

文章编号: 0253-2239(2010)02-0461-04

半导体激光器阵列横向波长分布与键合应力关系的研究

沈 力 辛国锋 皮浩洋 方祖捷 陈高庭 瞿荣辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 测试了半导体激光器阵列的横向波长分布。结果表明,多数阵列的波长分布出现了 V 型的“凹陷”。这一分布与器件工作温升引起的横向波长分布相反,根据半导体禁带宽度与应变关系的基本理论,说明这一波长分布反映了键合应力的状态。通过对键合应力产生机理的初步分析,提出了线性应力分布模型,很好地解释了现有的实验数据。实验和分析表明,激光器阵列横向波长分布的测量是键合应力探测的一个有用手段。

关键词 光电子学;键合应力;波长横向分布;半导体激光器阵列

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0461

Study on Lateral Distribution of Working Wavelength and Packaging-Induced-Stress in Laser Diode Array

Shen Li Xin Guofeng Pi Haoyang Fang Zujie Chen Gaoting Qu Ronghui

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The wavelength lateral distribution of high-power laser diode arrays (LDA) is tested. A V-type wavelength distribution is measured typically in the tested LDA. The measurements are carried under different driving currents, indicating that the thermal induced wavelength distribution is in protuberant shape and is opposite to the V-type. Based on the relation between stress and band-gap energy, it is show that the V-type stress distribution in LDA indicates the stress distribution in the laser chip. A linear stress distribution model is proposed to explain the experimental results. This work demonstrates that the measurement of lateral wavelength distribution can provide a useful method to detect bonding stress.

Key words optoelectronics; packaging-induced stress; wavelength lateral distribution; laser diode array

1 引 言

近年来,半导体激光器抽运的固体激光器(DPSSL)已广泛应用于国防和工业等领域^[1]。但是,对半导体激光器光束特性^[2]、光谱特性等^[3]的研究是现在国内研究的重点,而封装质量也是半导体激光器质量的重要影响因素。作为抽运光源的高功率半导体激光器,往往采用多发光单元的阵列结构(称为 Bar),其宽度一般取为 10 mm,远大于激光器的腔长(通常为 1~1.5 mm),更大于激光器芯片的

厚度(约为 0.1 mm),并用焊料键合在高热导率的热沉上。在小功率或宽条单发光单元半导体激光器中常用的铜热沉材料,就不适合于较大尺寸的 Bar 条。这是因为铜与半导体材料(主要是 GaAs)的热膨胀系数相差很大,在高温下烧结后冷却到室温,两种材料之间存在很大的应力。因此往往采用膨胀系数接近,热导率较高的铜钨合金,或氮化铝陶瓷。但是这两种材料的膨胀系数仍然不同于半导体。大键合应力的存在,将严重影响激光器的性能。一是缩

收稿日期: 2009-03-26; 收到修改稿日期: 2009-05-14

基金项目: 上海市自然科学基金(08ZR1421400)资助课题。

作者简介: 沈 力(1984—),女,硕士研究生,主要从事半导体光电器件方面的研究。E-mail: shenli621@126.com

导师简介: 瞿荣辉(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电子器件与信息系统技术等方面的研究。

短器件的工作寿命,因为键合应力会导致体内位错或其他缺陷的形成和增生;二是造成阵列器件各发光单元位置的不平整和发射方向性的差异的因素之一,表现为近远场的畸变(Smile效应);三是使阵列各发光单元激光波长的偏移,从而导致阵列器件总体输出光谱的展宽。键合应力的检验,对阵列键合应力分布的测量,是对键合应力分析的重要手段,对于封装结构和工艺的改善,器件总体性能的提高,具有十分重要的意义^[4]。

对半导体激光器阵列(LDA)的横向波长分布进行了测试,阵列各发光单元激光波长的横向分布存在高达数纳米的起伏情况。根据半导体激光器能带随应力变化的基本理论和器件键合过程的应力分析,对这种波长分布的不均匀性作了定性的解释。

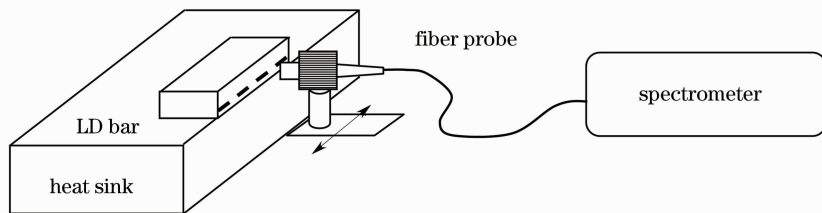


图1 波长分布测试装置示意图

Fig. 1 Diagram of apparatus for wavelength distribution measurement

实验中,被测器件为键合在水冷微通道热沉的800 nm波段的激光器阵列。芯片p面朝下焊接在热沉上,n面用金丝球焊或镀金铜箔引出。激光器芯片的键合常用焊料,有钢、铅锡和金锡等。实验中采用铅锡焊料,其硬度和焊接温度在3种焊料中都处于中间。微通道热沉由铜钨合金和无氧铜薄片键合构成,其热特性基本上决定于Cu和W组分为15:85的铜钨合金,其线膨胀系数为 7×10^{-6} ($1/^\circ\text{C}$),接近于激光器芯片GaAs材料的 5.8×10^{-6} ($1/^\circ\text{C}$)。

实验中测试的激光器为TM模式工作的芯片,芯片厚度为 $110 \mu\text{m}$,腔长1 mm,Bar条长度10 mm。器

本文的工作表明,对半导体激光器阵列激光波长横向分布的测量分析,可以为键合应力的检验和键合工艺的改进提供一种有效的分析手段。

2 实验装置及测试结果

本实验的测试装置由图1所示。光谱分析采用Ocean Optics公司HR4000型光谱仪。用光谱仪配用的单芯光缆的连接头直接作为探头,对准激光器阵列的发光面,由于激光器阵列的输出功率很高,因此不需要用任何会聚透镜,就可以收集足够强度的光信号。探头安装在三维微动平台上,平行于阵列宽度方向平移,就可以测得阵列激光波长的横向分布。

件在准连续条件下工作,驱动电流脉宽 $200 \mu\text{s}$,重复频率20 Hz,循环水温度 20°C 。图2(a)和(b)是两个器件的波长横向分布的测试结果。图中实心方块为30 A电流驱动下的波长分布;空心三角为50 A下的波长分布。由图可见,两器件的波长均呈现中间低两侧高的V字型分布。波长的变化范围分别达到3.5 nm[图2(a)]和4.0 nm[图2(b)]。器件键合前的光谱线宽比较窄,如图3(a)所示,约为2 nm。键合后用积分球对激光经多次漫反射,测得总体的光谱线宽明显加大,约为4 nm,如图3(b)所示。图2的波长横向分布的测试,给出了这一谱宽变化的原因。

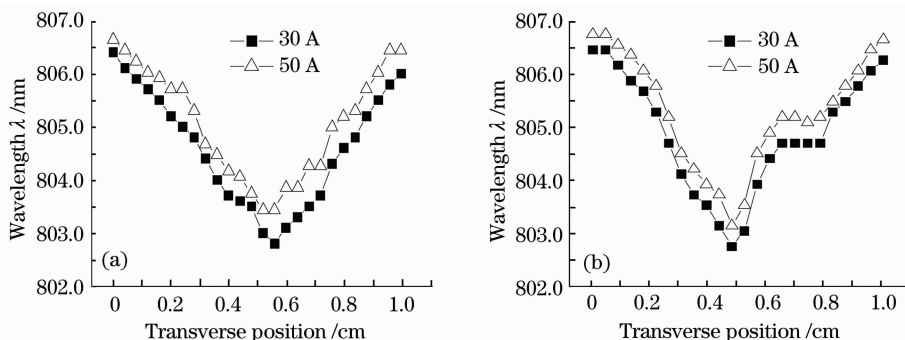


图2 两个微通道热沉半导体激光器阵列的横向波长分布

Fig. 2 Lateral wavelength distributions of two LDAs bonded on micro-channelled heat-sink

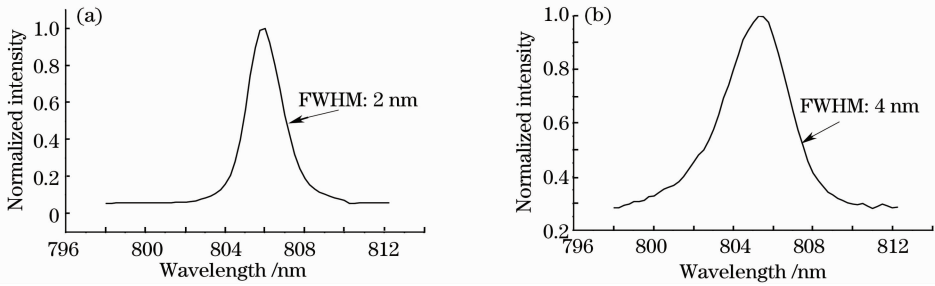


图 3 (a)半导体激光器键合前的光谱;(b)整个阵列光谱

Fig. 3 (a) Spectrum of LDA before bonding; (b) spectrum of LDA

根据激光器发射波长决定于禁带宽度的基本原理,引起波长变化的主要原因有 2 个^[5]:1)应力导致的禁带宽度变化;2)激光器工作时温度上升引起波长的红移。为了区分这两种机理,证实它们不同的影响,测量了 30 A 和 50 A 两个不同工作电流下的横向波长分布,如图 2 所示。图 4(a), (b) 分别为图 2(a), (b) 两个工作电流下波长差的分布,虚线为数据的拟合结

果。虽然数据有一定的起伏,仍然可以看到波长差呈拱形分布,中间高出两边约 0.2~0.3 nm。表明工作电流增大后阵列中间部位的温度上升大于两侧,这符合热分布的基本规律。这一数据表明,工作温升的不均匀性远小于测量到的波长不均匀性,而且分布趋势与测得的波长分布相反。因此,图 2 这种中间短两侧长的 V 型波长分布应当归因于键合应力。

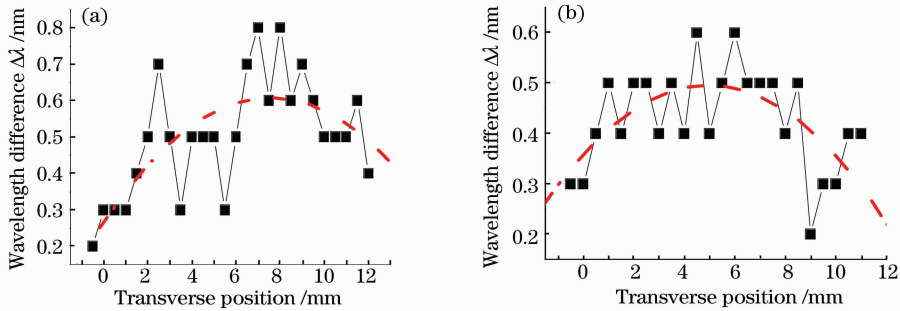


图 4 不同驱动电流下波长差的分布

Fig. 4 Distribution of wavelength difference in different drive currents

3 讨论和分析

半导体材料的禁带宽度不仅受到温度的影响,应力也会影响半导体材料的禁带宽度^[6,7],从而对波长造成影响。应力造成半导体晶格结构的形变,必然带来电子能带结构的变化。应变量子阱激光器正是基于这一机理发展起来的。在应变量子阱结构中,势阱区材料和势垒区材料有不同的晶格常数。在晶体生长时为保持晶格匹配,就必然造成晶格发生畸变。这种应变导致空穴能带结构的分裂和禁带宽度的变化。研究工作表明,在一定范围内,应力对禁带宽度的影响是线性的,压应变和张应变导致的禁带宽度变化是相反的。

在激光器阵列键合烧结过程中,由于半导体材料与热沉材料热膨胀系数的差别,带来了键合应力。为了获得高的热导率,一般热沉均采用铜或铜的合金。其膨胀系数大于半导体材料。在烧结温度下两

者键合,温度下降到室温时,热沉收缩大于芯片,因此芯片在横向处于被压缩的状态。可以想见,在两种材料的键合面上将发生如图 5 所示的应力分布。图中箭头表示应力方向。为明显起见,图中形变作了放大。由于热沉材料厚度比芯片大得多,应变主要发生在芯片上。

关于双金属片形变的分析表明,两个膨胀系数不同、厚度相当的金属片键合后的构件在温度变化

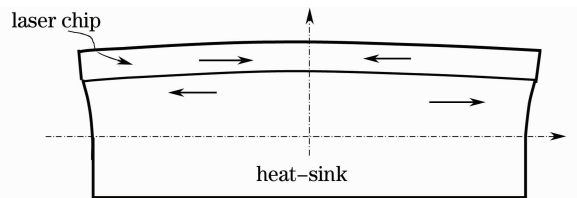


图 5 半导体激光器阵列键合后应力分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of stress distribution in a bonded LD array

时将发生弯曲,并可以用均匀的曲率来描述^[8]。在热沉很厚,芯片很薄的情况下,许多工作也根据 Stoney 公式,采用均匀曲率进行分析^[9]。文献[10]对 Stoney 公式的适用范围进行了讨论,他们导出了应变在平面内分布的函数形式,大致呈现余弦或双曲余弦型分布,这一分布可以定性的解释本实验中中间应力大于两侧的现象,但具体的分布规律仍然偏离本文实验测量到的波长分布形式。

对本文所研究器件的状态,两侧受到的应力最小,随着向中心靠拢,应力逐渐成线性增大。可以设想,这种应力分布,相当于有一定高度的一个重物在重力场中所受到的应力,呈现上小下大线性分布的情况。因此,近似地可以认为,应力正比于离开两端点的距离,即

$$\sigma_x \approx c |x - x_0|,$$

式中 c 为常数, x 为横向长度坐标, x_0 为两端点的坐标。此近似式子从两端点到阵列中点之间成立。其所引起的禁带宽度变化正比于应力^[3],这一分布形式可以很好地解释在实验中测量到的 V 字型分布特性。

以上实验结果和分析表明,激光器横向波长分布的测量是键合应力的探测的一个有用手段。实验中还测量到波长分布呈现不规则分布的情况,如图 6 所示。图 6(a)中波长呈现 W 型分布,图 6(b)呈现斜坡型分布。结合器件键合后解剖分析的经验,图 6(a)的数显示,Bar 条键合面可能存在焊料的空洞;图 6(b)的数据可能表明键合时工夹具施加的压力分布不均匀。

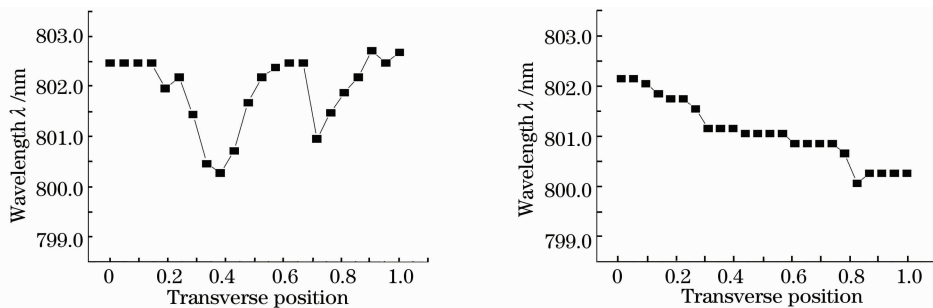


图 6 两个波长不规则分布的半导体激光器阵列

Fig. 6 Two examples of LDA with irregular wavelength distributions

4 结 论

半导体激光器封装时引入的应力不但会影响器件的长期寿命和可靠性,而且对器件应用时后续的工作增加了困难。比如,在采用体光栅压窄线宽和波长稳定时,器件发光单元的波长一致性就十分重要。因此,激光器阵列键合时,保证良好的热接触和低的键合应力,是激光器封装的基本技术要求。工作表明,激光器阵列各单元发光波长的横向分布,反映了键合的应力分布。它可以为选择热沉材料,选择键合的焊料,改进键合工艺,包括温度流程的控制和工夹具的设计,提供检验的手段。

致谢: 感谢刘庆琰、于阿滨、封惠忠等老师和同事在器件键合实验中提供的帮助。

参 考 文 献

- 1 Yang Shaohua, Huang Yun. Progress in high power semiconductor lasers life time evaluation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(6): 34~37
杨少华, 黄云. 高功率半导体激光器的寿命评价研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(6): 34~37
- 2 Gao Xin, Bo Baoxue, Zhang Jing *et al.*. High brightness operation of fiber coupling multiplex diode lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, **34**(11): 1472~1475

- 高欣, 薄报学, 张晶等. 多单元半导体激光器的高亮度光纤耦合输出[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1472~1475
- 3 Xin Guofeng, Cheng Can, Qu Ronghui *et al.*. Study of spectral characteristics of external cavity semiconductor laser volume Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1822~1826
辛国锋, 程灿, 瞿荣辉等. 体布拉格光栅外腔半导体激光器光谱特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1822~1826
- 4 Shen Li, Pi Haoyang, Xin Guofeng *et al.*. Experimental study on the polarization characteristics and their relation with stress in high power laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 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
- 5 Jens W. Tømm, Fritz Weik, Axel Gerhardt *et al.*. Transient thermal tuning properties of single emitters in actively cooled high-power cm-bar arrays[C]. *SPIE*, 2004, **5336**: 125~131
- 6 Hiromitsu Asai, Kunishige Oe. Energy band-gap shift with elastic strain in Ga_xIn_{1-x} P epitaxial layers on (001) GaAs substrates[J]. *Appl. Phys.*, 1983, **54**(4): 2052~2056
- 7 Kimio Shigihara, Yutaka Nagai, Shoichi Karakida *et al.*. Estimation of strain arising from the assembling process and influence of assembling materials on performance of laser diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(3): 1419~1423
- 8 S. Timoshenko. Analysis of Bi-metal thermostats[J]. *JOSA*, 1925, **11**(3): 233
- 9 S. Tamulevicius, S. Stress and strain in the vacuum deposited thin films[J]. *J. Vacuum*, 1998, **51**(2): 127~139
- 10 Yin Zhang, Yapu Zhao. Applicability range of Stoney's formula and modified formulas for a film/substrate bilayer[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(5): 053513. 1-7