

基于拉曼光谱技术的光栅耦合结构半导体激光器的可靠性分析

贾鹏^{1,2}, 秦莉^{1*}, 张星¹, 张建¹, 刘天元³, 门志伟³, 宁永强¹

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033
2. 中国科学院大学, 北京 100039
3. 吉林大学物理学院, 吉林 长春 130012

摘要 光栅耦合结构的半导体激光器在自由空间光通信、卫星间通信、激光雷达测距、大气环境检测以及医学成像等领域有着广泛的应用前景。为了分析光栅耦合结构的半导体激光器的可靠性,本文基于拉曼光谱技术,对光栅耦合结构的半导体激光器在不同的制备阶段及其成品进行了检测。我们发现,对于未进行任何工艺加工的半导体激光器芯片, GaAs 纵向(LO)光学光子模式的振动强而横向(TO)光学光子模式的振动弱;当在 GaAs 芯片表面生长一层 SiO₂ 膜后, LO 模式向长波数方向移动,强度没有变化。当在生长 SiO₂ 膜的 GaAs 芯片上刻蚀 100 μm 的台面后, GaAs 的 LO 模式的振动减弱而 TO 模式的振动加强,且峰出现宽化现象;在 100 μm 的台面上刻蚀光栅后, GaAs 的 LO 模式的振动继续减弱而 TO 模式的变得更强,这说明在光栅耦合激光器的制备工艺过程中引入了缺陷。通过与无光栅的半导体激光器进行对比测试,光栅耦合结构半导体激光器无论出光面上有无缺陷,其拉曼光谱均有缺陷峰存在,进一步证明了在光栅结构的制备过程中,引入了应变或者缺陷,对其可靠性产生了影响,导致光栅耦合结构的半导体激光器可靠性降低。

关键词 激光器;拉曼光谱;半导体激光器;可靠性

中图分类号: O433 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)06-1745-04

引言

半导体激光器具有效率高、体积小、长寿命等优点,在激光加工、成像、传感、医疗等领域都有着广泛的应用。光栅耦合结构半导体激光器近几年更是呈现出强劲的发展趋势。光栅耦合结构的半导体激光器在自由空间光通信、卫星间通信、激光雷达测距、大气环境检测以及医学成像等领域有着广泛的应用前景。目前,光栅耦合结构的半导体激光器产品主要来自国外几家知名的半导体器件公司,其原因是国内光栅耦合结构的半导体激光器的可靠性与国外产品相比还有一定的差距。为了提高国内光栅耦合半导体激光器产品的可靠性,需要对其芯片生长、器件制备及集成过程中引入的缺陷、封装应力以及器件失效原因进行检测和分析。

国内对半导体激光器的可靠性的检测和分析多以对半导体激光器的寿命预测为主,一般采用高温快速老化方法或者恒电流的长期工作方法来推测其寿命,而对于半导体激光器

失效的原因不能进行直接判断。拉曼光谱技术是对缺陷、应力、温度和失效原因进行分析的有力工具,具有无损伤在线检测和分析的优势。国外研究机构从 90 年代初期就开始了相关的研究工作^[1-8],但是国内对于这方面的研究工作相对滞后。

借助拉曼光谱分析技术,提出了一种适用于光栅耦合结构的半导体激光器可靠性分析的方法,并以 980 nm 波段光栅耦合结构的边发射半导体激光器为研究对象,对其在各工艺制备阶段的样品及成品器件进行了拉曼光谱检测,系统的分析了光栅结构对其可靠性的影响。

1 拉曼光谱分析技术原理

当入射光子与物质相互作用时,会把一部分能量交给物质,或从物质得到一部分能量,交出或得到的能量就等于散射系统两定态之间的能量差,这种入射光子的能量(波长)发生改变的现象是印度科学家拉曼于 1928 年首先观察到

收稿日期: 2015-02-14, 修订日期: 2015-06-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61234004, 61434005, 61204055, 61176045, 61306086, 61474118, 61474010)和吉林省科技厅项目(20140101172JC, 20130206006GX)资助

作者简介: 贾鹏, 1986 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室博士研究生

e-mail: modou1986@163.com * 通讯联系人 e-mail: qinl@ciomp.ac.cn

的,称之为拉曼散射。拉曼背散射技术已经应用在半导体材料及器件的结构特性分析中,激发光在 GaAs 半导体中的穿透深度一般为 100 nm 左右,适合进行材料的表面特性分析。

图 1 是闪锌矿结构半导体激光器的晶向分布,半导体激光器的出光面是在 $[01\bar{1}]$ 晶向,拉曼光谱仪收集探测半导体激光器来自 $[100]$ 或者 $[01\bar{1}]$ 晶向的散射信号。根据对称性原理,例如对于理想的面,横向光学光子(TO)散射是被允许的,纵向光学光子(LO)的散射是被禁止的。对于实际的 $[01\bar{1}]$ 面(为边发射半导体激光器的出光面),由于器件结构和组分的变化使得旋转对称性被破坏,表面的电场、应变或者其他的波动将导致动量守恒规则的变化,对于任一个光子动量 $K(K \neq 0)$ 的拉曼散射,可以同时存在横光学光子 TO、纵光学光子 LO、横声子 TA、纵声子 LA 等。III-V 族化合物的横光学光子 TO 和纵光学光子 LO 的频率是不同的,用拉曼散射方法可同时测量。

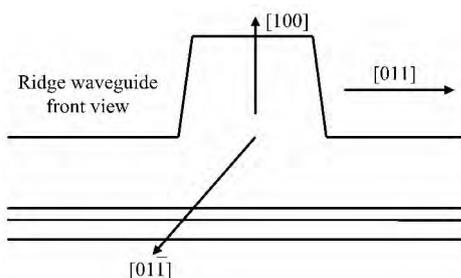


图 1 半导体激光器晶向分布

Fig 1 Semiconductor laser crystal orientation distribution

对于 GaAs/AlGaAs 量子阱半导体激光器,1990 年 Bruger 和 Epperlein 测试其拉曼光谱,特征谱线包括一阶类 GaAs 横光学光子模和类 AlAs 横光学光子模,在 300 K 时,它们的拉曼峰值分别是 268.6 cm^{-1} (TO-GaAs) 和 350.0 cm^{-1} (LO-AlAs)。

2 实验部分

2.1 仪器及参数

拉曼光谱分析测试采用英国 Renshaw 公司显微激光拉曼光谱仪,在吉林大学物理学院实验室进行。拉曼光谱仪的空间分辨率纵向为 $2 \mu\text{m}$ 、横向为 $1 \mu\text{m}$;仪器的重复性小于 $\pm 0.2 \text{ cm}^{-1}$;激发波长 514 nm ,激发功率 $3 \sim 5 \text{ mW}$ 。

2.2 半导体激光器结构

实验中的 980 nm 光栅耦合结构的边发射半导体激光器的外延结构是在 GaAs 衬底上依次生长了 100 nm 的 GaAs 缓冲层、n 型 AlGaAs 限制层、n 型 AlGaAs 波导层、GaAs/InGaAs/GaAs 有源区、p 型 AlGaAs 波导层、p 型 AlGaAs 限制层、 20 nm 的 p 型 AlGaAs 渐变层和 100 nm 的 GaAs 盖层。半导体激光器芯片在晶向上,最上层是 100 nm 的 GaAs 盖层,然后是 20 nm 的 AlGaAs 渐变层。拉曼光谱仪的激发波长是 514 nm ,GaAs 对于 514 nm 的吸收系数为 94437.80 cm^{-1} , 514 nm 的光在 GaAs 中的穿透深度为 105 nm ,拉曼光谱仪可以检测到 GaAs 盖层和 AlGaAs 层的拉曼振动信

息。

3 结果与讨论

3.1 光栅耦合结构边发射半导体激光芯片在不用工艺阶段中的拉曼光谱特性

实验中我们对 980 nm 波段光栅耦合结构半导体激光芯片进行了拉曼光谱测试,图 2 中的上图为芯片测试的拉曼曲线,下图对应的是四个工艺阶段的照片。图 2 的 a 曲线是 2.2 节描述的 980 nm 半导体激光器芯片的拉曼曲线,存在三个拉曼特征峰, 266.55 cm^{-1} (TO-GaAs), 287.42 cm^{-1} (LO-GaAs), 358.33 cm^{-1} (LO-AlAs)。b 曲线是在 980 nm 半导体激光器芯片表面,采用 PECVD 方法生长了 300 nm 的 SiO_2 薄膜后的拉曼曲线,三个拉曼特征峰为 266.55 cm^{-1} (TO-GaAs), 289.15 cm^{-1} (LO-GaAs), 360.05 cm^{-1} (LO-AlAs)。与 a 曲线对比,我们发现没有看到 SiO_2 的明显特征拉曼峰,说明 SiO_2 膜是非晶态,所以没有明显的特征峰出现;同时 LO-GaAs 峰由 a 曲线的 287.42 cm^{-1} 移动到 289.15 cm^{-1} ,移动了 1.7 个波数,LO-AlAs 峰也发生了移动;这说明生长 SiO_2 膜之后产生了一定的应变,使其最上层的 GaAs 盖层的晶格取向方向发生了变化。此外,在 a 和 b 曲线的 $198 \sim 210 \text{ cm}^{-1}$ 范围内存在着宽化缺陷峰^[4, 9-10],可能是 GaAs 半导体激光器在外延生长中存在着缺陷;从 b 曲线可以发现,当 SiO_2 膜生长后,缺陷峰变得更明显。

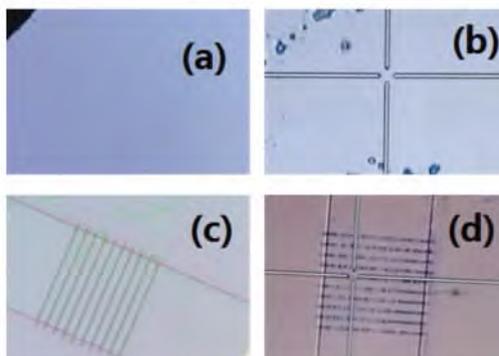
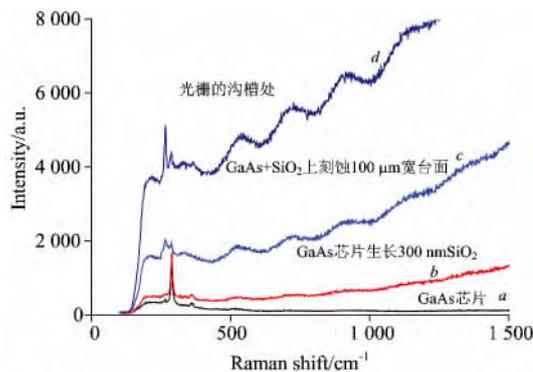


图 2 980 nm 光栅耦合半导体激光芯片在不同工艺阶段的拉曼曲线及四个工艺阶段照片

Fig 2 Raman spectra of 980 nm grating coupled laser diode under different processing; four different process photos

图 2 中的曲线 *c* 是在生长有 300 nm SiO₂ 膜的 GaAs 芯片上刻蚀出条宽为 100 μm 的台面结构后的拉曼光谱。可以发现, 拉曼特征峰发生显著的变化, 即 264. 81 cm⁻¹ (TO-GaAs), 287. 42 cm⁻¹ (LO-GaAs), 334. 18 cm⁻¹ (LO-AlAs), 说明刻蚀出台面结构后引入了应变, 原有的 GaAs 晶格取向发生改变。与曲线 *b* 比较, TO-GaAs 和 LO-GaAs 峰都发生了移动, 峰值降低且发生宽化现象; 而且 210 cm⁻¹ 缺陷峰强度也大大增强, 说明在刻蚀过程中引入了更多的缺陷; 曲线 *c* 在波数大于 500 cm⁻¹ 之后, 出现了几个包络, 这是由于 SiO₂ 层引入了更多缺陷的结果。

图 2 中的 *d* 曲线是在条宽 100 μm 的台面上刻蚀出 1 μm 的光栅结构的拉曼光谱。*d* 曲线是在光栅槽处测量的拉曼光谱, 峰值为 266. 55 cm⁻¹ (TO-GaAs), 287. 42 cm⁻¹ (LO-

GaAs), 缺陷峰值为 217. 69 cm⁻¹。与 *a* 曲线相比, 虽然 TO-GaAs 和 LO-GaAs 的峰值一致, 但是 *a* 曲线中是 LO-GaAs 的峰值很强, 而 *d* 曲线中是 TO-GaAs 峰值很强, 这说明制作光栅结构后, 改变了原有晶体的晶格常数, 导致其拉曼光谱光学光子模波数发生偏移。

从制作 100 μm 条宽的台面开始到完成光栅结构制备, GaAs 芯片的拉曼峰都是横向光学光子模式增强而纵向光学光子模式减弱, 这是由于工艺过程中引入了应变, 从而改变了 GaAs 芯片的晶格取向引起的。表 1 总结了图 2 中的拉曼峰的变化情况。从 *a* 曲线到 *d* 曲线, 缺陷峰的强度不断增强, 说明随着工艺步骤的增加, 引入的缺陷与应变不断增加。

表 1 半导体激光器芯片不同制备工艺阶段的拉曼特性总结
Table 1 Raman characteristics of laser diode chip under process stage

工艺过程	TO-GaAs/cm ⁻¹	LO-GaAs/cm ⁻¹	LO-AlAs/cm ⁻¹	缺陷峰
a: 未加工 GaAs 芯片	266. 55	287. 42	358. 33	198~210
b: GaAs 上长 300 nm SiO ₂	266. 55	289. 15	360. 05	198~210
c: GaAs+SiO ₂ 上刻蚀 100 μm 宽台面	264. 81	287. 42	334. 18	210
d: 在 100 μm 台面上刻蚀 1 μm 光栅的沟槽处	266. 55	287. 42	—	217. 69

3. 2 光栅耦合结构边发射半导体激光器在晶向 [01 $\bar{1}$] (出光面) 的拉曼光谱

上述带有光栅反馈结构的半导体激光芯片, 再经过 p 面和 n 面电极的金属化过程就完成了半导体激光器的制备。我们对光栅耦合结构的边发射半导体激光器的出光面, 也就是 [01 $\bar{1}$] 面进行了拉曼测试, 测试结果见图 3。其中, 黑色曲线为无光栅结构半导体激光器出光面上的拉曼曲线, 红色和蓝色为有光栅结构的半导体激光器出光面上无缺陷点和有缺陷点位置的拉曼曲线。可见, 无光栅结构的半导体激光器出光面上没有缺陷峰出现; 对于有光栅结构的半导体激光器经过 3. 1 工艺加工后, 其出光面无论有无缺陷点存在, 都有缺陷峰出现(在 201 cm⁻¹ 附近出现宽化的峰值); 而且, 在出光面

上的缺陷点位置, 其拉曼缺陷峰值更强。这说明制备光栅结构后对半导体材料的晶格特性产生了影响, 这也是目前光栅耦合半导体激光器可靠性低的一个重要原因。

4 结 论

选择 980 nm 波段光栅耦合结构的半导体激光器作为研究对象, 测试了其在不同工艺阶段的拉曼光谱, 以便对其可靠性进行分析。我们发现, 对于未进行任何工艺加工的半导体激光器芯片, GaAs 纵向 (LO) 光学光子模式的振动强而横向 (TO) 光学光子模式的振动弱。当在 GaAs 芯片表面生长一层 SiO₂ 膜后, LO 模式向长波数方向移动, 强度没有变化, 而 TO 模式的振动没有改变。当在生长 SiO₂ 膜的 GaAs 芯片上刻蚀 100 μm 的台面后, GaAs 的 LO 模式的振动减弱而 TO 模式的振动加强, 且峰出现宽化现象; 在 100 μm 的台面上刻蚀光栅后, GaAs 的 LO 模式的振动继续减弱而 TO 模式的变得更强。可见, 随着芯片制备工艺的增加, GaAs 晶格方向发生了扭转。当在 GaAs 芯片上刻蚀台面和制备光栅结构后, 在 TO-GaAs 模式的短波数边的缺陷峰不断增强, 这说明随着激光器的制备工艺的进行, 芯片上的缺陷不断的增加。通过对光栅耦合结构半导体激光器成品的测试, 我们也进一步证明了, 与无光栅的半导体激光器相比, 光栅耦合结构半导体激光器无论出光面上有无缺陷, 其拉曼光谱均有缺陷峰存在, 说明在光栅结构的制备过程中, 引入了应变或者缺陷, 对其可靠性产生了影响, 导致光栅耦合结构的半导体激光器可靠性降低。

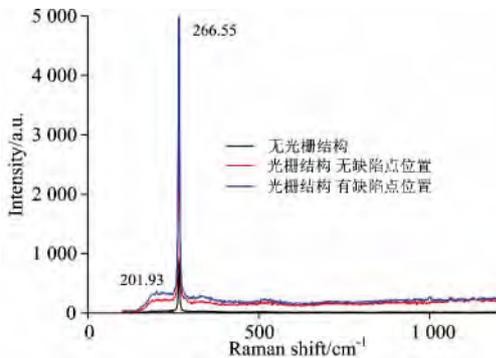


图 3 光栅耦合半导体激光器出光面 [01 $\bar{1}$] 方向的拉曼光谱

Fig 3 Raman spectra of grating coupled semiconductor laser from cleaved facets [01 $\bar{1}$]

References

- [1] Jimenez J, Avella M, Martinez O. *Thin Solid Films*, 2007, 515: 4412.
- [2] Wasyluk J, Adley D, Perova T S. *Applied Surface Science*, 2009, 255: 5546.
- [3] Epperlein P W, Bona G L, Roentgen P. *Applied Physics Letters*, 1992, 60: 680.
- [4] Burgger H, Epperlein P W. *Applied Physics Letters*, 1990, 56: 1048.
- [5] Zhu J H, Ning J Q, Zheng C C. *Applied Physics Letters*, 2011, 99: 113115.
- [6] Diaz-Reues J. *Superficies Vacio*, 2010, 23(1): 13.
- [7] Seredin P V, Lenshin A S, Glotov A V. *Semiconductors*, 2014, 48(8): 1094.
- [8] Jiang Zhengyi, Liu Xianghua, Han Jingtao. *Advanced Materials Research*, 2014, 887: 442.
- [9] Epperlein P W, Buchmann P, Jakubowicz A. *Applied Physics Letters*, 1993, 42: 455.
- [10] Epperlein P W. *Semiconductor Laser Engineering, Reliability and Diagnostics*, 2011, Wiley, chap7.

Reliability Study of Grating Coupled Semiconductor Laser Based on Raman Spectra Technique

JIA Peng^{1,2}, QIN Li^{1*}, ZHANG Xing¹, ZHANG Jian¹, LIU Tian-yuan³, MEN Zhi-wei³, NING Yong-qiang¹

1. State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
3. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China

Abstract Grating coupled semiconductor lasers (GCSLs) has a wide application prospect in many fields, such as optical free space communication, intersatellite communication, ranging for laser radar, atmospheric environmental testing and medical imaging. In order to verify the reliability of GCSLs, the chips in different preparation stages and products of GCSLs are tested based on Raman spectroscopy. It concluded that for unprocessed semiconductor laser chip, the longitudinal optical (LO) photons mode vibration of GaAs chip is strong but the transverse (TO) optical photons mode vibration of GaAs chip is weak. when the is unprocessed. When the surface of GaAs chip is covered by a layer of SiO₂ membrane, the LO mode will movetowards long wavelength direction, but its intensity wouldn't change. When a 100 m mesa is etched on GaAs chip which is covered by SiO₂ membrane, LO mode vibration of GaAs chip weakens and TO mode vibration of GaAs chip enhances, and the peak width of LO mode and TO mode increase. After gratings are etched on the 100 m mesa, LO mode vibration of GaAs chip continues to weaken, but TO mode vibration of GaAs chip becomes stronger. It shows that lattice defects exist in the fabrication process of GCSLs. By contrast testson the semiconductor lasers without gratings, it shows that defect peaks present in the Raman spectrum of GCSLs regardless of the defects on light emitting surface. This further proved that the strains or defects were introduced into the fabrication process of grating structure, which affects its reliability, resulting in a decrease of the reliability of GCSLs.

Keywords Laser; Raman spectra; Semiconductor laser; Reliability

(Received Feb. 14, 2015; accepted Jun. 4, 2015)

* Corresponding author