

垂直腔面发射激光器的结构生长及特性研究

李林 钟景昌 张永明 赵英杰 王勇 刘文莉

郝永琴 苏伟 晏长岭

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 在偏 $\langle 111 \rangle$ A 2° 的 GaAs (100) 衬底上生长了 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As / Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 周期结构的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 外延片. P型 DBR 的周期数为 24.5 对, N型 DBR 的周期数为 34.5 对. 用光荧光 (PL) 谱、扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线双晶衍射 (XRD) 方法对 VCSEL 的光学特性和结构特性进行了分析. 室温量子阱材料的 PL 谱峰值波长为 837.0 nm, 半高宽达到 28.9 nm. 在 X 射线双晶衍射回摆曲线中, 除了“0”级衍射峰外, 还观察到一级和二级卫星峰. “0”级双晶衍射峰的半高宽为 12.56 弧秒 ($''$), 衬底 GaAs 的衍射峰半高宽为 11.79 $''$. “0”级衍射峰半高宽与衬底 GaAs 的衍射峰半高宽比较接近, 表明晶格具有很高的完整性. 实验结果表明腔模波长为 837.2 nm, 腔模波长与 PL 谱峰值波长相匹配.

关键词 垂直腔面发射激光器 (VCSEL); 分布布拉格反射镜 (DBR); 光荧光 (PL); X 射线双晶衍射 (XRD)

中图分类号 TN304.07 文献标识码 A

0 引言

分布布拉格反射镜 (DBR) 应用在垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 当中, 可作为有源层上下方的谐振腔面^[1], 对提高其反射率、功率和降低阈值起着重要作用. 目前, DBR 结构一般由周期性厚度为 $\lambda/4$ 的低、高折射率组份不同的半导体材料构成的膜层交替组成, 大约有 20~40 个周期结构.

光荧光 (PL) 谱用来研究半导体外延材料的光学性质是一种非常方便有效的手段. 对于研究材料的结晶完整性、均匀性、层厚、组分、应变、缺陷和界面等重要信息, X 射线双晶衍射 (XRD) 方法具有独特的优势. 这两种方法具有非破坏性、精度高、操作简便等优点. 将它们配合使用, 不仅为材料生长工艺提供准确的参数, 指导生长工艺, 同时也为器件研究奠定了可靠的基础.

本文研究了 DBR 的生长, 在偏 $\langle 111 \rangle$ A 2° 的 GaAs (100) 衬底上生长了 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As / Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 的周期结构. 用 PL 谱、SEM 和 XRD 方法对 DBR 的光学特性和结构特性进行了测试分析.

1 外延生长

采用 MBE-VG80H 外延设备, 在偏 $\langle 111 \rangle$ A 2° 的 GaAs (100) 衬底上生长了 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As / Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 的周期结构. 有源层由 3 个量子阱组成, 高铝氧化层 $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ 是氧化工艺所要求的. VCSEL 结构分别由 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As / Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 的周期性厚度为 $\lambda/4$ 的低、高折射率组份不同的半导体材料构成的膜层交替

组成. 选择上 DBR 的周期数为 24.5 对, 下 DBR 结构周期数为 34.5 对. VCSEL 的基本结构如表 1.

表 1 VCSEL 的基本结构

外延层	材料	厚度/nm
帽层	GaAs	5
P 型 DBR	$Al_{0.9}Ga_{0.1}As / Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	2800
氧化层	$Al_{0.98}Ga_{0.02}As$	35
P 型 DBR	$Al_{0.9}Ga_{0.1}As / Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	400
有源层	$Al_{0.2}Ga_{0.8}As / GaAs$	260
N 型 DBR	$Al_{0.9}Ga_{0.1}As / Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	4465
缓冲层	GaAs	500

2 VCSEL 结构检测

2.1 SEM 测试

本实验使用的是日立公司 S-4200 高分辨率扫描电子显微镜. 在扫描电镜下观察解理面, 如图 1. 在 VCSEL 结构中, P 型 DBR 区呈现亮的衬度, N 型 DBR 区呈现暗的衬度.

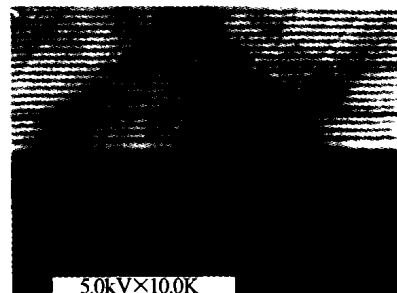


图 1 DBR 反射谱的扫描结果
Fig. 1 SEM pattern of DBR

2.2 PL 谱

本文使用英国伯乐公司生产的 PL9000 型傅里叶变换光荧光谱仪, 通过数据处理给出光谱的峰值位置和半高宽等参数. 经计算机对数据处理, 由计

计算机给出曲线图形. 样品室温的 PL 谱, 如图 2.

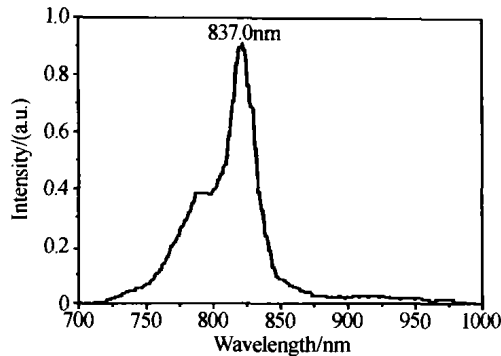


图 2 样品的室温(300K)光致荧光曲线

Fig. 2 Room temperature (300K) PL curves of sample

2.3 X 射线双晶衍射

日本理学公司生产的 D/Max-2400 型 X 射线双晶衍射仪, X 光功率为 3.8 kW, X 射线源的尺寸为 $8 \times 0.04 \text{ mm}^2$, Cu 靶, $K\alpha_1$ 辐射, $\lambda = 0.154056 \text{ nm}$, 最大输出功率 12 kW, 第一晶体 Ge 单晶表面为 (400). 在实验中取衬底的 (400) 衍射, $\theta - 2\theta$ 联动, 自动记录 DBR 的衍射峰, 如图 3.

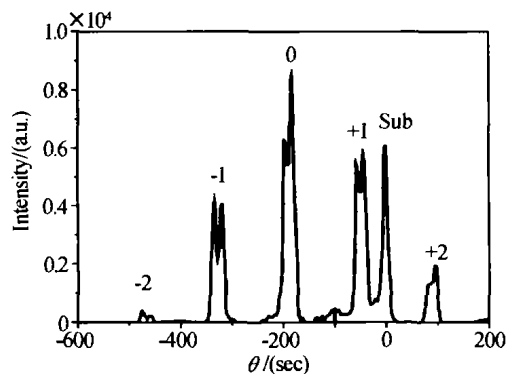


图 3 VCSEL(400) X 射线双晶衍射

Fig. 3 (400) XRD patterns of VCSEL

2.4 微区光反射谱

采用北京光学仪器厂 WDH3 型宽波段扫描单色仪. 卤钨灯发出的光经单色仪选频, 再经透镜会聚后照射到外延片表面, 经外延片表面反射的光, 经分光镜进入光电倍增管转变为电信号, 经锁相放大器放大后, 通过 A-D 转换得到反射谱的数字信号. 实验测得的反射谱, 如图 4.

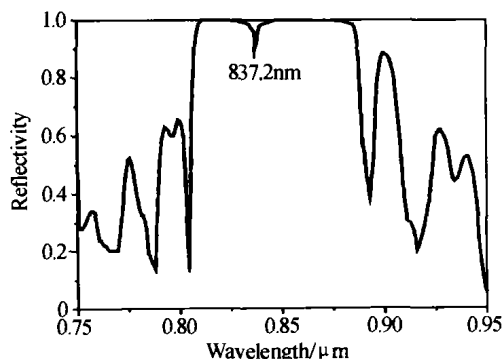


图 4 VCSEL 反射率的测量值

Fig. 4 Measured reflectance spectrum of VCSEL

3 结果与讨论

由图 1 外延片解理面的显微照片, 可分辨出外延层结构中的上、下 DBR、有源层及氧化层, 各界面层次分明, 清晰平直, 结构完整.

PL 谱的相对发光强度和半高宽是表征外延片质量好坏的重要参数. 发光强度越强, 表明材料内非辐射复合中心越少, 发光效率越高. 半高宽越小, 表明材料的平整度越好. 图 2 给出 VCSEL 样品室温 (300K) 的 PL 谱峰值为 837.0 nm, 半高宽 (FWHM) 为 28.9 nm. 测得的 VCSEL 的 PL 谱受谐振腔共振条件的调制, 光谱峰值位置附近的辐射峰是共振峰.

影响光荧光谱峰形、峰位的因素很多. 在生长过程中, 衬底缺陷和表面处理不好, 会造成深能级的产生, 使受激辐射复合强度大大降低. 深能级主要来源于化学计量比偏移造成的缺陷、界面缺陷和表面状态缺陷, 这些缺陷形成的深能级陷阱不仅会降低发光效率, 产生无辐射复合, 而且大多与发光器件退化有关. Singh 等人曾利用统计模型计算光谱线宽随阱宽的变化^[2]. Al 组分的变化会引起 GaAlAs 势垒高度的变化, 从而引起光谱线的展宽. 量子阱中微量的残余杂质, 也会导致光谱线的展宽.

由图 3 可见, 在衬底衍射峰的近旁出现了很强的“0”级衍射峰, 而在“0”级衍射峰的两侧观察到“±1”, “±2”级卫星峰. 图 3 中 VCSEL 的“0”级峰半高宽 (12.56°) 与衬底峰的半高宽 (11.79°) 很接近, 表明外延层和衬底的晶格完整性比较好. “0”级峰半高宽不仅取决于晶格的完整性, 而且也取决于各层厚度的波动, 任何波动都会引起衍射峰的展宽.

在衍射峰中出现了明显的峰劈裂现象. 产生这种情况的原因, 一是 DBR 中 Al 组分稍有偏差造成的, 二是由于有源层的存在, 使上下 DBR 产生位相差, 造成衍射峰极大值不再重合, 发生移动, 在双晶衍射回摆曲线上表现为衍射峰的劈裂.

DBR 的周期 D 与各衍射峰之间的角距离 $\Delta\theta$ 的关系可表示为^[3]

$$D = \frac{\lambda}{2\Delta\theta \cos \theta_0} \quad (1)$$

其中 λ 为 X 射线波长, $\Delta\theta$ 为相邻衍射峰之间的间距, θ_0 为衬底的 Bragg 衍射角. 实验中, $\lambda = 0.154056 \text{ nm}$; $\theta_0 = 33.023^\circ$; $\Delta\theta = 145''$. 由式 (1) 可得出 $D = 130.8 \text{ nm}$. 证实了计算的 DBR 周期的厚度与 SEM 所得的厚度基本一致.

在 DBR 的 X 射线衍射中, 是平均晶格面间距起作用^[4], 其“0”级衍射峰相当于 Al 含量为 (平均 Al

含量)的外延层的衍射峰. 所以

$$\bar{x} = \frac{\Delta\theta_{0,s}}{\Delta\theta_{AlAs}} \quad (2)$$

其中, $\Delta\theta_{0,s}$ 为 DBR 的“0”级峰与 GaAs 衬底衍射峰间的角距离, 而 $\Delta\theta_{AlAs}$ 则为外延层 AlAs 的衍射峰与衬底 GaAs 峰间的角距离. 由衬底的(004)衍射, 得 $\Delta\theta_{AlAs} = 381''^{[4]}$. 由式(2)可得出 $\bar{x} = 0.48$.

在室温下实验测得的腔模波长为 837.2 nm, 如图 4. 在实际的生长过程中, 各外延层厚度与设计值存在偏差, 从而导致实际的腔模位置与设计的腔模波长位置发生偏离. 图 4 中的高反带区域中间有一个凹陷位置, 此位置是 VCSEL 外延片高反带中的透射极大值, 所对应的波长即是腔模波长. 在腔模波长处有一定的透射率, 可形成光振荡.

4 结论

PL 谱和 X 射线双晶衍射方法在 VCSEL 的质量分析和工艺改进中起着非常重要的作用, 这两种方法配合使用可以从不同侧面全面反映被测样品的生

长质量. 实验结果表明在外延生长方向的周期性较好, 晶格具有很高的完整性, 同时表明腔模波长与 PL 谱峰值波长相匹配.

参考文献

- 1 Dae Ho Lim, Gye Mo Yang, Jong-Hee Kim, *et al.* *SPIE*, 1998, **3286**:96 ~ 102
- 2 Hagan O S, Missous M. Effect of As4/Ga flux ratio on electrical and optical properties of low-temperature GaAs grown by molecular beam epitaxy. 1994, **75** (12): 7835 ~ 7841
- 3 姜力, 吴苍生, 王玉田, 等. MBE [(Al_xGa_{1-x})₂As]_n(GaAs)_m/GaAs(001) 超晶格结构参数的 X 射线双晶衍射测量研究. *半导体学报*, 1989, **10**(2):86 ~ 92
Jiang L, Wu C S, Wang Y T, *et al.* *Chinese J Semiconductors*, 1989, **10**(2):86 ~ 92
- 4 王玉田, 陈宗圭. MBE GaAs/AlAs 一维超晶格结构参数的 X 射线双晶衍射测量. *半导体学报*, 1986, **7**(5):516 ~ 521
Wang Y T, Chen Z G. *Chinese J Semiconductors*, 1986, **7**(5): 516 ~ 521

Study on Growth and Characteristics of Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Structure

Li Lin, Zhong Jingchang, Zhang Yongming, Zhao Yingjie, Wang Yong, Liu Wenli, Hao Yongqin, Su Wei, Yan Changling

National Key Lab of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022

Received date:2004-01-05

Abstract The structure of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSEL) has been grown on (100)2° off toward <111> A n-GaAs(Si) substrate by MBE. The numbers of reflectors in top and bottom Distributed Bragg Reflector (DBR) structures are 24.5 pairs and 34.5 pairs, respectively. The high quality VCSEL structure is characterized by PL, SEM and X-ray double crystal diffraction (XRD). The peak wavelength of PL spectrum is 837.0 nm and the FWHM is 28.9 nm at room temperature. The structure parameters of VCSEL are obtained from the rocking curve. The first and second satellite peaks around the main (“0” level) reflection peak appear in the rocking curve. The FWHM of diffraction peaks of “0” level and GaAs substrate are 12.56” and 11.79”, respectively, which are quite close, showing much higher integrity of the crystal lattice. The experimental results show that the resonant wavelength of cavity modes (837.2 nm) and the peak wavelength of PL spectrum are well matched.

Keywords Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL); Distributed Bragg Reflector (DBR); Photoluminescence (PL); Double Crystal X Ray Diffraction (XRD)

Li lin male, a lecturer, a native of Jilin province. He is now a Ph. D. student of Changchun University of Science and Technology. Main research interest is in the fields of technology of MBE, high power semiconductor laser diode arrays and VCSEL.