac{\hbar^2}{2m_c^*} (\pi/d)^2 + \frac{\hbar^2}{2m_j^*} (\pi/d)^2, \quad (7)$$

其中 d 为有源区厚度。依据应变与半导体激光器有源区的带隙关系^[10], 可推导出

$$\Delta E_j = a_j \varepsilon + b_j \varepsilon^2, \quad j = TE, TM, \quad (8)$$

当测出封装后巴条的偏振度变化后, 通过对(4)、(6)、(7)、(8)方程组求解就可得出封装后引入有源区的应变值。GaAs 材料相关物理参数如表 1 所示。

表 1 砷化镓材料参数

Tab. 1 GaAs material parameters

| GaAs material | TE polarization | TM polarization |
|---------------|-----------------|-----------------|
| a/eV | 5.88 | 12.36 |
| b/eV | 0 | -61.75 |
| m_r^* | 0.059 72 | 0.037 07 |
| E_{g0}/eV | 1.519 | |
| m_c^* | 0.067 | |

本文建模采用巴条、钢焊料、铜热沉三层结构, 具体实验参数及模型参照表 2 及图 2。设定环境温度从钢焊料的熔点 430 K 降至室温 298 K。为了接近真实焊接情况以及避免模型无限转动, 边界约束条件选取 A、B、C 3 点, AB 点连线与 X 轴平行, BC 点连线与 Y 轴平行, B 点约束 X、Y、Z 轴分量移动, A 点约束 Y、Z 轴分量移动, C 点约束 Z 轴分量移动。

表 2 模拟材料参数

Tab. 2 Material parameters for simulation

| 材料 | CTE/($10^{-6} \cdot K^{-1}$) | 杨氏模量/(10^{10} Pa) | 泊松比 |
|------|--------------------------------|----------------------|---------|
| GaAs | 6.4 | 8.85 | 0.31 |
| In | 31 | 1.27 | 0.449 8 |
| Cu | 16.5 | 11 | 0.34 |

有关文献表明, 半导体材料的偏振特性仅由平面应力影响, 与垂直应力无关, 定义偏振等效应力为 $D_{op} = \delta_x - \delta_z$ ^[13-15]。激光器芯片的前腔面应力仅对器件的可靠性及 COD 阈值有较大影响^[5], 故选取巴条有源区中心从左至右的路径提取应力变化情况(图 3)。

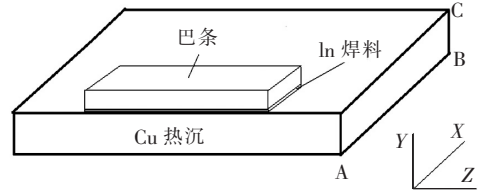


图 2 巴条模拟模型

Fig. 2 Laser bar simulation model

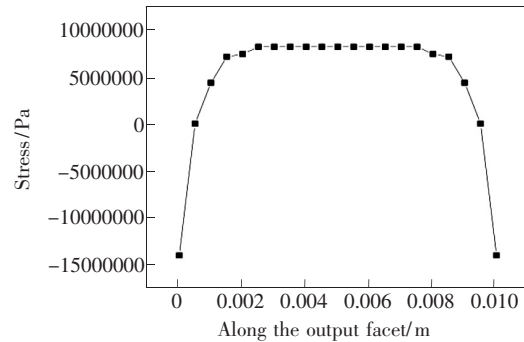


图 3 沿出光面有源区中心偏振等效应力侧向分布

Fig. 3 Polarization equivalent stress lateral distribution along the surface active region

由模拟结果可知, 芯片的偏振等效应力在左右两端急剧变化, 两端压应力为主, 中心张应力为主。这是由于在焊接温度降至室温的过程中, 焊料两端散热较快首先凝固, 而芯片材料的 CTE 系数比热沉材料小, 造成凝固后芯片两端下压中心向上翘曲, 使得两端以压应力为主, 中心则以张应力为主。

3 实验与结果分析

引起半导体激光器芯片应力变化的原因有很多, 本文着重研究由于封装引起的封装应力, 即从焊接温度降至室温时, 由于半导体芯片与热沉的热膨胀(CTE)系数差异造成热沉材料和芯片收缩程度不一致而产生的封装应力, 使得半导体芯片晶格收缩或膨胀, 进而造成半导体能带的改变, 具体情况如图 1 所示。

实验测试样管为 CS 封装 798 nm 波长的 19

单元发光巴条。测试系统包括偏振片、柱透镜、狭缝、光电二极管探测器,如图 4 所示。为排除由于温度升高所造成的热应力影响^[16-17],设定工作脉宽 500 μ s,占空比 5%。CS 封装的巴条采用钢焊料 P 面向下封装在铜热沉上,腔面安装快慢轴准直镜,底部为微通道板散热,温度设定为 20 $^{\circ}$ C。光束经过偏振片后通过柱透镜形成放大的巴条发光光斑。通过固定在多轴位移平台上的狭缝,由移动狭缝及光电二极管探测器获得巴条侧向光强分布。具体实验装置如图 4 所示。

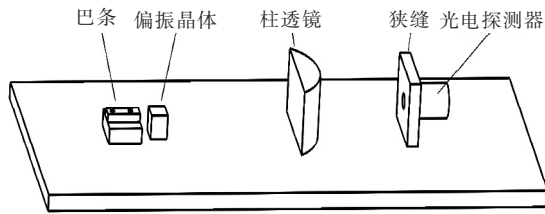


图 4 偏振测量装置图

Fig. 4 Polarization measurement device

狭缝过小会造成探测器收集的光强过小,使得实验误差较大;狭缝过大不能较好地分辨各个单元的光束,在能够较好分辨出各个发光单元的光束且保证实验精度的情况下,将狭缝宽度定为 100 μ m。图 5 为巴条成像光斑示意图。在激光器阈值电流以上工作时,由于腔内反射的原因,占主导的模式被无限扩大,偏振度变化不能较好地反映应力变化;电流过小,由于光电流的测量精度限制,会使得实验误差较大,因此选取 4 A 为激光器测试工作电流。

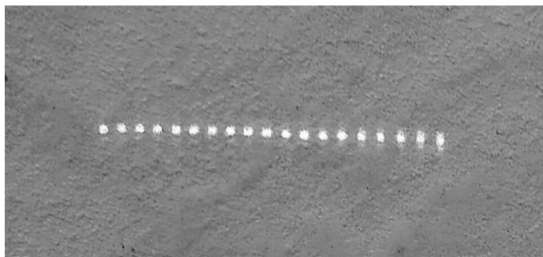


图 5 巴条成像光斑示意图

Fig. 5 Image of the bar graph image

本实验采用的激光器为 TE 模式,正常工作状态下 TE 模占主导。如图 6 所示,巴条偏振度显示为两端较高、中间较低的趋势。由于测试光电流精度受到限制,造成图中 13~17 单元偏振度趋于一致。2~4、13~18 单元处偏振度急剧下降,说明此处受到较大的张应力,利用偏振度计算

可得出第 4 单元偏振等效应力最大值为 26.73 MPa;1 与 19 单元偏振度较高,说明此处受到张应力较小或受到压应力,使得 TE 模增强, TM 模下降;中间各单元较为平缓,说明封装应力分布较为平均。

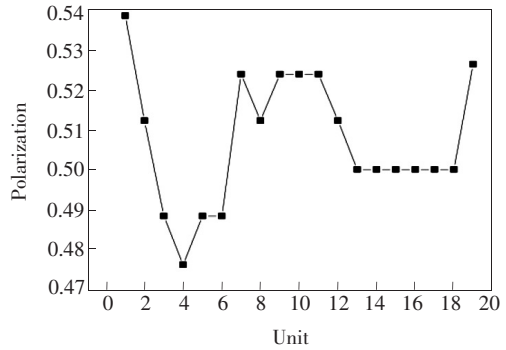


图 6 各发光单元偏振度曲线

Fig. 6 Polarization curve under 4 A

图 7 为巴条各个发光单元峰值波长分布图。可以看出,2~4 单元由于受到封装应力的影响波长红移至 799.68 nm。通过公式(8),可计算出应力差为 141.92 MPa,巴条整体波长分布在 799 nm 附近,通过计算可得封装应力为 42.30~141.92 MPa。

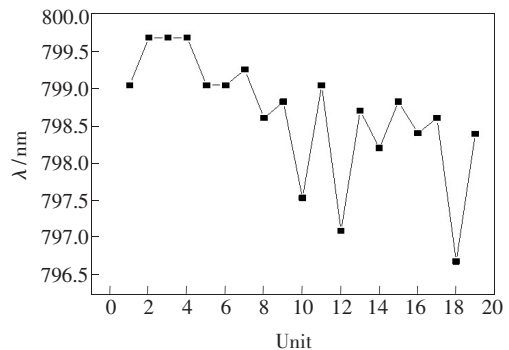


图 7 各发光单元波长

Fig. 7 Wavelength of each light emitting unit

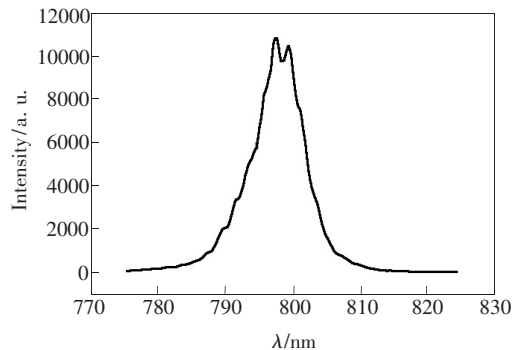


图 8 第 4 发光单元光谱

Fig. 8 The fourth light emitting unit spectrum

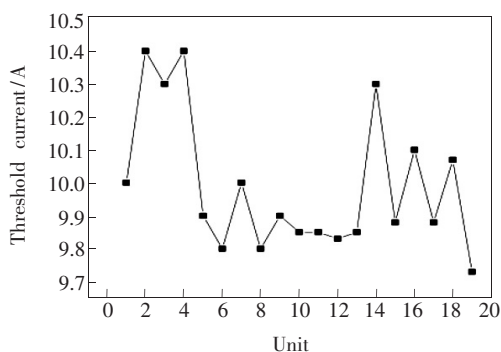


图9 各发光单元阈值电流分布曲线

Fig. 9 Threshold current distribution curve of each light emitting unit

其中偏振度最低的第4发光单元的光谱如图8所示。由于张应力过大,轻空穴上升至重空穴之上,电子从导带向下跃迁至价带时,同时与轻、重空穴发生复合,故出现双峰现象。有关文献^[15]表明,随着张应力的增大,芯片的激射波长及阈值发生明显的线性增大。结合图2、6、7、9可知,张应力与波长及阈值电流成正相关,与偏振度成负相关,实验测试结果与理论较为吻合。造成应力过大

的原因可能是由于焊料未充分浸润以及有细小空洞等。

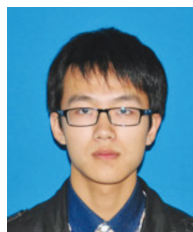
4 结 论

半导体激光器芯片在封装过程中引入较大的封装应力会对器件的偏振度、阈值电流、激射波长等性能产生重要影响,并且由于封装应力过大可能会引起暗线缺陷等造成器件突然失效或使用寿命降低。本文通过半导体激光器波长、偏振度与应力的关系分析,并在实验中通过激光器阈值电流、波长、偏振度分布测试,得出CS封装巴条的封装应力(最大141.92 MPa),偏振等效应力最大为26.73 MPa,可能是由于焊料未充分浸润等原因造成的。测试表明,器件在阈值以下的偏振度较好地反映了封装应力的分布趋势,利用阈值电流以下测量器件的发光偏振特性,可以为选择热沉及焊料、焊接工艺参数的改进等方面提供较为快捷而有效的评价手段。因此在封装过程中,选择合适的封装工艺参数是保证器件性能的基本要求。

参 考 文 献:

- [1] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展 [J]. 发光学报, 2015, 36(1):1-19.
WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.*. Development of high power diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1):1-19. (in Chinese)
- [2] 陈华, 李静, 周兴林, 等. 封装热应力致半导体激光器“Smile”效应的抑制方法 [J]. 发光学报, 2017, 38(5):655-661.
CHEN H, LI J, ZHOU X L, *et al.*. Measures to reduce smile effect of semiconductor laser diode arrays caused by packaging thermal stress [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(5):655-661. (in Chinese)
- [3] 王文知, 井红旗, 祁琼, 等. 大功率半导体激光器可靠性研究和失效分析 [J]. 发光学报, 2017, 38(2):165-169.
WANG W Z, JING H Q, QI Q, *et al.*. Reliability test and failure analysis of high power semiconductor laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(2):165-169. (in Chinese)
- [4] 王昭, 雷军, 谭昊, 等. 基于 mini-bar 的二极管激光器焊接实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(8):9-12.
WANG Z, LEI J, TAN H, *et al.*. Experimental investigation on diode laser bonding based on mini-bars [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(8):9-12. (in Chinese)
- [5] TOMM J W, ZIEGLER M, OUDART M, *et al.*. Gradual degradation of GaAs-based quantum well lasers, creation of defects, and generation of compressive strain [J]. *Physica Status Solidi Applications & Materials*, 2010, 206(8):1912-1915.
- [6] TOMM J W, TIEN T Q, CASSIDY D T. Spectroscopic strain measurement methodology: degree of polarization photoluminescence *versus* photocurrent spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(13):133504.
- [7] TOMM J W, GERHARDT A, MÜLLER R, *et al.*. Spatially resolved spectroscopic strain measurements on high-power laser diode bars [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(3):1354-1362.
- [8] TOMM J W, GERHARDT A, ELSAESSER T, *et al.*. Simultaneous quantification of strain and defects in high-power diode laser devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(17):3269-3271.

- [9] LARRY A C, SCOTT W C, MILAN L M. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* [M]. Hoboken: John Wiley Sons, 2012.
- [10] BIR G, GE P. Symmetry and strain-induced effects in semiconductors [J]. *Neurobiol. Aging*, 1974, 37(4):S274.
- [11] 王辉, 张岩, 秦莉, 等. 高功率半导体激光器阵列封装引入应变的测量 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 1951-1958.
WANG Y, ZHANG Y, QIN L, *et al.*. Measurement of packaging-induced strain in high power diode laser bar [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):1951-1958. (in Chinese)
- [12] 郭长志. 半导体激光器能带结构和光增益的量子理论 [M]. 北京:科学出版社, 2016.
GUO C Z. *The Quantum Theory of Band Structure and Light Gain of Semiconductor Lasers* [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [13] LECLECHJ, CASSIDY D T, LARUELLE F, *et al.*. Residual mechanical stress decrease in GaAs-based laser diodes *via* a bi-material investigation [J]. *SPIE*, 2011, 8080:808006-1-9.
- [14] LECLECH J, CASSIDY D T, BIET M, *et al.*. GaAs-based laser diode bonding-induced stress investigation by means of simulation and degree of polarization of photoluminescence measurements [C]. *International Conference on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems, IEEE, Bordeaux, France*, 2010:1-6.
- [15] ZHU H, LIU K, XIONG C, *et al.*. The effect of external stress on the properties of AlGaAs/GaAs single quantum well laser diodes [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2015, 55(1):62-65.
- [16] 倪羽茜, 井红旗, 孔金霞, 等. 高功率半导体激光器陶瓷封装散热性能研究 [J]. *发光学报*, 2016, 37(5): 561-566.
NI Y X, JING H Q, KONG J X, *et al.*. Thermal performance of high-power semiconductor laser packaged by ceramic submount [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(5):561-566. (in Chinese)
- [17] 王淑娜, 张普, 熊玲玲, 等. 温度对高功率半导体激光器阵列“smile”的影响 [J]. *光子学报*, 2016, 45(5):0514001.
WANG S N, ZHANG P, XIONG L L, *et al.*. Influence of temperature on “smile” in high power diode laser bars [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(5):0514001. (in Chinese)



张哲铭(1993 -),男,山西侯马人, 硕士研究生,2015年于长春理工大学获得学士学位,主要从事半导体激光器方面的研究。

E-mail: zhangzhemingok@foxmail.com



高欣(1965 -),女,吉林省吉林市人, 教授,博士生导师,2007年于长春理工大学获得博士学位,主要从事高功率半导体激光器物理与技术的研究。

E-mail: gaixin@cust.edu.cn