

引用格式: LI Bo, WANG Zhen-fu, QIU Bo-cang, *et al.* Influence of Strain on the Performance of Independent Emitters in High Power Quasi-continuous Semiconductor Laser Array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(9): 0914001.

李波, 王贞福, 仇伯仓, 等. 高功率准连续半导体激光阵列中应变对独立发光点性能的影响[J]. *光子学报*, 2020, **49**(9): 0914001.

高功率准连续半导体激光阵列中应变对独立发光点性能的影响

李波^{1,2}, 王贞福¹, 仇伯仓¹, 杨国文^{1,2}, 李特¹, 赵宇亮^{1,2}, 刘育銜^{1,2}, 王刚^{1,2}, 白少博¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为了解决阵列中每个发光点性能分布不均的问题,研究了微通道水冷封装的 960 nm 半导体激光器阵列,阵列包含 38 个发光点,腔长为 2 mm,在驱动电流为 600 A、占空比为 10%的条件下,输出的峰值功率达到 665.6 W,电光转换效率为 63.8%,中心波长为 959.5 nm.通过对应力的理论分析,给出了各个发光点应变的表达式;通过搭建单点测试系统获得阵列中每个发光点的阈值电流、斜率效率、光谱和功率等光电特性;结合应变理论分析可知,器件中发光点的性能与应变大小和类型密切相关,压应变会导致器件波长蓝移、阈值电流降低、功率和斜率效率升高,张应变会导致波长红移、阈值电流升高、功率和斜率效率降低.研究表明,影响器件内部发光点的性能不仅与热效应有关,而且与封装后残余的应变密切相关,通过应力的分布可以预测阵列性能的变化规律,可为高功率、高可靠性的半导体激光阵列的研制提供参考.

关键词:高功率半导体激光阵列;独立发光点;应变;微通道;光电特性

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0914001

Influence of Strain on Performance of Independent Emitters in High Power Quasi-continuous Semiconductor Laser Array

LI Bo^{1,2}, WANG Zhen-fu¹, QIU Bo-cang¹, YANG Guo-wen^{1,2}, LI Te¹,
ZHAO Yu-liang^{1,2}, LIU Yu-xian^{1,2}, WANG Gang^{1,2}, BAI Shao-bo¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

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

Abstract: In order to study the issues of non-uniform performance of the emitters in laser bars, 960 nm laser bars with 38 emitters and cavity length of 2 mm packaged by the microchannel cooler were experimentally studied. The peak output power reaches 665.6 W, the electro-optic conversion efficiency is 63.8%, and the centroid wavelength is 959.5 nm under the driving current of 600 A and the duty ratio of 10%. Firstly, theoretical analysis was made to find out the relationship between the external stress and laser's parameter changes. Then, the laser photoelectric characteristics parameters such as threshold

基金项目:国家自然科学基金(No.61504167),陕西省自然科学基金(Nos.2019ZY-CXPT-03-05,2018JM6010,2015JQ6263),陕西省科技厅人才项目(No.2017KJXX-72)

第一作者:李波(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为高功率准连续半导体激光器测试分析.Email:libo2017@opt.cn

导师:杨国文(1966—),男,研究员,博士,主要研究方向为高功率半导体激光器技术.Email:yangguowen@opt.ac.cn

通讯作者:王贞福(1982—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为半导体激光器仿真、测试、整形、失效等.Email:wzf2718@opt.ac.cn

收稿日期:2020-05-20;**录用日期:**2020-06-30

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

current, slope efficiency, spectrum and optical power were measured via the test setup. From external stress theory, it is clear that external stress can significantly affect the laser's parameter performance. Specifically, compressive strain will cause blue-shift in wavelength, decrease in threshold current, and increase in laser and slope efficiency; tensile strain by contrast, will have completely opposite effects on the laser performance. Studies have shown the performance that affects the internal emitters is not only thermal effects, but also residual strain after packaging. The distribution of stress can basically predict the pattern of array performance, which will provide a reference for the development of high peak power, high reliability semiconductor laser arrays.

Key words: High-power semiconductor laser array; Independent emitter; Strain; Microchannel; Photoelectric characteristics

OCIS Codes: 140.2010; 140.2020; 140.3290; 250.5960

0 引言

高功率半导体激光阵列器件能够产生几百瓦直至千瓦以上的光功率^[1,2],已广泛应用到激光泵浦^[3]、材料加工^[4]和医疗应用^[5]等领域中.就能量转化效率(Power Conversion Efficiency, PCE)而言,半导体激光器是迄今为止效率最高的一类激光器,目前激光阵列报道的最高电光转换效率为 76%^[6-8].半导体激光芯片在实际应用中,必须封装以使其具有与其工作环境、工作参数等相匹配的热管理,否则在芯片有源区极小的空间中产生的热量将严重降低激光器的性能,甚至导致器件失效^[9-11].由于 GaAs 半导体材料与器件工艺以及器件封装中使用的其它材料之间的热膨胀系数(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)不可能做到完全匹配,或者在某些场合,基于材料成本的考虑,选用 CTE 差异很大的热沉,如铜热沉,那么不可避免地将应力引入半导体器件中,从而导致器件性能变化甚至使设备可靠性下降^[12-14].CASSIDY D T 等研究了高功率半导体激光器中剪切应变对发光点功率的影响^[15];ZHANG H Y 等给出了一种采用波长偏移法测量封装应力的简易方法^[16];袁庆贺等采用物理场仿真研究焊料和热沉厚度对封装应力的影响^[17].上述因 CTE 不匹配而导致的机械应力最终表现为量子阱层应变参数的变化,因此可以通过不同的方法来评估应力的影响,如光致发光测量法^[18]、拉曼光谱法^[19]和微光致发光法^[20,21].现有的研究报道主要集中于采用铜热沉封装传导冷却阵列的应力测试、器件整体的性能表现等,而关于采用微通道封装、在大电流下工作时因 CTE 产生的应力对高功率激光阵列内部各发光点性能的影响鲜有研究报导.

本文首先分析器件中应力以及应力对半导体能带的影响,给出了器件中应变表达式,以及器件的热效应和阈值电流表达形式^[22,23];其次,利用搭建的测试系统进行测试工作,获得了器件整体性能及内部发光点阈值电流、斜率效率、光谱和功率等电光性能相关的实验数据;最后,结合计算获得的应变,分析内部发光点的性能是如何受到应变的影响,并进行解释分析.

1 理论分析

对于单一的均质半导体材料,温度的变化会产生热应变,该应变可以表示为

$$\epsilon = \alpha \Delta T \quad (1)$$

式中, ϵ 是应变, ΔT 是相对于初始温度的变化量, α 是与半导体及其封装材料的 CTE 失配度相关的比例系数.研究表明,外部应变会影响半导体材料的光学特性以及材料的带隙大小,通过测试激光阵列上每个发光点上的波长漂移量,可以获得半导体能带的变化进而获得应变的大小.采用封装的阵列宽度为 10 mm,腔长为 2 mm.因为长宽比很大,所以简化分析可以采用单轴应变模型^[24-26],即

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

式中, $\Delta E_{\text{hh, lh}}(\epsilon)_{\text{unaxial}}$ 是应变造成带隙变化量,常数 a 、 b 、 C_{11} 和 C_{12} 分别是静压形变势、切形变势和弹性劲度系数, ϵ 为引入有源区的应变,等式中的 \pm 符号分别对应于电子-重空穴(hh(+))和电子-轻空穴(lh(-))的带隙变化量.对于 InGaAs 量子阱材料, $a = -8.13$ eV, $b = -1.98$ eV, $C_{11} = 1\ 186.1$ GPa, $C_{12} = 555.8$ GPa,应变包含内应变和外应变,其中内应变主要是由晶格失配造成,为了有效地释放外延过程中由晶格失配产生的内应变,采用渐变波导层,而晶格失配度可以表达为^[27]

$$\delta = \frac{2|a_1 - a_2|}{a_1 + a_2} \quad (3)$$

式中, δ 是晶格失配度值, a_1 和 a_2 是半导体材料的晶格常数, 而形如 $A_x B_{1-x} C$ 三元材料的晶格常数通过线性插值得到, 即 $a_{A_x B_{1-x} C} = a_{AC} x + a_{BC} (1-x)$, 并且已知 a_{GaAs} 是 5.653×10^{-10} m, a_{InAs} 是 6.059×10^{-10} m, 和 a_{AlAs} 是 5.653×10^{-10} m, 所以 $Al_{0.075} Ga_{0.925} As$ 和 $In_{0.1} Ga_{0.9} As$ 的晶格常数分别是 5.653×10^{-10} m, 5.693×10^{-10} m. 经过计算得出 $\delta = 0.705\%$, 其值太小, 晶格基本适配, 在外延后的内应变分布均匀一致是固定应变, 不随后续的封装工艺处理而变化, 即对应于封装前确定的波长, 该波长已是叠加了内应变对其的影响, 每个发光点波长基本一致, 本文研究外部焊接封装后引入的外应变 (ϵ_{ext}), 采用单轴应变模型, 通过对比封装前后的波长变化, 来计算获得外应变, 因而式(2)可以写成

$$\Delta E_{hh, lh}(\epsilon)_{unaxial} = A \epsilon_{ext} \quad (4)$$

式中, $A = \left[-a \frac{c_{11} - c_{12}}{c_{11} + c_{12}} \pm b \frac{c_{11} + 2c_{12}}{2(c_{11} + c_{12})} \right]$, 与此同时, 带隙的变化与波长变化表达为

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda} \quad (5)$$

式中, 常数 h 、 c 分别是普朗克常数和光速, λ_0 和 λ 分别是未漂移前的波长和发生漂移后的波长. 因为温度和应变均可影响实际测量的波长值, 为了消除温度对器件波长的影响, 在实验中采用热效应很低的低占空比测试条件: 占空比 0.1% (100 μs , 10 Hz) [16]. 如此可以将波长的变化全部归结为外应力对器件的影响, 即

$$\epsilon_{ext} = (hc/\lambda_0 - hc/\lambda)/A \quad (6)$$

这样就给出了由于封装造成外应力与波长的相互依赖关系. 而器件中的热效应是指在实际工作中由于发热造成的温升对量子阱的光学性能产生影响, 即 ΔT , 其计算表达式为 [25]

$$\Delta T = \Delta\lambda / (\partial\lambda / \partial T) \quad (7)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为波长的变化, $\partial\lambda / \partial T$ 是波长随温度线性漂移系数. 此外, 对于半导体激光器的阈值电流与温度变化存在指数关系表达式 [22, 28]

$$I_{th} = I_0 \exp\left(\frac{\Delta T}{T_0}\right) \quad (8)$$

式中, T_0 是激光器阈值电流的特征温度, I_0 是室温 25 $^{\circ}C$ 下的阈值电流, ΔT 是相对于室温的温度变化量.

理论分析给出了研究阵列中各点应变的理论表达式, 通过对各点应变的大小来研究应变对激光阵列的性能参数影响, 进而探讨造成工作条件下阵列性能变化的机理.

2 实验内容及结果

实验采用了自主设计的高功率准连续半导体激光阵列, 其具体参数是: 条宽为 10 mm, 腔长为 2 mm, 发光点数为 38 个, 填充因子为 75%, 激光阵列 p(正极) 面朝下被焊接在微通道 (Micro-Channel Cooler, MCC) 热沉上, 如图 1(a), 图 1(b) 是器件内部的外延结构. 首先测试了激光阵列的功率-电流-电压 (P - I - V) 性能. 具体测试条件是: 水流量为 0.3 L/min, 温度恒定为 25 $^{\circ}C$; 电流是大小为 600 A、脉宽为 500 μs 、占空比为 10%

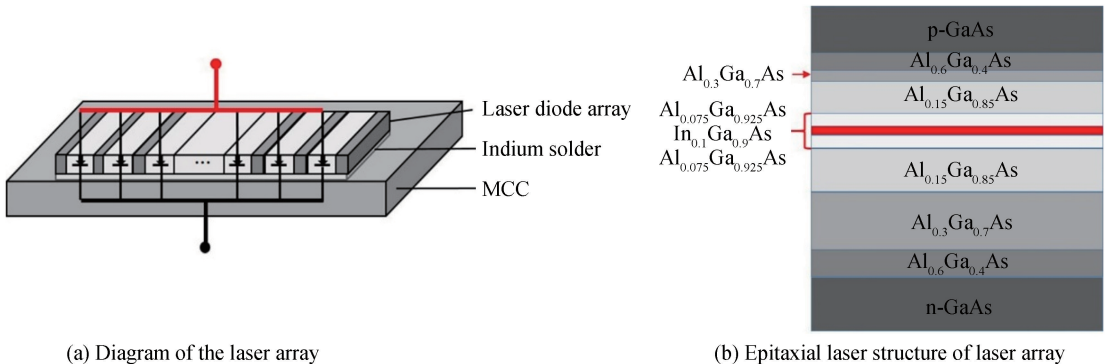


图 1 高功率准连续半导体激光阵列器件结构和芯片外延结构简图

Fig.1 The schematic diagram of the external and epitaxial structure of the high-peak power semiconductor laser array device

的脉冲。从图 2(a)可以得出,输出的峰值功率达到了 665.6 W,电光转换效率为 63.8%,中心波长为 959.5 nm,在 210 A 下达到了最大的电光转换效率 72.5%,斜率效率和阈值电流分别为 1.16 W/A 和 12.14 A,图 2(b)是器件的近场图像,是在驱动电流 20 A 下测试得到的,可以看出选用测量的器件具有 38 个完好的发光点,没有发生光学灾难损伤(Catastrophic Optical Mirror Damage, COMD)。

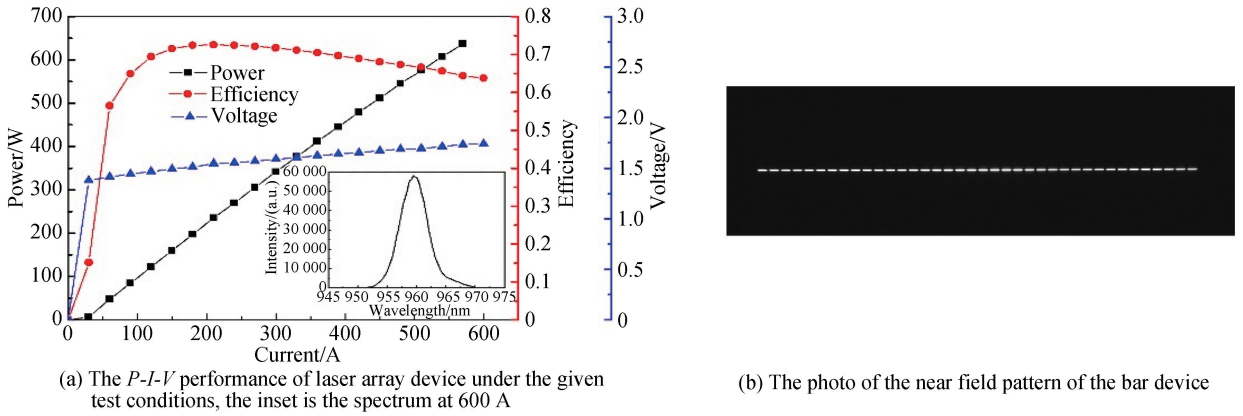


图 2 高峰值功率半导体激光阵列测试曲线和近场光斑测试图

Fig.2 Test curve and near field spot of high peak power semiconductor laser array

图 3 为用于封装应力测试的装置简图,该装置可以获得单个发光点的实验数据。图 3(a)用于测试器件的整体性能;图 3(c)测量器件的偏振度(Degree of Polarization, DOP) ($DOP = (P_{TE} - P_{TM}) / (P_{TE} + P_{TM})$)^[29],偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)将进来的光分成不同的偏振模式来计算 DOP,通过在不同水温下测量阈值电流和发光波长得出特征温度 T_0 和波长随温度变化的温度漂移系数 $\partial\lambda / \partial T$ 。表 1 给出了性能测试的结果。从表 1 测试数据可以看出,芯片特征温度高达 233 K,表明器件具有非常优异的温度特性,但是另一方面,芯片的偏振度 DOP 只有 0.78,表明芯片承受了较大的外部应变^[30]。图 3(b)用于测试器件中每个发光点的相关参数,黑色虚线框中的组件放在由计算机控制的精密移动平台上,红色虚线表示光谱和功率分别收集,显微镜物镜(Microscope Objective Lens, MOL)将近场的点成像到屏幕上,狭缝的调整宽度为 0.2 mm,以便仅能检测到来自指定发光点的光,光谱仪和功率计分别用于采集光谱和功率。

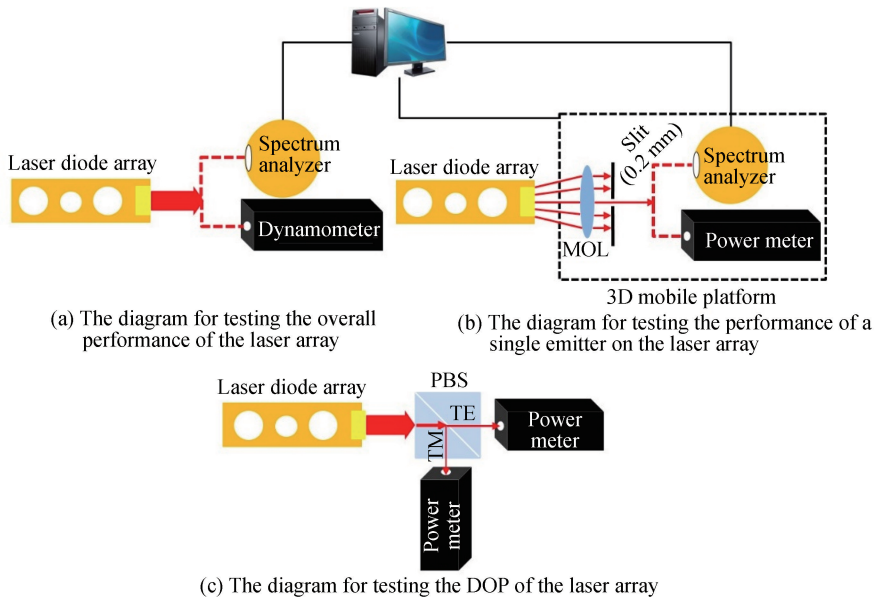


图 3 实验装置

Fig.3 The experiment setup

表 1 器件的性能参数

Table 1 Performance parameter values of the device

Performance parameter	$\partial\lambda/\partial T/(\text{nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	Characteristic temperature/K	DOP
Parameter value	0.3	233	0.78

为了进一步研究激光阵列中各点的应力分布,对图 2(b)每个发光点进行独立测试.在测试过程中,为了消除热效应对芯片的影响,特意选取了低占空比的工作模式,具体测试条件为:占空比为 0.1% (100 μs , 10 Hz),工作电流为 600 A.为了消除热效应对波长 λ 的影响,图 4(a)给出了低占空比下阵列中各个发光点的波长,根据式(6)计算外应力大小,图 4(b)是每个发光点经计算后得到的对应外应变分布.从相关的对比测试得知,芯片在无外应力时的波长约为 953.3 nm.对比这一自由状态下芯片的波长,显然可以看出,从第 6 号到第 33 号的发光点发生了蓝移,表明这些发光点处于压应变状态,对应于电子-重空穴(hh)带隙变化,所对应的常数(见式(4)) $A = 1.6359 \text{ eV}$,而其他的发光点发生红移,表明其处于张应变状态,对应于电子-轻空穴(lh)带隙变化,所对应的 $A = 4.2477 \text{ eV}$.从图 4(a)和(b)可以看到,波长的变化与应变变化展现出高度的一致,说明波长变化量与应变密切相关;与阵列中心区域的发光点相比,在阵列两侧的发光点的中心波长有着显著变化,说明两侧发光点承受的应力显著高于中心区域的发光点所承受的外应力,具体原因是由于激光芯片为厘米巴,在实际封装过程中,激光芯片边缘弯曲形变量较大,加之可塑性较强的钢焊料在焊接过程中四处流动将会对芯片边缘部分进一步拉扯产生额外的应力,导致两侧的应力比中心区域大.

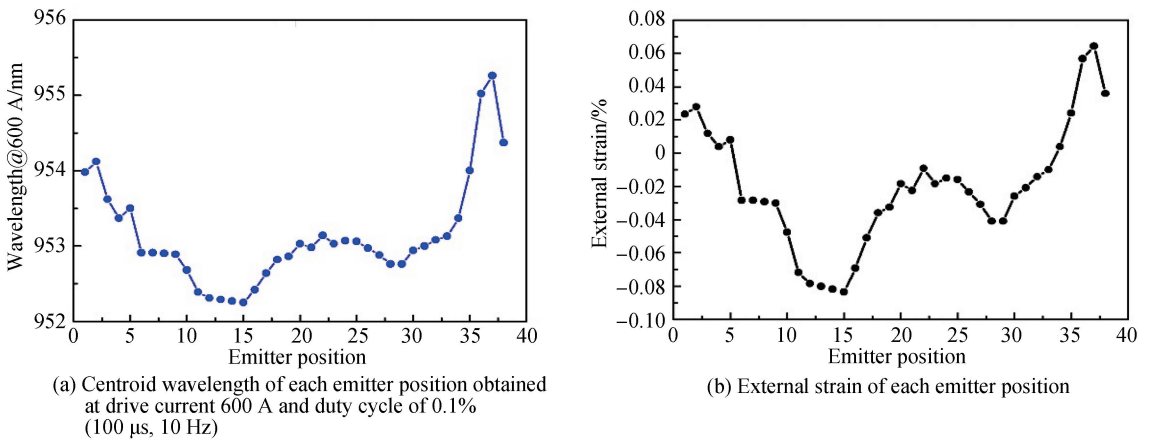


图 4 各个发光点位置波长和对应的外应变

Fig.4 Wavelength and corresponding external strain at each emitter position

使用 MCC 和钢焊料封装的阵列器件散热好,实际工作时热效应相对较低^[25,31].本文测试了 600 A 工作电流、10% (500 μs , 200 Hz)占空比工作时每个发光点位置光谱特性,如图 5.比较同一只器件低占空比时的光谱(图 4(a))与同样工作电流但高占空比时的光谱(图 5(a)),可以估算出因占空比增高所引起的波长红移,并由此推算出每个发光点的结温升高值,如图 6(a).图 6(b)是在 600 A 条件下测量的 38 个发光点位置的平均功率.从图 4(a)和图 5(a)的对比可以得知,波长在低、高占空比下的变化趋势基本一致,说明在低占空比下测试应变是可行的,在高占空比下引起波长的红移基本就是温升导致的结果,而导致两者的分布轮廓并不完全一致是由发光点之间的热串扰造成;从图 5(b)可以看出,外部的应变会使光谱特性变差(光谱展宽);同时如图 6(a)所示在阵列中各发光点位置的温升分布不均匀,多数发光点呈现出中间高两端低的正常现象,平均温升为 25 $^\circ\text{C}$ 左右,不过在右侧边缘的少数发光点温度变化较为反常,主要是由于封装过程中边缘部分焊料流动容易出现缺陷、晶须产生焊料空洞,空洞将会导致其上发光点热量的积累^[31],进而造成量子阱内部结构发生较复杂的改变,导致器件的电光转换效率降低,进一步导致结温升高;图 6(b)在 600 A 条件下测量的 38 个发光点位置的平均功率也显示出“功率皱眉”现象^[15,32],即阵列中心发光点的功率高于两端的发光点的功率,在第 21 个点有最大的功率为 1.96 W.在正常情形下,阵列中心的温度高于芯片两端的温度,根据半导体激光器的温度效应,阵列中心发光点的功率应该低于两侧发光点的功率.然而从图 6(b)可以看出,实际测到的功率分布与正常温度引起的功率变化效应完全相反,说明芯片在实际工作时,不仅有正常的

温度引起的功率变化,还叠加了更为显著的应力效应引起的功率变化.

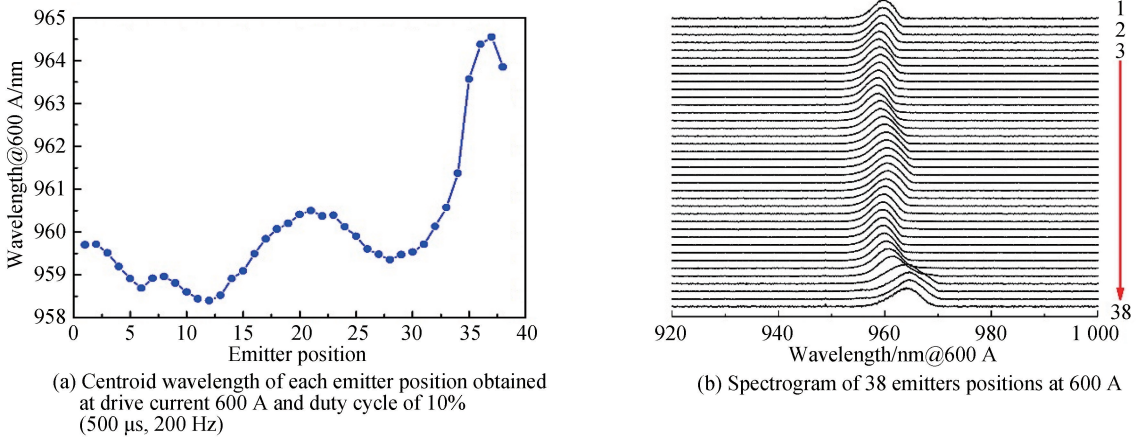


图 5 在给定测试条件下阵列中各发光点位置的波长及光谱

Fig.5 Wavelength and spectrum at each emitter position in the array under given test conditions

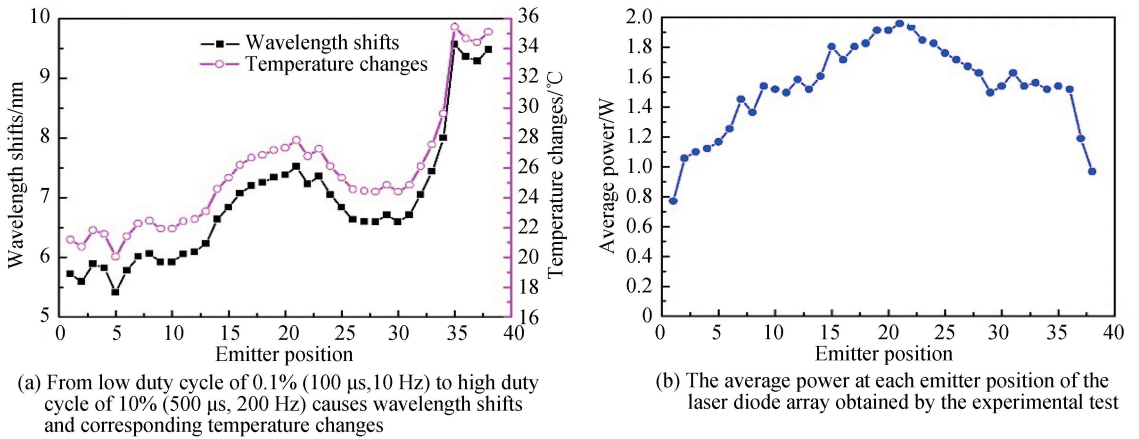


图 6 阵列中各发光点位置的温度变化引起的波长漂移和功率

Fig.6 Wavelength shift caused by temperature change and power at each emitter position in the array

此外,对各个发光点的斜率效率和阈值电流进行实验分析.图 7(a)展示的斜率效率呈现出与功率基本一致的变化趋势,中间发光点功率较高对应的斜率效率也较高;图 7(b)是各个发光点归一化的阈值电流,结果显示在器件两端的发光点有较大的阈值电流,中间反而相对较小,这些结果与图 6(b)高度一致.显然,从图 7 可以看出,外部应力使得芯片的参数性能产生显著变化,表明在实际的器件封装工艺中,必须对封装产生的应力进行严格控制.

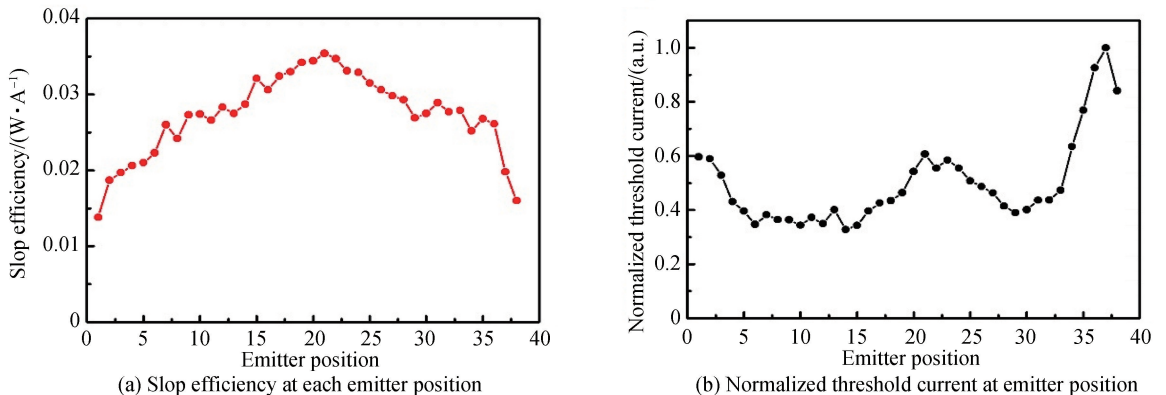


图 7 在 10% (500 μs, 200 Hz) 占空比下测试获得每个发光点位置处的斜率效率和归一化的阈值电流

Fig.7 Slope efficiency and normalized threshold current at each emitter position under 10% (500 μs, 200 Hz) duty cycle

3 结论

对于高功率半导体激光阵列,内部的应变会对其性能产生重要的影响.通过应力理论分析,本文建立了计算器件中外应变大小的表达形式.通过利用搭建的实验装置测试了器件中各点位置的功率、光谱、阈值电流和斜率效率等电光性能,“功率皱眉”和阈值电流中间低两边高的现象都展现出与预期不相符的结果,采用理论分析得到的表达式来计算应变的大小.分析结果表明,器件中间发光点遭受的压应变会使其波长蓝移,阈值电流降低,功率和斜率效率上升;而两端遭受的张应变会使波长红移,阈值电流升高,功率和斜率效率下降,并且光谱特性变差.研究表明,应力的存在会对器件整体性能及内部发光点产生重要的影响,因而在实际分析其性能时可以采用器件中单点应力理论,应力的分布基本可以预测这些性能走向,为器件性能分析和研制提供了一种可行的分析方法.

参考文献

- [1] WANG Li-jie, TONG Cun-zhu, SHU Shi-li, *et al.* Loss tailoring of high-power broad-area diode lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, **44**(14): 3562.
- [2] YU C X, SHATROVOY O, FAN T Y, *et al.* Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(22): 5202.
- [3] WU D H, ZAH C E, LIU X S. Three-dimensional thermal model of high-power semiconductor lasers[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(14): 3892-3901.
- [4] TOMM J W, GERHARDT A, ELSAESSER T, *et al.* Simultaneous quantification of strain and defects in high-power diode laser devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(17): 3269.
- [5] KIM D S, HOLLOWAY C, HAN B, *et al.* Method for predicting junction temperature distribution in a high-power laser diode bar[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(27): 7487-7496.
- [6] MATTHEW P, VICTOR R, ERIK Z. High-power high-efficiency laser diodes at JDSU[C]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, **6456**(5): 1217-1222.
- [7] WANG Zhen-fu, LI Te, YANG Guo-wen, *et al.* High power, high efficiency continuous-wave 808 nm laser diode arrays [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, **97**: 297-301.
- [8] MAHLER F, KERNKE R, TOMM J W, *et al.* By-emitter analysis of 450-nm emitting high-power diode laser bars[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, **25**(6): 1-6.
- [9] BULL S, LIM J J, AMUZUVI C K, *et al.* Emulation of the operation and degradation of high-power laser bars using simulation tools[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, **27**(9): 137-143.
- [10] MARTIN-MARTIN A, AVELLA M, INIGUEZ M P, *et al.* Thermomechanical model for the plastic deformation in high power laser diodes during operation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(7): 073105.
- [11] FANG Jun-yu, ZHANG He, ZOU Yong-gang, *et al.* Thermal management of a semiconductor laser array based on a graphite heat sink[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(28): 7708-7715.
- [12] LU Yao, NIE Zhi-qiang, CHEN Tian-qi, *et al.* Thermal stress and smile of conduction-cooled high power semiconductor laser arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(9): 0914001.
鲁瑶, 聂志强, 陈天奇, 等. 传导冷却单巴高功率半导体激光器热应力和 smile 研究[J]. 光子学报, 2017, **46**(9): 0914001.
- [13] NIE Zhi-qiang, LU Yao, CHEN Tian-qi, *et al.* Thermomechanical behavior of conduction-cooled high-power diode laser arrays[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology*, 2018, **8**(5): 818-829.
- [14] XIA R, LARKINS E C, HARRISON I, *et al.* Mounting-induced strain threshold for the degradation of high-power AlGaAs laser bars[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(7): 893-895.
- [15] CASSIDY D T, REHIOUI O, HALL C K, *et al.* High-power diode laser bars and shear strain[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(10): 1633.
- [16] ZHANG Hong-you, FU Tuan-wei, ZHA Chung-en, *et al.* Easy method to measure the packaging-induced stress of a semiconductor laser diode by lasing wavelength shifting[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(24): 6672.
- [17] YUAN Qing-he, JING Hong-qi, ZHONG Li, *et al.* Thermal stress in high power semiconductor laser packaging[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2019, **46**(10): 1001009.
袁庆贺, 井红旗, 仲莉, 等. 大功率半导体激光器封装热应力研究[J]. 中国激光, 2019, **46**(10): 1001009.
- [18] TOMM J W, TIEN T Q, CASSIDY D T. Spectroscopic strain measurement methodology: degree-of-polarization photoluminescence versus photocurrent spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(13): 133504.
- [19] TRIPATHY S, CHUA S J, CHEN P, *et al.* Micro-Raman investigation of strain in GaN and Al_xGa_{1-x}N/GaN heterostructures grown on Si (111)[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **92**(7): 3503-3510.
- [20] BULL S, ANDRIANOV A V, HARRISON I, *et al.* A spectroscopically resolved photo- and electroluminescence microscopy technique for the study of high-power and high-brightness laser diodes [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2005, **54**(3): 1079-1088.

- [21] HEMPEL M, ZIEGLER M, SCHWIRZKE-SCHAAF S, *et al.* Spectroscopic analysis of packaging concepts for high-power diode laser bars[J]. *Applied Physics A*, 2012, **107**(2): 371-377.
- [22] KAUL T, ERBERT G, MAABDORF A, *et al.* Suppressed power saturation due to optimized optical confinement in 9xx nm high-power diode lasers that use extreme double asymmetric vertical designs[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2018, **33**(3): 1-9.
- [23] WOOD R M, SAHA D, MCCARTHY A L, *et al.* Effects of strain and quantum confinement in optically pumped nuclear magnetic resonance in GaAs: Interpretation guided by spin-dependent band structure calculations[J]. *Physical Review B*, 2014, **90**(15): 155317: 1-12.
- [24] ZHU Hui, LIU Kun, XIONG Cong, *et al.* The effect of external stress on the properties of AlGaAs/GaAs single quantum well laser diodes[J]. *Microelectronics Reliability*, 2015, **55**(1): 62-65.
- [25] HOSTETLER J L, JIANG C L, NEGOITA V, *et al.* Thermal and strain characteristics of high power 940 nm laser arrays mounted with AuSn and In solders[C]. SPIE, 2007, **6456**: 645602.
- [26] VURGAFTMAN I, MEYER J R, RAM-MOHAN L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(11): 5815-5875.
- [27] HE Jun-sheng, ZHANG Meng, XIAO Qi-ling. Calculation of the lattice mismatch between semiconductor epitaxy and substrate[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2006, **30**(1): 63-67.
何菊生,张萌,肖祁陵. 半导体外延层晶格失配度的计算[J]. 南昌大学学报(理科版), 2006, **30**(1): 63-67.
- [28] HU H M, ZHAO Jian-yang, WANG Wei-min, *et al.* 12 W high power InGaAsP/AlGaInP 755 nm quantum well laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, **17**(6): 49-53.
- [29] FRITZ M A, CASSIDY D T. Extraction of bonding strain data in diode lasers from polarization-resolved photoluminescence measurements[J]. *Microelectronics Reliability*, 2004, **44**(5): 787-796.
- [30] SHEN Li, PI Hao-yang, XIN Guo-feng, *et al.* Experimental study on the polarization characteristics and their relation with stress in high power laser diode array[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2009, **36**(5): 1051-1056.
沈力,皮浩洋,辛国锋,等. 半导体激光器阵列偏振特性及其与应力关系的实验研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1051-1056.
- [31] YUAN Zhen-bang, WANG Jing-wei, WU Di, *et al.* Study of steady and transient thermal behavior of high power semiconductor lasers[C]. 2009 59th Electronic Components and Technology Conference, 2009, **36**(8): 831-836.
- [32] AMUZUVI C K, BULL S, TOMM J W, *et al.* The impact of temperature and strain-induced band gap variations on current competition and emitter power in laser bars[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(24): 241108.