

文章编号 1004-924X(2010)09-1951-08

高功率半导体激光器列阵封装引入应变的测量

王 焯^{1,2}, 张 岩^{1,2}, 秦 莉¹, 刘 云¹, 王立军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态开放实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 考虑高功率半导体激光器列阵在封装过程中引入的封装应变会影响激光器的功率、波长和可靠性, 对激光器封装应变的测量进行了研究。基于激光器输出光的偏振度变化可反映激光器有源区中量子阱的带隙变化, 采用电致发光谱法推导了高功率半导体激光器输出的偏振度值与有源区应变值的关系。对 800 nm GaAsP/GaInP 高功率半导体激光器列阵有源区的应变进行了测量, 测量结果与有限元模拟计算结果吻合较好。与理论计算出的有源区固有应变的对比结果显示, 激光器芯片在封装过程中受到铜热沉的压缩, 会将封装应变引入到有源区中, 并且激光器中间的封装应变大于边缘的封装应变。另外, 激光器有源区的应变起伏比较明显, 认为这是由于采用电镀方法制备的铜焊接层中存在缺陷。测量得到的最大封装应变为 1.370×10^{-3} , 缺陷密度为 40.8%。得到的结果表明, 激光器偏振度的测量能够正确反映激光器的缺陷和封装应变值, 进而可以有效衡量激光器封装质量的好坏。

关键词: 半导体激光器; 应变测量; 偏振度; 封装; 缺陷

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.1951

Measurement of packaging-induced strain in high power diode laser bar

WANG Ye^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2}, QIN Li¹, LIU Yun¹, WANG Li-jun¹

(1. *Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: As the strain caused by the packaging process of a diode laser influences on the output power, wavelength and the reliability of the high power diode laser bar, this paper researches the measurement of packaging-induced strain in the laser. On the basis of the variation of polarization degree of the output lights in the diode laser can reveal the variation of band edges of the quantum wells in active region of the diode laser bar, it deduces the dependence of the polarization degree of laser outputs on the packaging-induced strain by using electro-luminescent spectroscopy. The strain in active region of a 800 nm GaAsP/GaInP high power diode laser bar is studied and the experimental results are in good agreement with the theoretical simulation. Furthermore, the experimental results are compared with the original strain in active region of the diode laser bar, and it is found that the bar is compressed by the copper heat sink during the packaging process, and the packaging strain is induced in the active region. The packaging-induced strain at the center of the laser bar is higher than the one at the edges.

收稿日期: 2009-11-23; **修订日期:** 2009-12-11.

基金项目: 吉林省科技厅重大项目 (No. 20075001); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20086011); 装备预先研究项目 (No. 61501060108)

Moreover, the experimental strain of the bar shows more variation apparently, which can be considered as that the defects are created in the indium solder layer fabricated by electrolytic deposition method. In the experiment, the maximum strain is 1.370×10^{-3} and the defect density is 40.8%. Obtained results demonstrate that the polarization degree measurement of the diode lasers can reveal the defects and the packaging-induced strains of diode lasers accurately and can well evaluate their qualities.

Key words: diode laser; strain measurement; polarization degree; packaging; defect

1 引言

近些年来,高功率半导体激光器已经成为一种有良好应用前景的新型激光器系统,在实验室技术和工业技术方面成熟很快,已成为可以与固体激光器和气体激光器并驾齐驱的激光器系统,尤其广泛应用于工业材料处理,如焊接、切割、去锈、表面淬火和打标等方面。其中,808 nm 高功率半导体激光器可以作为固体激光器^[1-2]和光纤激光器的泵浦源,大幅提高系统的转化效率。

芯片封装工艺作为激光器制作的重要工艺,是高功率半导体激光器应用的重要限制因素,其质量严重影响半导体激光器的输出特性,如器件的功率、波长、和偏振特性,同时影响半导体激光器的可靠性和寿命^[3]。激光器在封装过程中,当热沉和激光器芯片同时从焊接温度降温至室温时,由于激光器芯片与热沉热膨胀系数的不同,芯片被热沉压缩或拉伸,会产生由封装引起的应变,并被引入到激光器有源区中。这不仅限制了激光器的输出特性和可靠性,同时还会在器件中引入“smile”效应,对半导体激光器准直、光束整形和光纤耦合^[4-5]造成困难。因此,测量封装过程引入的应变对于激光器的应用是非常重要的。目前,Tommm 和 Gerhardt 等人已经提出了几种关于封装引起应变的测量方法,如微光电流谱、光电流谱、微曲拉曼谱等^[6-13],其测量原理是通过精确测量有源区带隙能量的变化来反映器件有源区的应变变化,也就是说有源区应变的变化表明器件在封装过程中引入了封装应变。另外一种测量技术,激光束感生电流技术^[14]是用单色激光束对器件进行扫描,测量其光电流扫描图谱,进而证明激

光器的缺陷。这些方法的缺点是需要精密昂贵的测量设备,对测试技术也有较高的要求。电致发光谱^[15]是基于激光器输出光偏振度的变化来测量封装应变的一种方法。本文基于电致发光谱在理论上推导了高功率半导体激光器输出偏振度值与有源区应变值的关系。从实验上测量了 800 nm 张应变 GaAsP/GaInP 激光器列阵封装后的有源区应变值,并采用有限元法对封装后的有源区应变进行了模拟,实验测量的结果与模拟计算结果吻合较好。通过与理论计算出的激光器有源区固有应变值的比较,得到了在封装工艺中引入的应变值。同时分析了测量结果与有限元模拟结果的差别,认为这主要是由热沉上钢焊接层中的缺陷引起的,扫描电镜的测试结果证实了的分析结果。基于测量结果,提出了改进封装工艺的建议。

2 理论分析

由于铝极容易氧化,在激光器腔面处极易产生光学灾变损伤,导致激光器的寿命降低,可靠性减弱,因此,目前人们广泛使用 InGaAsP 系材料作为无铝量子阱激光器的有源区材料。但是因为 InGaAsP 系半导体材料的晶格与 GaAs 晶格不能完全匹配,在 GaAs 衬底上生长 GaAsP 量子阱时有源区会产生应变,我们将其称为有源区的固有应变,其值等于 GaAsP 和 GaAs 的晶格常数差与 GaAsP 的晶格常数的比值,即:

$$\varepsilon = (a_{\text{GaAsP}} - a_{\text{GaAs}}) / a_{\text{GaAsP}}, \quad (1)$$

激光器封装后,封装引入的应变会使有源区中量子阱的带隙发生改变,造成激光器偏振特性的变化,所以激光器的偏振度变化能够说明有源

区的应变变化,测量激光器输出光的偏振度,可以作为一种简单有效的测量激光器封装引入应变的方法。

激光器的偏振度可以表示为:

$$\rho = \frac{P_{\text{TM}} - P_{\text{TE}}}{P_{\text{TM}} + P_{\text{TE}}} = \frac{\frac{P_{\text{TM}}}{P_{\text{TE}}} - 1}{\frac{P_{\text{TM}}}{P_{\text{TE}}} + 1}, \quad (2)$$

这里, P_{TE} 和 P_{TM} 分别是横电场(TE)功率和横磁场(TM)功率。半导体激光器在高于阈值电流工作时,激光器的热分布不一致,发光单元的功率也会重新分布,此时测量的激光器偏振度值不能准确描述出激光器由封装过程引入的应变。因此,为了避免热和载流子的重新分布,实现对封装引入应变的准确测量,要求测试的半导体激光器在阈值电流以下工作。激光器在阈值电流以下工作时,增益不足以补偿腔体损耗,生成的光子不能得到净放大,激光器只有自发发射现象,因此,激光模式内的自发发射功率可以表示成^[16]

$$P(I < I_{\text{th}}) = \eta_r \eta_i \left(\frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \right) \frac{h\nu}{q} \beta_{\text{sp}} I, \quad (3)$$

式中 α_i, α_m 分别表示激光器的内部损耗和端面损耗, η_i 是内量子效率, β_{sp} 是自发发射因子,代表总自发发射进入有用模式的部分,其值等于单模自发发射速率(R_{sp})与所有模式的自发发射速率(R_{sptotal})的比值,即:

$$\beta_{\text{sp}} \equiv \frac{R_{\text{sp}}}{R_{\text{sptotal}}}, \quad (4)$$

式中 η_r 是辐射效率,定义为^[16]

$$\eta_r = \frac{R_{\text{sp}}}{\eta_i I / qV}, \quad (5)$$

式中 V 是有源区体积。可见辐射效率与内量子效率,有源区体积,自发发射速率和工作电流有关。式(3)中的内部损耗和内量子效率与激光器的模式无关。对于同一个激光器,TE模偏振和TM模偏振的内部损耗和内量子效率相同。激光器的腔面光学膜的带宽很宽,不同模式的光具有相同的反射率,所以激光器的TE模偏振和TM模偏振的端面损耗也相同。因此,TE模偏振和TM模偏振的自发发射功率的差别主要体现在自发发射速率 R_{sp} 和光子频率不同。自发发射速率可以表示为^[17]

$$R_{\text{sp}} = A \frac{m_r^*}{d\pi\hbar^2} f(E_2)(1 - f(E_1)), \quad (6)$$

式中 m_r^* 是谐振子有效质量, $m_r^* = m_c^* m_v^* / (m_c^* + m_v^*)$, d 是有源区厚度, $f(E_2), f(E_1)$ 分别是能量为 E_2 和 E_1 的费米狄拉克分布方程, A 是自发发射系数。自发发射系数和出光频率都与激光器有源区的能带带隙有关,因此TM模和TE模的功率比值也与带隙宽度有关。将式(4)~(6)代入式(3)并整理得到TM偏振和TE偏振的功率比 $P_{\text{TM}}/P_{\text{TE}}$ 为:

$$\frac{P_{\text{TM}}}{P_{\text{TE}}} = \frac{E_{q\text{TM}}^5}{E_{q\text{TE}}^5} \cdot \left(\frac{m_{v\text{TM}}^*(m_c^* + m_{v\text{TE}}^*)}{m_{v\text{TE}}^*(m_c^* + m_{v\text{TM}}^*)} \right)^2 \cdot \exp\left(2 \frac{E_{q\text{TE}} - E_{q\text{TM}}}{kT}\right), \quad (7)$$

其中, $E_{q\text{TE}}, E_{q\text{TM}}$ 分别表示激光器量子阱的到重空穴带和导带到轻空穴带的带隙,

$$E_{qj} = E_{g0} + \Delta E_j + \frac{\hbar^2}{2m_c^*} (\pi/d)^2 + \frac{\hbar^2}{2m_j^*} (\pi/d)^2, \quad j = \text{TE, TM}, \quad (8)$$

E_{g0} 是 GaAsP 材料无应变时的直接带隙, $\Delta E_{\text{TE}}, \Delta E_{\text{TM}}$ 分别表示对应于TE模和TM模的带隙位移。假设激光器有源区主要是轴向应变,忽略剪切应变张量 $\boldsymbol{\varepsilon}_{xy}, \boldsymbol{\varepsilon}_{yz}, \boldsymbol{\varepsilon}_{zx}$, 所以应变张量 $-\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{xx} = \boldsymbol{\varepsilon}_{yy}, \boldsymbol{\varepsilon}_{zz} = \frac{2C_{12}}{C_{11}} \boldsymbol{\varepsilon}$, C_{11}, C_{12} 是弹性模数。依据应变与有源区禁带变化关系^[16]推导出:

$$\Delta E_j = a_j \varepsilon + b_j \varepsilon^2, \quad j = \text{TE, TM}. \quad (9)$$

ε 是有源区的应变变量。

表1 GaAsP材料的参数^[16]

Tab.1 Parameters of GaAsP material

GaAsP material	TE polarization	TM polarization
a/eV	1.665 3	8.027 1
b/eV	0	-66.045 2
m_c^*	0.505 6 m_0	0.080 88 m_0
E_{g0}/eV	1.588 4	
m_v^*	0.104 68 m_0	

当测量出封装后激光器的偏振度时,通过对由(2),(7),(8),(9)组成的方程组求解就可以计算出封装后激光器的有源区应变值,该应变值是有源区固有应变和封装引入应变的总和。再将其与由公式(1)计算出的有源区的固有应变相比较,就可以得到由封装引入的应变值。对于实验器件 GaAsP/GaInP 半导体激光器列阵,计算中所用到的参数如表1所示。

3 器件封装及实验测量

实验器件采用 800 nm 张应变 GaAsP/GaInP 半导体激光器阵列。激光器芯片外延结构如图 1 所示。激光器外延芯片由 MOCVD(金属有机化学气相沉积)生长在 n 型 GaAs 衬底上, GaAs_{0.86}P_{0.14} 单量子阱厚度为 10 nm, 镶嵌在未掺杂的波导层 Ga_{0.51}In_{0.49}P 中间, 两波导层的厚度均为 0.5 μm, 在波导层两端是对称的厚度为 1 μm 的 Al_{0.3}Ga_{0.21}In_{0.49}P 限制层, 上限制层顶端相继生长 500 nm 的 GaInP 腐蚀阻挡层和 100 nm 的 P⁺ 型 GaAs 欧姆接触层。芯片尺寸是 ~110 μm(*z* 方向, 厚度)×1 mm(*y* 方向, 腔长)×1 cm(*x* 方向, 总横向长度)。激光器芯片包含 49 个发光点, 发光条宽 100 μm, 周期 200 μm。p 面朝下焊接在铜热沉上, 铜热沉上的铜焊接层采用电镀方法制备。芯片焊接是用 Diomount MKIII 高精度半导体激光器焊接系统完成的。图 2 描述了激光器的功率-电流-电压(*P-I-V*)曲线。铜热沉 25 °C, 激光器在工作电流为 72.0 A 时, 连续输出功率达到 60 W, 阈值电流为 14 A, 斜率效率为 1.03 W/A。图 3 是输出功率为 60 W 时的光谱曲线, 中心波长为 799.7 nm, 光谱半高全宽为 2 nm。

GaAs contact layer
GaInP confinement layer
AlGaInP cladding layer
GaInP waveguide layer
GaAsP SQW
GaInP waveguide layer
AlGaInP cladding layer
GaAs buffer layer
GaAs substrate

图 1 800 nm 半导体激光器外延芯片结构

Fig. 1 Epitaxial structure of 800 nm semiconductor laser diode

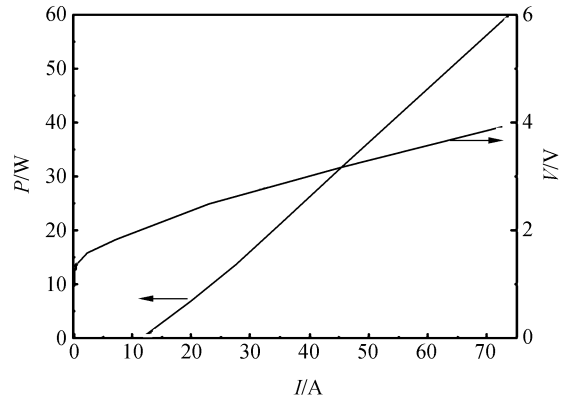


图 2 800 nm 激光器阵列的功率-电压-电流特性曲线
Fig. 2 Power-current-voltage curves of diode laser bar at 800 nm

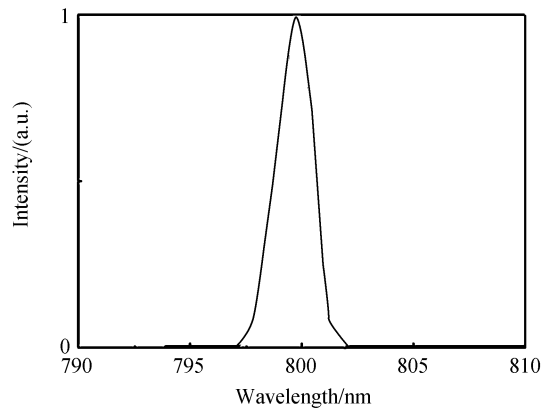


图 3 800 nm 激光器的光谱曲线
Fig. 3 Spectrum of diode laser bar at 800 nm

在测量激光器阵列有源区应变过程中, 所加工作电流 $I=4.2$ A(仅为阈值电流 I_{th} 的 0.3 倍), 满足激光器的自发发射条件。激光器通过一个可调整的高精度温度控制器控温在 25 °C, 控温误差为 ± 0.2 °C。用一个偏振分光棱镜将输出光束分束成 TE 偏振光和 TM 偏振光, 用 Spectra-Physics 404 功率计分别接收光功率。实验校准过程利用 He-Ne 激光器, 将激光器发出的光照射到器件前腔面后反射, 通过反射光束的形状及位置校正功率计的位置。为了测量激光器横向的多个发光单元的偏振度, 利用孔径光阑(孔径尺寸为 200 μm)拦截其余光得到单个发光单元。移动器件依次完成单个发光单元的功率测量, 移动步长是 200 μm。

4 实验结果与分析

图 4 是铜热沉 25 °C 时沿着 GaAsP/GaInP 激光器阵列的 49 个发光单元的 TE 偏振和 TM 偏振的功率曲线。图 5 是根据图 4 的数据按照公式(2)计算得出的激光器 49 个发光单元的偏振度。使用图 5 中的数据,求解由公式(2),(7),(8),(9)组成的方程组,计算出封装后激光器有源区的应变值如图 6 中的虚线所示。

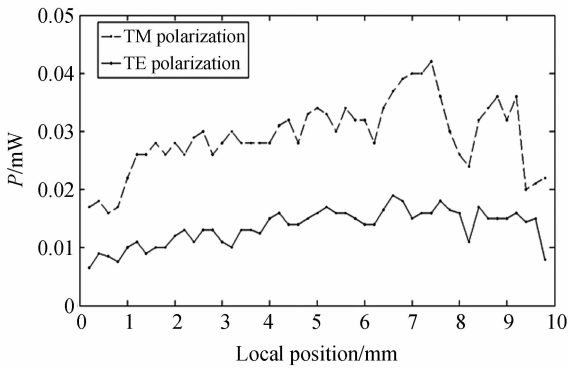


图 4 铜热沉 25 °C 时沿着封装后 GaAsP/GaInP 激光器阵列的 49 个发光点的 TE 偏振(实线)和 TM 偏振(虚线)的功率曲线。

Fig. 4 Power curves of TE (full line) and TM (dashed line) polarizations of emitters along the GaAsP/GaInP laser bar after packaging process at a copper heat sink temperature of 25 °C

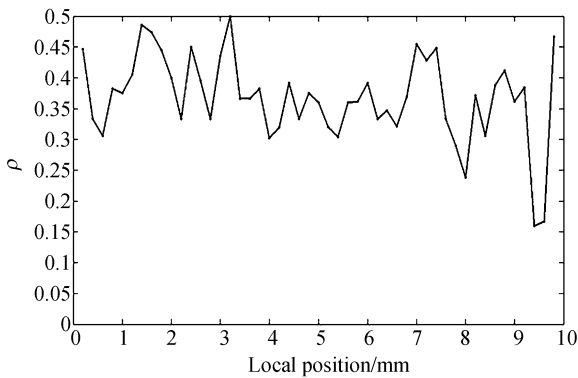


图 5 铜热沉 25 °C 时横向位置与偏振度(ρ)的变化曲线。图中的结果由图 4 的数据计算得出

Fig. 5 Polarization degree (ρ) versus local position at a copper heat sink temperature of 25 °C. The result presented in this figure is determined from the data shown in Fig. 4.

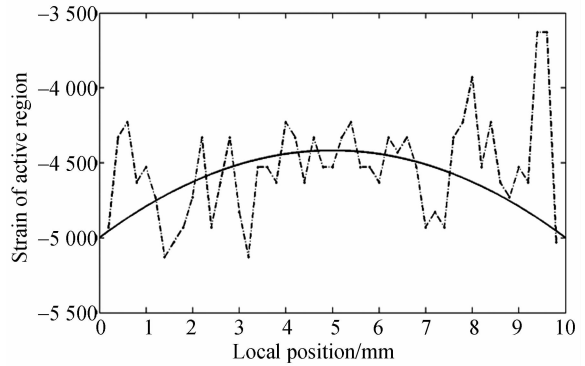


图 6 铜热沉 25 °C 时横向位置与激光器有源区应变的变化(虚线),这些数据与有限元方法模拟的激光器应变曲线(实线)基本一致。

Fig. 6 Spatial variation (dashed line) of the strain in active region of diode laser bar versus local position at a copper heat sink temperature of 25 °C. These data are in agreement with calculated strain profile basically(full line).

本文采用有限元法对封装后有源区的应变进行了模拟。图 6 中的实线是理论模拟的有源区应变曲线。铜热沉和激光器芯片采用弹性实体单元模型,铜焊接层(10 μm)采用塑性实体单元模型。模拟计算中做如下假设:(1)考虑到激光器剪切应变对有源区带隙变化很小,同时为了计算晶体沿 x 轴方向的应变($\Delta x/x$),假设激光器在外延层方向的应变主要是轴向应变^[11],不考虑剪切应变。实际上剪切应变 $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}$ 是存在的。(2)假设 $x = 0$ mm 和 $x = 10$ mm 处封装应力完全释放^[11,13],即边缘处的封装应变为 0。

从图 6 中可以看出,除去波动比较大的发光单元以外,通过偏振度测量计算出的有源区应变与模拟计算出的结果比较吻合。激光器中心的应变绝对值相对较小(即中心的应变较小),使得激光器中心量子阱导带到重空穴带和到轻空穴带的带隙减小,并使重空穴带和轻空穴带之间的劈裂减小,从而增加了重空穴带的态密度分布,所以 TE 偏振的功率增加,偏振度减小。因此,偏振度是一个测量有源区应变的有效参数,通过测量偏振度的变化可以测量出有源区应变的变化,从而衡量激光器封装质量的好坏。

将图 6 中虚线的数据与由公式(1)计算出的激光器有源区固有应变 $-5\ 000 \times 10^{-6}$ (GaAs_{0.86}P_{0.14} 晶格常数 0.562 42 nm, GaAs 晶格常数

0.565 33 nm^[16])相比较,就可以得出激光器在封装过程中引入的应变值。封装过程中由于激光器芯片被铜热沉压缩,所以器件中间部分被引入的封装应变最大。图 6 中虚线部分在 $x=0.2$ mm 和 $x=9.8$ mm 的应变值接近于有源区固有应变值,说明器件边缘处的封装应变很小,边缘的封装应力释放完全,证实了假设式(2)是成立的。

从图 6 可以看到,还有一些发光单元测量出的有源区应变值(虚线)与模拟结果(实线)存在较大的差距,本文认为这可能是由于在铜热沉上采用电镀方法制备的铟焊接层中存在缺陷的缘故,例如空洞、裂缝或气泡。因为在焊接过程中,缺陷会阻止周围区域的热应力的释放,从而导致引入有源区的封装应变发生较大波动。这些缺陷会造成激光器的热阻变化,在焊接层产生脆弱的区域,加速激光器寿命的衰减。这也是采用电镀方法制备铟焊接层的不利因素之一。

为了证实以上分析,在 10 个铜热沉上采用相同的电镀条件制备了相同的铟焊接层,这些铜热沉经历了与 GaAsP/GaInP 激光器列阵封装时相同的升温降温过程,然后对它们进行扫描电镜测试,结果在所有的铟焊接层中都发现了缺陷的存在。图 7 是存在缺陷较多的 4 张铜热沉上铟焊接层的扫描电镜照片。从图 6 中可以发现,由于铟焊接层存在缺陷,有源区的最大应变值为 -3.630×10^{-6} ,该值是有源区固有应变和封装引入应变的总和,因此,导致封装引入应变的最大值达到了 $-3.630 - (-5.000) = 1.370 \times 10^{-3}$ 。从图 6 的虚线的数据看出, GaAsP/GaInP 激光器列阵有 20 个发光单元受到缺陷的影响,换句话说缺陷密度达到 $20/49 = 40.8\%$ 。同时,铜热沉边缘处出现缺陷的概率相对大些,这可能是因为铟焊料在铜热沉边缘的均匀性更差些。

铟焊料属于软焊料,具有良好的延展性,可以补偿铜热沉材料和 GaAs 材料的热膨胀系数失配,所以铟焊接技术现在已经广泛应用于半导体激光器的焊接工艺中。通过对 GaAsP/GaInP 量子阱激光器的应变测量,发现了铟焊料不能完全消除封装应变,因此,封装引起的应变不可避免地被引入到激光器的有源区内。激光器封装引入的应变主要与激光器芯片的衬底材料与热沉材料的热膨胀系数差值及焊接温度与环境温度的温差值有关^[9],同时还和铟焊接层中的缺陷及采用的封

装工艺过程有关。要减小封装应变,可以通过以下方法实现,(1)优化铜热沉材料,例如在铜中加入钼或钨等优化热膨胀系数;(2)减小其与 GaAs 材料的热膨胀系数差;(3)减少铟焊接层中的缺陷,例如采用热蒸发的方法制备铟焊接层;优化封装工艺流程,例如焊接前对铟焊接层进行预热,适当增大封装所用夹具的压力。

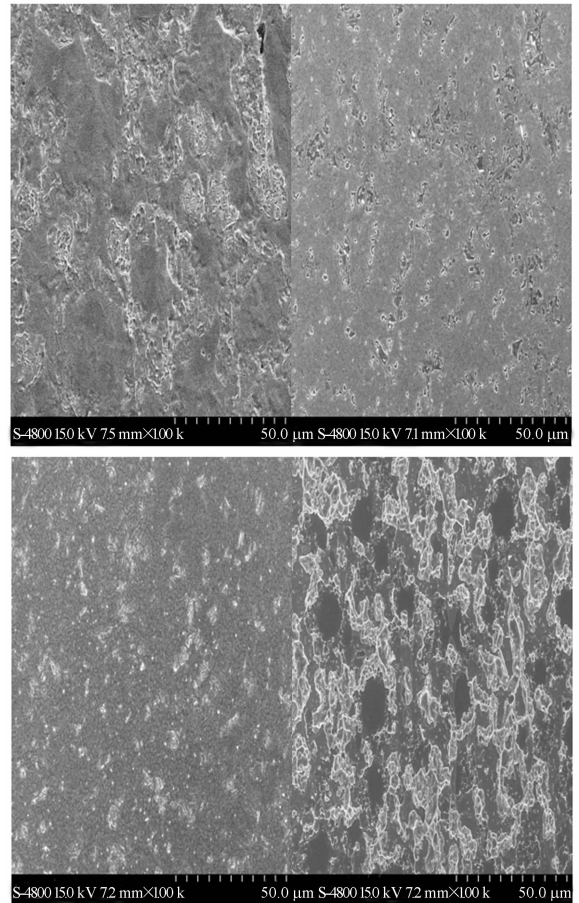


图 7 铜热沉上铟焊接层的扫描电镜照片

Fig. 7 SEM micrographs of indium solder layers on copper heat sinks.

5 结 论

本文基于电致发光谱的方法,在理论上推导了高功率半导体激光器偏振度值与有源区应变值的关系,通过测量激光器的偏振度定量计算出半导体激光器封装引入的应变,提出了一种衡量激光器封装质量好坏的非常简便有效的方法。通过对 800 nm GaAsP/GaInP 高功率半导体激光器列阵的有源区应变进行测量后发现,激光器在封

装过程中,激光器芯片被铜热沉压缩,导致激光器中间的封装应变比边缘的封装应变大,激光器边缘应力能够完全释放。同时,测量的激光器有源区的应变起伏比较明显,经分析认为这是由于采用电镀方法制备的铜焊接层中存在缺陷的缘故,通过对10个铜热沉上采用相同的电镀条件制备

的铜焊接层进行扫描电镜测试,结果证实了上述分析的正确性。封装应变实验测量出的最大的封装应变为 1.370×10^{-3} ,缺陷密度为 40.8%。激光器偏振度的测量能够正确反映出激光器的封装应变值和缺陷,进而可以有效衡量激光器封装质量的好坏。

参考文献:

- [1] 李隆,董武威,史彭,等. 激光二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 板条的热效应[J]. 光学精密工程,2008,16(11):2120-2126.
LI L, DONE W W, SHI P, *et al.*. Thermal effect of diode bar side-pumped Nd : YAG slab[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2120-2126. (in Chinese)
- [2] 宋晏蓉,胡江海,周劲峰,等. 半导体可饱和吸收镜调 Q 的 Yb: LSO 激光器[J]. 中国激光,2006,33(10):1298-1230.
SONG Y R, HU J H, ZHOU J F, *et al.*. Laser diode-pumped Q-switched Yb : LSO laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33 (10) : 1298-1230. (in Chinese)
- [3] MA X Y, LI Z. Advances in high power semiconductor diode lasers [J]. *SPIE*, 2007, 6824: 682402-1- 682402-16.
- [4] 顾媛媛,冯广智,单肖楠,等. 808nm 和 980nm 半导体激光迭阵波长耦合技术[J]. 光学精密工程,2009,17(1):8-13.
GU Y Y, FENG G Z, SHAN X N, *et al.*. 808 nm and 980 nm high power laser diode stack with wavelength coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):8-13. (in Chinese)
- [5] 赵崇光,宁永强,刘洋,等. 双包层 Yb/Er 共掺光纤放大器的数值模拟[J]. 光学精密工程,2008,16(8):1349-1353.
ZHAO C G, NING Y Q, LIU Y, *et al.*. Numerical analysis of Yb/ Er co2doped double cladding fiber amplifier[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(8): 1349-1353. (in Chinese)
- [6] XIA R, LARKINS E C, HARRISON I, *et al.*. Mounting-induced strain threshold for the degradation of high-power AlGaAs laser bars [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett*, 2002,14(7):893-895.
- [7] MARTIN P, LANDESMAN J P, MARTIN E, *et al.*. Micro-photoluminescence mapping of packaging-induced stress distribution in high-power Al-GaAs laser diodes [J]. *SPIE*, 2000,3945:308-316.
- [8] TOMM J W, MÜLLER R, BÄRWOLFF A, *et al.*. Direct spectroscopic measurement of mounting-induced strain in high-power optoelectronic devices [J]. *Appl. Phys. Lett*, 1998,73(26):3908-3910.
- [9] TOMM J W, MÜLLER R, BÄRWOLFF A, *et al.*. Spectroscopic measurement of packaging-induced strains in quantum well laser diodes [J]. *J. Appl. Phys*, 1999,86(3):1196-1201.
- [10] TOMM J W, B? RWOLFF A, ELSAESSER T, *et al.*. Selective excitation and photoinduced bleaching of defects in InAlGaAs/GaAs high-power diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2000,77(5):747-749.
- [11] 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.
- [12] TOMM J W, GERHARDT A, LORENZEN D, *et al.*. Diode laser testing by taking advantage of its photoelectric properties [J]. *SPIE*, 2002,4648:9-21.
- [13] GERHARDT A, WEIL F, QUOCTRAN T, *et al.*. Device deformation during low-frequency pulsed operation of high-power diode bars [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2004,84(18):3525-3527.
- [14] TOMM J W, QUOCTRAN T, ZIEGLER M, *et al.*. Degradation behavior and thermal properties of red (650 nm) high-power diode single emitters and laser bars [J]. *SPIE*, 2007,6456:645606-1-645606-7.
- [15] TOMM J W, GERHARDT A, M? LLER R, *et al.*. Spatially resolved spectroscopic strain measurements on high-power laser diode bar [J]. *J. Appl. Phys*, 2003,93(3):1354-1362.
- [16] 拉里·A·科尔德伦,斯科特·W·科尔津. 二极

管激光器与集成光路[M]. 史寒星译. 北京:北京邮电大学出版社,2006.

COLDREN L A, CORZINE S W. *Diode lasers and photonic integrated circuits* [M]. SHI X H translated, 2006. (in Chinese)

[17] 杜宝勋. 半导体激光器原理[M]. 北京:兵器工业出版社,2004.

DU B X. *The Principle of Diode Lasers* [M]. Beijing: Weapons & Industry, 2004. (in Chinese)

作者简介:



王 焜(1981—),女,吉林双阳人,博士研究生,2001年于长春理工大学获得学士学位,主要从事高功率半导体激光器热特性的研究。E-mail: wy19812005@163.com



刘 云(1960—),女,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,1983年于长春光机学院获得学士学位,主要从事大功率半导体激光器应用技术的研究。E-mail: hx5252@sohu.com

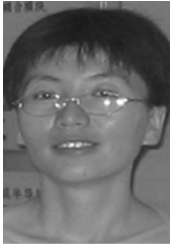


张 岩(1982—),男,河北秦皇岛人,博士研究生,主要从事高功率垂直腔面发射激光器的研究。E-mail: qhdzhangyan@126.com



王立军(1946—),男,吉林舒兰人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及应用的研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

导师简介:



秦 莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,研究员,硕士生导师,1999年于吉林大学获得博士学位,主要从事大功率半导体激光器设计及应用的研究。E-mail: qinlicomp@yahoo.com.cn