

文章编号: 0258-7025(2009)05-1051-06

# 半导体激光器阵列偏振特性及其与应力关系的实验研究

沈 力 皮浩洋 辛国锋 封惠忠 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** 半导体激光器阵列(LDA)封装过程中引入的应力是影响器件阈值电流、光束特性和寿命的重要因素,需要一种简单有效的测试半导体激光器阵列应力的方法评估检测器件封装的质量。分析了应力改变电荧光偏振度(DOP)的一系列理论机制,并通过条形激光器阵列在荧光条件下偏振特性的测量,研究了几种不同封装形式的条形激光器阵列的荧光偏振度随外加应力的变化性质。实验表明,半导体激光器阵列的偏振特性随驱动电流的增加变化明显,尤其是在阈值电流附近,偏振特性急剧变化。当有局部外力作用器件时,器件的荧光偏振度分布明显变化。通过对多个不同材料封装器件的荧光偏振度测试比较,发现不同的材料和封装形式对管芯引入的封装应力有明显的差别。

**关键词** 半导体激光器; 偏振度; 阵列; 应力; 荧光

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1051

## Experimental Study on the Polarization Characteristics and Their Relation with Stress in High Power Laser Diode Array

Shen Li Pi Haoyang Xin Guofeng Feng Huizhong

Fang Zujie Chen Gaoting Qu Ronghui

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

**Abstract** The packaging induced stress is the main factor impacting the threshold current, the characteristics of laser, and the life time of laser diode arrays (LDA). A method is imperative to measure the packaging induced stress in the LDA. The basic theory of stress affecting the electro-fluorescence degree of polarization (DOP) of LDA is stated. Electro-fluorescence DOP of high power LDA is measured. Results show that the DOP of LDA change obviously when the driving current grows. LD arrays in different packaging ways are tested. The DOP of the LDA under test is sensitive to stress. When pressure is applied to the center of the array, the distribution of DOP along the array undulates acutely. According to the DOP test of a lot of components, some characteristics within big package-induced-stress are obtained. The result shows that the distribution of stress induced by different materials and different packaging ways is distinctive from each other.

**Key words** laser diode; degree of polarization; array; stress; electro-fluorescence

## 1 引 言

高功率半导体激光器由于其小体积、高效率、长寿命、大功率等诸多优点,被广泛应用于国防军事、工业加工等许多领域。封装质量是半导体激

光器质量的重要影响因素,其中,对高功率半导体激光器阵列(LDA)热分析是现在相关文献讨论的重点<sup>[1~4]</sup>。但是,在半导体激光器阵列的封装过程中,由于热沉材料与管芯的膨胀系数的差异,会对

收稿日期: 2008-07-11; 收到修改稿日期: 2008-11-11

基金项目: 上海市自然科学基金(08ZR142400)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方面的研究。

E-mail: rhqu@siom.ac.cn

阵列引入额外的应力,对激光器的阈值电流、偏振等特性造成影响,从而降低激光器的寿命。应力会造成阵列中各发光单元的相对位移,使得本来平直的阵列发生了“弯曲”,影响了发射光束的质量,增加了后端准直、耦合的难度。所以,测量封装过程中引入的应力,进而指导封装工艺的改进,具有十分重要的意义。

本文采用检偏器和 CCD 相机,测试了荧光条件下半导体激光器线阵的偏振特性,利用荧光偏振特性和应力的关系,研究了器件受应力的影响。研究表明,半导体激光器阵列在外加压力的作用下,在阵列的长度方向,偏振度(DOP)分布明显变化,相应位置偏振度减小。通过 CCD 测试电荧光偏振度的方法,比较了固体铜散热器(CS)封装和多层材料微通道封装对管芯引入的应力,发现不同的材料和封装形式对管芯引入的封装应力有明显的差别。采用荧光偏振度的方法获得半导体激光器内部应力分布的信息,具有简单、快捷的特点;可以对封装引入的应力分布进行检测,从而反馈指导封装工艺。

## 2 测试原理分析

对半导体激光器应力的测试方法很多,已有文献报道采用微区拉曼光谱法、微区光荧光光谱法、光生电流光谱法、偏振相关电荧光法等<sup>[5~7]</sup>。微区拉曼光谱法和微区光荧光光谱法都需要采用一个聚焦的激发光照到被测区域,用相应的光谱仪分析光谱数据,从而得到应力的信息,该聚焦光的热效应对

被测器件造成不良影响。光生电流光谱法利用的是器件的光电转换效应,该方法用傅里叶变换光谱仪产生的各种波长的光被照射到试样上,然后探测产生的电流,得到一张光电流与输入波长的关系图,利用曲线拟合探测到相关的光跃迁,从而建立和应力的关系。这几种方法要得到每一个被测点的应力都需要分析一个图谱的值,数据量很大。偏振相关电荧光测试法是给器件注入极小的电流,探测器件 TM 和 TE 模式的光,得到偏振度的值。这种方法只需要测定两个光强值就可以判定某点的应力情况,和微拉曼、微光荧光、微光生电流光谱方法需要整个光谱的数据相比很有优势。所以电荧光偏振度的测试方法十分快捷,而且并不需要诸如拉曼光谱仪、傅里叶变换光谱等昂贵设备。

对半导体激光器引入应力会影响半导体材料的能带结构,从而改变光的偏振特性,如图 1 所示<sup>[8]</sup>。

在没有应变的量子阱层能带结构中,价带的顶部是重空穴带(HH),其次是轻空穴带(LH),由于辐射复合发生在最近的导带和价带的跃迁之间,即  $e_1$ :HH1 之间,这种跃迁对应的偏振类型是 TE 模式。当引入了平行于结平面的压应变时(如图 1(b)),则 HH 提升,LH 下降。这种应变越大,HH 和 LH 之间的能量分离就会越大。同样这样的能带间跃迁对应的是 TE 模式。而当在量子阱层引入了张应变(如图 1(c)),且该应变达到一定大小时,LH 会上升到 HH 之上。此时,就可以得到 TM 偏振的光子。

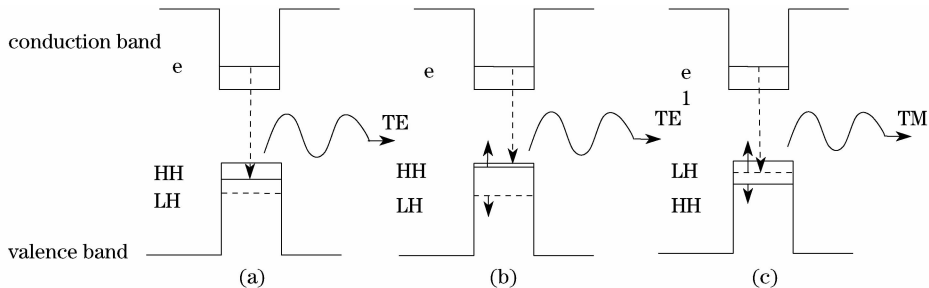


图 1 能带结构受应变影响示意图。(a)没有应变;(b)水平方向压应变时;(c)水平方向张应变时

Fig. 1 Schematic description of the energy band structure and the optical field polarization influenced by strain

(a) Without strain; (b) With compressive stress in horizontal direction; (c) With tensile stress in horizontal direction

在普通的双异质结材料中,增益是偏振无关的。在应变量子阱材料中,由于晶格失配可以给有源区造成压应变或张应变,从而改变了能带结构,使重、轻空穴带的相对位置发生变化,激光增益就具有偏振相关性。研究表明<sup>[9]</sup>,在压应变或无应变时,价带顶的子带顶是重空穴带,注入空穴大部分占据  $E_{HH1}$

能级,相应的动量矩阵元平方值大,复合发射的光跃迁有利于 TE 模,其增益就比 TM 模大,从而使激光模式为 TE。

半导体激光器的偏振特性主要由两个因素决定,一是量子阱材料增益的偏振依赖性,二是激光腔模式的偏振特性。由于材料生长的均匀性,可以认

为在未经封装的半导体激光器芯片中,偏振度在整个 bar 条内是均匀的。由于焊接温度以及管芯与热沉两种材料的膨胀系数不同等因素,在 bar 条焊接到热沉上时,温度的变化会引入应变<sup>[10]</sup>

$$\varepsilon = \Delta\alpha \cdot \Delta T, \quad (1)$$

式中  $\Delta\alpha$  是热沉和管芯的膨胀系数的差别,  $\Delta T$  是烧结过程中最高温度和室温之差。(1)式的计算并没有考虑焊料的影响以及热沉和管芯结构的影响。所以从(1)式计算的管芯每个部位的应变相等。事实上并非如此,两者之间有较软的焊料,会减小应变,同时由于器件的长条结构,bar 条不同位置的应变会不相同。

通过测量半导体激光器的偏振特性可以直接反应其受到的应力情况,半导体激光光束的偏振特性可用偏振度描述

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

式中,  $I_{TE}$ ,  $I_{TM}$  分别表示 TE 模和 TM 模的光强,可以用一个检偏器和探测器测量得到。如上所述,芯片内部的应变导致发射光束偏振度的变化,近似地可以表示为:  $\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \propto \kappa\rho$ , 式中  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  分别表示平行于和垂直于激光器结平面方向上的应变,  $\kappa$  为一个比例系数。激光器在高于阈值工作时,由于激光振荡的作用,偏振度大为加强,激光器波导的作用也将起更大的作用。为了用偏振度来反应芯片由于封装因素带来的应变状态,应当避免激光振荡带来的影响。因此需要在阈值以下极小的电流驱动下测量荧光的偏振特性。

### 3 实验方案及装置

由于材料的应力状态会改变增益的偏振相关性,因此在激光器键合和封装时引入的应力将会改变激光器的偏振特性<sup>[9]</sup>。激光器芯片在材料生长过程中会引入应力,从而造成荧光偏振,可以认为材料生长的均匀性使偏振度在没有封装的 bar 条中是分布均匀的。因此可做如下假设:封装后器件的偏振不均匀分布是由于封装过程中引入的应力造成的。本工作正是基于这一假设对激光器的偏振特性进行测量研究。

被测器件包括 CS 封装、“三明治”(SW)封装和微通道封装形式的激光器阵列。CS 封装即将芯片直接焊接在一个较大体积的铜热沉上;“三明治”封装形式是指芯片上下两面用与管芯材料热膨胀系数接近的金属材料进行键合的封装形式,微通道封装

形式是将管芯 p 面朝下用焊料焊接在微通道热沉上,负极通过 Au 丝或镀金金属箔引出。本工作所用阵列长度为 10 mm。

实验的偏振度测试装置如图 2 所示。激光光束或阈值下的荧光光束经过偏振片,照射到 CCD 相机上,CCD 数据由一个 PC 机采集。然后将偏振片旋转  $90^\circ$ ,再作记录。CCD 相机距离激光器约 30 cm,因此测量的光束偏振度属于近轴光线的偏振度。记录的结果经过计算机程序的处理,得到偏振度的值。该方法具有直观、快捷的特点。

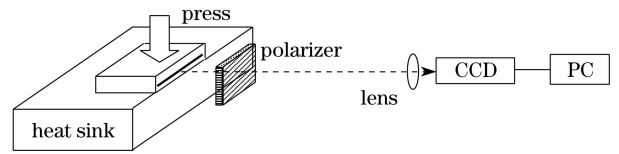


图 2 偏振度测试装置示意图

Fig. 2 Apparatus for degree of polarization measurement using CCD

## 4 实验结果及分析

### 4.1 偏振度和电流关系的测试

在重复频率 50 Hz,脉宽  $200 \mu\text{s}$  驱动电流,环境温度  $20^\circ\text{C}$  的条件下,分别测量了两种器件 TE 和 TM 分量的  $P-I$  曲线,然后利用公式(2)经过计算得到偏振度随电流的变化曲线,如图 3 所示。

从图 3 可以看到,在三明治和微通道两种封装形式下,当工作电流低于阈值电流时偏振度随着电流的增加而明显增大,当工作电流在阈值以上时偏振度基本恒定。对于 SW 封装形式,驱动电流从 15~40 A 变化(即在阈值以上)时,偏振度基本恒定,约在 0.87。但在阈值以下,偏振度在 0.6 附近,而且偏振度在阈值电流附近急剧上升,从 0.60 增加到了 0.90。对于微通道封装器件,变化趋势与 SW 封装形式相似,在阈值以下时偏振度在 0.45 附近,在阈值附近从 0.45 上升到 0.90,在阈值以上就稳定在 0.8 附近。

在电流接近和大于阈值时,器件的偏振相关损耗和偏振相关增益(包括材料特性、波导作用和腔面反射率的因素)在激光振荡的作用下被反复放大,导致激光输出的偏振度大大加强。在这种状态下,封装应力的影响将会被掩盖,或者被畸变。但是在阈值电流以下,偏振度是激活区所受到的应力的灵敏函数<sup>[10]</sup>。所以要测量半导体激光器的应力,需要测量在荧光条件下的偏振度,而且驱动电流尽量低于阈值电流<sup>[11]</sup>。

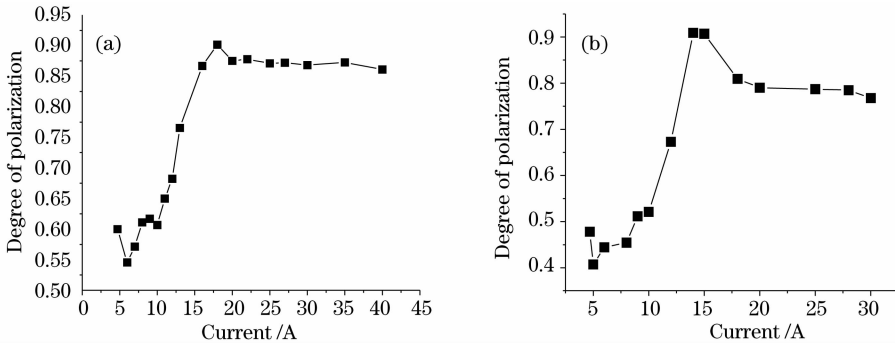


图3 偏振度随电流的变化曲线。(a) SW 封装激光器;(b) 微通道封装激光器  
Fig. 3 Curve of degree of polarization as a function of current. (a) SW packaged LDA;  
(b) Micro-channel packaged LDA

#### 4.2 偏振度和应力的关系

对上述两种封装的器件在连续电流驱动模式下,用图1所示的实验装置对其荧光的偏振度进行测试。实验中,器件工作电流为20 mA,比阈值电流低近一个数量级。对激光器阵列的中间部分局部加压力,两种封装的器件都可以看到偏振度有如图4所示的变化趋势。

从图4(a)和(b)中可以看出,对于TE模的激光器阵列,当没有外加压力时,在整个阵列内的偏振度大于零,表明荧光状态下已经有较为明显的偏振特性。当增加压力时,整个阵列内偏振度出现了不均匀,在施加压力的部位偏振度减小,并呈现“W”形状。即在加压力的两边,偏振度有一个明显的“凹陷”,比直接加压的地方下降更大。

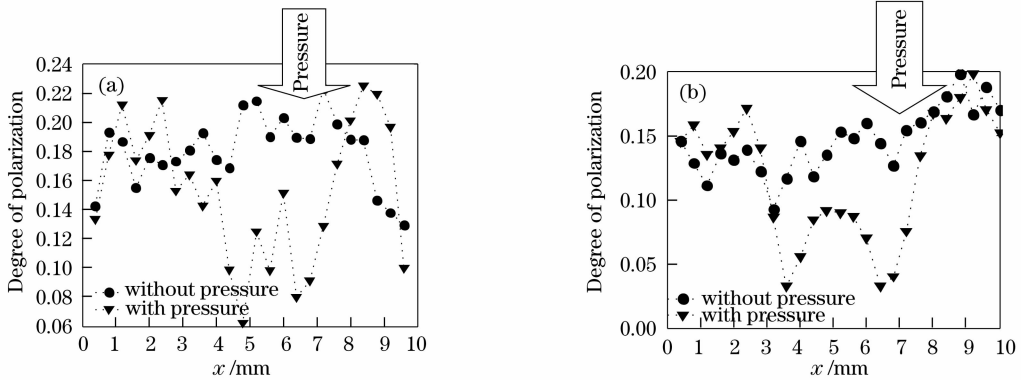


图4 偏振度和外加压力的关系。(a) SW 封装激光器阵列;(b)微通道封装激光器阵列  
Fig. 4 Degree of polarization distribution of LD arrays with and without pressure  
(a) SW packaged LD array; (b) Micro-channel packaged LD array

偏振度的变化可以表示为:  $\Delta\rho(x) \propto \Delta\epsilon_{xx} - \Delta\epsilon_{yy}$ 。在阵列中点受压的情况下,其应变情况可以大致地描述如下:在直接受压点之下,芯片受到垂直方向的压应变,即  $\Delta\epsilon_{yy}(0) < 0$ 。但是平行于结平面方向的应变很小,  $\Delta\epsilon_{xx}(0) \approx 0$ 。两者之差  $\Delta\epsilon_{xx}(0) - \Delta\epsilon_{yy}(0) > 0$ 。而在受压点的两侧,也存在垂直方向的压应变,但逐步减弱。另一方面,芯片将发生弯曲。激光器的有源区在芯片的下部,这一弯曲将导致平行于结平面的拉伸。以  $\delta x$  表示受压点两侧的位置,有  $\Delta\epsilon_{xx}(\delta x) > 0$ ,同时有  $\Delta\epsilon_{yy}(0) < 0$ 。由此可以定性地得出,  $[\Delta\epsilon_{xx}(\delta x) - \Delta\epsilon_{yy}(\delta x)] > [\Delta\epsilon_{xx}(0) - \Delta\epsilon_{yy}(0)]$ 。在离开受压点远处,可以设想有  $\Delta\epsilon_{xx} \approx$

$\Delta\epsilon_{yy} \approx 0$ ,就没有明显的偏振度变化。

此实验表明,对于半导体激光器,应力和电荧光偏振度之间确实存在一定关系,荧光偏振度对应力的敏感特性可以作为测试激光器阵列的重要指标。

#### 4.3 阵列偏振度分布

利用上述测试方法对多个微通道封装形式和CS封装形式的偏振度进行了测量,所用的管芯为TE模式,都有25个发光单元。图5是两个器件两个偏振的强度分布和偏振度分布(图中,不同发光点的强度起伏是发光点自身强度分布造成的,这种起伏造成了在每个发光点范围内也有偏振度起伏,这种偏振度起伏并不是本文所讨论应力的结果)。

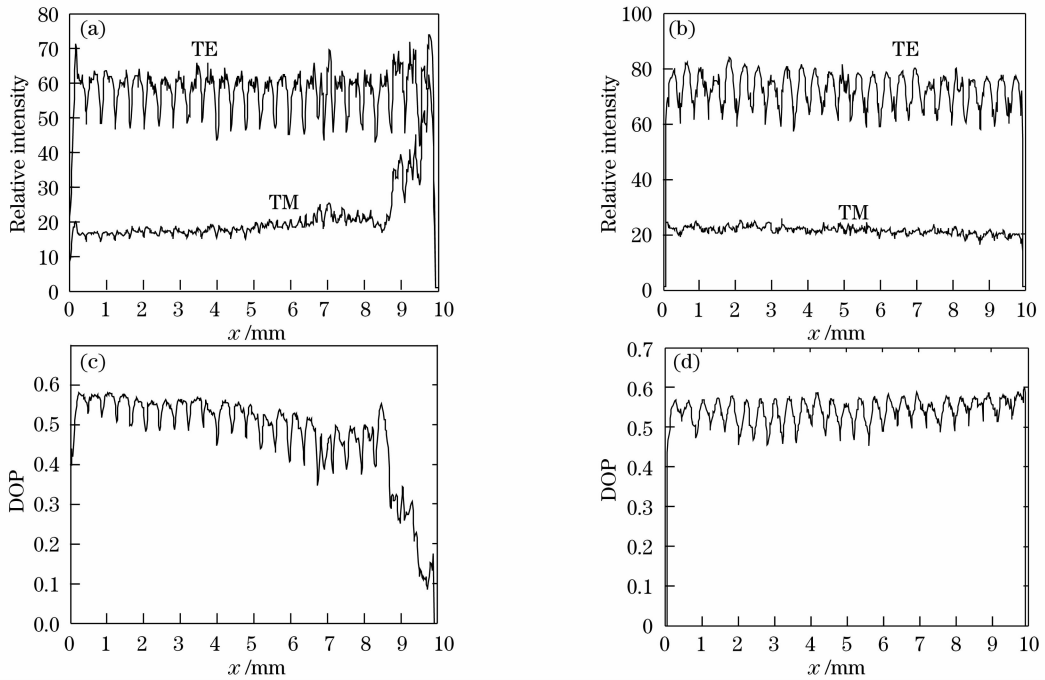


图 5 两个器件的偏振相对强度和偏振度分布。(a) CS 器件不同偏振的强度分布;(b)微通道器件不同偏振的强度分布;(c) CS 器件偏振度分布;(d)微通道器件偏振度分布

Fig. 5 Intensity of TE and TM polarization and the DOP of two components. (a) Relative intensity distribution of two polarizations of a CS packaged LDA; (b) Relative intensity distribution of two polarizations of a micro-channel packaged LDA; (c) DOP Distribution of a CS packaged LDA; (d) DOP distribution of a CS packaged LDA

微通道封装半导体激光器的偏振度在横向分布相对均匀,即起伏不大,说明其受到的应力较均匀,而 CS 封装形式的器件偏振度在横向分布的起伏很大,在阵列的右边三个光点处, TM 的光强突然变大。说明其在横向受到的应力不均匀。从封装过程分析,二者在所用的焊料和烧结工艺相同,因此引起 CS 封装形式偏振度有较大起伏的主要原因可能是其热沉是无氧铜,而且没有用过渡热沉,管芯与热沉之间的热膨胀系数相差较大。而微通道热沉使用的是多层结构,其中有膨胀系数与管芯 GaAs 接近的 CuW 材料,因而整个微通道热沉的热膨胀系数与管芯的接近。从测试数据来看,多层微通道结构(含有 CuW 材料)的热沉比直接用无氧铜热沉在封装时在横向带来的应力较均匀,所以直接使用无氧铜材料作为 CS 的热沉会带来较大的应力分布不均匀性,因此在封装时需要采用与管芯热膨胀系数相近的过渡热沉以降低管芯受到的应力。

## 5 结 论

对半导体激光器阵列的偏振特性进行了测量和分析。实验结果显示,半导体激光器阵列的偏振特性随驱动电流的增加变化明显,尤其是在阈值电流

附近,偏振特性急剧变化。测量了器件荧光偏振度及其横向分布随外加压力的变化。分析表明这种偏振度的变化反映了芯片所受的应变。通过测试器件偏振度的横向分布,比较了 CS 和微通道封装对管芯引入的应力。结果表明,多层微通道结构的热沉比直接用无氧铜热沉在封装时在横向带来的应力更均匀。本文工作表明,采用直接测量激光器阈值下荧光的偏振特性,是分析研究器件封装应力的一种有用方法,对于改进键合工艺有重要的意义,对于分析判断器件性能,如工作寿命,也将带来帮助。

## 参 考 文 献

- Dubravka Lisak, Daniel T. Cassidy, Alan H. Moore. Bonding stress and reliability of high power GaAs-based lasers[J]. *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, 2001, **24**(1):92~98
- Gao Xin, Bo Baoxue, Zhang Jing *et al.*. High brightness operation of fiber coupling multiplex diode lasers [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **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
- Cheng Can, Xin Guofeng, Feng Huizhong *et al.*. Temperature characteristics of volume Bragg grating external cavity semiconductor laser working at continuous wave[J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(1):27~30  
程 灿, 辛国锋, 封惠忠 等. 连续工作的体布拉格光栅外腔半导体激光器的温度特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):27~30

- 4 Chen Wenlan, Yuan Jie, Qi Xianghui *et al.*. Design of 780 nm external cavity semiconductor laser and higher harmonic frequency stabilization[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(7):895~900  
陈文兰, 袁 杰, 齐向晖 等. 外腔半导体激光器设计与高次谐波稳频[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):895~900
- 5 Paul D. Colbourne, Daniel T. Cassidy. Bonding stress measurements from the degree of polarization of facet emission of AlGaAs superluminescent diodes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **QE-21**(4):914~920
- 6 C. Ryan Feeler. Analysis of laser diode bar degradation[D]. University of Missouri-Rolla, 2006, UMI Number:3244594
- 7 Paul D. Colbourne, Daniel T. Cassidy. Imaging of stresses in GaAs diode lasers using polarization-resolved photoluminescence [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(1):62~68
- 8 Moshe Levy, Yuri Berk, Yoram Karni *et al.*. Effect of compressive and tensile strain on the performance of 808 nm QW high power laser diodes[C]. *SPIE*, 2006, **6104**: 61040B
- 9 Jiang Jianping. Theory of Laser Diode[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 211~214  
江剑平. 半导体激光器原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 211~214
- 10 Kimio Shigihara. Estimation of strain arising from the assembling process and influence of assembling materials on performance of laser diodes[J]. *Appl. Phys.*, 1995, **78**(3):1419~1423
- 11 D. T. Cassidy, C. S. Adams. Polarization of the output of InGaAsP semiconductor diode lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**:1556~1160