

GaN基激光器多量子阱垒材料的研究

陈伟华¹, 廖 辉¹, 胡晓东^{1*}, 李 睿¹, 贾全杰², 金元浩³, 杜为民³, 杨志坚¹, 张国义¹

1. 人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京大学物理学院, 北京 100871
2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100039
3. 北京大学现代光学研究所, 北京 100871

摘 要 在(0001)蓝宝石衬底上分别用金属有机化学气相沉积技术外延生长了 InGa_{0.15}N/GaN, InGa_{0.15}N/InGa_{0.15}N, InGa_{0.15}N/AlInGa_{0.15}N 多量子阱激光器结构, 并分别制作了脊形波导 GaN 基激光器。同步辐射 X 射线衍射, 电注入受激发射光谱测试及光功率-电流(L-I)测试证明, 相对于 GaN 垒材料, InGa_{0.15}N 垒材料, AlInGa_{0.15}N 四元合金垒材料更能改善多量子阱的晶体质量, 提高量子阱的量子效率及降低激光器阈值电流。相关的机制为: 组分调节合适的四元合金垒层中 Al 的掺入使得量子阱势垒高度增加, 阱区收集载流子的能力增强; In 的掺入能更多地补偿应力, 减少了由于缺陷和位错所产生的非辐射复合中心密度; In 的掺入还减小了量子阱中应力引致的压电场, 电子空穴波函数空间交叠得以加强, 使得辐射复合增加。

关键词 GaN 基激光器; 多量子阱(MQWs); AlInGa_{0.15}N; 垒材料

中图分类号: O47 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)06-1441-04

引 言

以氮化镓(GaN)为代表的Ⅲ族氮化物材料在近十年来得到了广泛研究, 发展及应用。继第一代半导体锗(Ge)、硅(Si)和第二代半导体: 砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)之后发展起来的Ⅲ族氮化物、氧化锌(ZnO)和碳化硅(SiC)等材料, 由于其禁带宽度大, 并且具有很广的可调带隙范围而受到广泛关注。由Ⅲ族氮化物 GaN, InN 和 AlN 可以形成一个连续的三元合金体系, 其直接带隙宽度覆盖了从 InN 的 0.65 eV 到 GaN 的 3.43 eV 直到 AlN 的 6.04 eV, 也即从红外到紫外这一广泛的波长范围。氮化物的研究可以将半导体发光器件的波长扩展到整个可见光范围, 在蓝绿光和紫外波段具有独特的优势^[1-3]。GaN 基的蓝、紫光激光器(LD)因其波长比较短, 可以应用到高密度的光信息存储上。此外 GaN 基 LD 在彩色激光复印、打印技术, 显示, 照明等领域也有巨大的潜力。

Nichia 公司 Nakamura 等^[4, 5]首次实现了 InGa_{0.15}N 半导体激光器的连续激射。之后国际上掀起了蓝、紫光激光器的研制热潮。北京大学宽禁带半导体研究中心和中科院半导体所也在 2004 年实现了 400 nm 左右 GaN 基激光器的受激发射。GaN 基 LD 的性能还亟待进一步提高。通过控制获得均匀宽

度、组分, 高结构质量和光学质量的多量子阱(MQW)有源层是 LD 外延生长中的一个核心问题^[6-8]。由于阱与垒之间存在较大的晶格失配, 导致生长过程中不可避免地出现失配位错。研究表明, 位错在 InGa_{0.15}N 和 GaN 外延层中通常充当非辐射复合中心。阱与垒之间存在较大的晶格失配使量子阱中产生较大的内建自发极化电场和压电极化电场, 是影响蓝光 LED 内量子效率的重要原因^[9]。因此, 优化量子阱具有重要意义。

改善量子阱中的晶格失配可以改善量子阱中的极化电场, 进而改善 GaN 基激光器的性能。近年来, Ⅲ族氮化物(GaN, AlN, InN)的四元合金 AlInGa_{0.15}N 引起了人们的极大关注^[10-12]。AlInGa_{0.15}N 像其他Ⅲ族氮化物一样属于直接跃迁型的宽带材料, 其发光效率高, 禁带宽度覆盖了从可见光到紫外波段更重要的是它可以有效地调节与 GaN 的晶格匹配并且很有希望应用于紫外发光器件^[11, 12]。

通常的蓝光量子阱 LED 采用 InGa_{0.15}N 为阱层材料, GaN 为垒层材料^[13, 14]。本文保持非有源区结构参数不变, 设计了 GaN 垒层, InGa_{0.15}N 三元合金垒层和 AlInGa_{0.15}N 四元合金垒层的量子阱, 并分别做了性能测试。分别对不同量子阱结构的激光器样品进行了(0002)对称面的同步辐射 X 射线衍射(XRD)联动扫描, 并对制作好的 GaN 基 LD 管芯进行了电注入受激发射谱和功率-电流(L-I)等方面的测量分析。

收稿日期: 2008-05-10, 修订日期: 2008-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60776042), “863”计划项目(2007AA03Z403)和国家重大科学研究计划项目(2006CB921607)资助

作者简介: 陈伟华, 女, 1977 年生, 北京大学物理学院工程师 e-mail: Whchen919@gmail.com

*通讯联系人 e-mail: huxd@pku.edu.cn

1 实 验

本文所用样品是用金属有机化学气相沉积技术(MOCVD)在 Al_2O_3 (0001) 衬底上生长的, Ga, Al, In 和 N 源分别为三甲基镓(TMGa), 三甲基铝(TMAI), 三甲基铟(TMIn)和氨气(NH_3), 在生长过程中通过改变 Ga, Al 和 In 的比例来调节 AlInGaN 外延层中 Al 和 In 的比例。整个激

光器外延结构包括 20 nm 的 GaN 低温缓冲层; 2 μm 掺硅的 GaN 层; 160 周期 $r\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (2.5 nm)/ GaN (2.5 nm) 超晶格(SLS)光限制层; 100 nm $r\text{-GaN}$ 波导层; 5 个周期的多量子阱有源区, 20 nm $p\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 电子阻挡层, 100 nm $p\text{-GaN}$ 波导层; 100 $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (2.5 nm)/ GaN (2.5 nm) 超晶格光限制层; 50 nm 掺镁的 GaN 欧姆接触层。三种样品的量子阱的垒层分别是 GaN, $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 和 $\text{Al}_{0.15}\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.83}$ 四元合金材料, 如表 1 所示。

Table 1 Structures of the InGaNMQW LDs grown on the GaN substrate

Contact layer	50 nm $p\text{-GaN}$
Upper cladding layer	$p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (2.5 nm)/ GaN (2.5 nm) SLS 100 periods
Upper optical guiding layer	100 nm $p\text{-GaN}$
Electron blocking layer	20 nm $p\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$
MQW active layer	Sample 1 2 nm $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ / 8 nm GaN 5 periods
	Sample 2 2 nm $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ / 8 nm $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 5 periods
	Sample 3 2 nm $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ / 8 nm $\text{Al}_{0.15}\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ 5 periods
Optical guiding layer	100 nm $r\text{-GaN}$
Cladding layer	$r\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (2.5 nm)/ GaN (2.5 nm) SLS 100 periods
Buffer layer	2 μm GaN :Si
Substrate	(0001) Al_2O_3

在 p 型 GaN 层上蒸镀 Ni/ Au, n 型 GaN 层上蒸镀 Ti/ Al 形成欧姆接触。激光器腔面是沿 GaN 外延薄膜的面, 即蓝宝石的方向解理形成的。激光器脊形面积均为 8 μm $\times$ 800 μm 。用 AG-107D-8(AVTECH Co.) 脉冲电源在室温下进行了激光器的测试。EL 谱采集使用法国 JY 公司的 DilorXY 拉曼光谱仪, 其分辨率可以达到 0.02 nm。

2 实验结果和讨论

我们设计的三种激光器外延片(0002)对称面同步辐射 $\omega/2\theta$ 联动扫描 XRD 衍射曲线见图 1。图 1 中(a), (b), (c) 分别为量子阱垒层为 GaN, $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$, 和 $\text{Al}_{0.15}\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ 四元合金的 GaN 基 LD 外延片的同步辐射 XRD 衍射曲线。在这些衍射曲线中可以观察到复杂的卫星峰结构, 这些卫星峰分别对应 p 型和 n 型 AlGaIn/ GaN 超晶格以及 InGaIn 多量子阱^[15, 16]。虽然 InGaIn 多量子阱只有 5 个周期, 但是其卫星峰可以清楚地观察到 - 4 和 + 3 级, 说明我们生长的这三种多量子阱都具有良好的周期结构。图 1 中(b)和(c)中的 MQW 的衍射卫星峰的半高宽比图 1(a)中 MQW 衍射峰半高宽明显小的多。说明使用 $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 三元合金和 $\text{Al}_{0.15}\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ 四元合金做垒层后量子阱获得了相对比较陡峭的界面, 界面粗糙度和位错密度都大大减少, 量子阱的质量有了很大提高。图 1(b)和(c)中量子阱的 - 1 和 - 2 级卫星峰分别分为两个, 这是由于垒层中也掺了 In 造成的。

图 2 给出了室温时三种量子阱结构的激光器的电注入受激发射光谱。从图中可以看到垒层为四元合金的 LD 注入电流尽管较小(700 mA, 脉宽 300 ns), 但却有最大的峰值强度和最小的半高宽值(0.433 nm)。垒层为 $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 的 LD 半高宽为 0.631 nm, 性能次之, 垒层用 GaN 做的 LD 性能最

差, 注入电流最大(2 000 mA, 脉宽 300 ns), 峰值强度最低, 半高宽最大(0.750 nm)。说明四元合金的引入大大提高了量子阱的发光量子效率。原因是垒层为 $\text{Al}_{0.15}\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ 时, 在载流子限制方面, 垒层 Al 的掺入使得垒高增加, 阱区收集载流子的能力增强, 增加了俘获电子和空穴的概率, 这使得在一定的注入条件下, 阱区内载流子密度更高, 更易实现粒子数反转并激射。另一方面 In 的掺入有效地抵消了掺入 Al 带来的应力, 原因是 Al 原子 < Ga 原子 < In 原子。加入 In 后释放应力减小了压电极化, 电子空穴波函数空间交叠得以加强, 使得光学跃迁矩阵元增大, 有利于提高量子阱的增益^[17]。另外, 释放应力后减少了界面态及位错密度, 有效地减少了非辐射复合, 从而使量子阱的性能达到最优状态。

图 3 给出了室温时三种激光器样品的 L-I 曲线, 电流源脉冲宽度为 300 ns, 重复频率为 500 Hz。综合 EL 测试结果和 L-I 曲线可知垒材料为 AlInGaIn 四元合金的激光器在 800 mA 已经达到阈值和而做垒的激光器在电流为 100 mA 左右时才达到阈值。垒层为 GaN 的 LD, 激光器的阈值达到了 1 900 mA 左右。而且垒层为 GaN 的 LD 斜率效率显著的比其他两种激光器低的多, 阈值以上的垒层为 InGaIn 三元合金的激光器的斜率效率也大大低于四元合金垒层的样品。可见选择合适组分的 AlInGaIn 四元合金做垒层, 使其晶格常数与阱层尽量匹配, 可以有效地降低阈值电流密度, 提高内量子效率, 减少内部光损耗, 并提高材料增益。

3 结 论

以四元合金 AlInGaIn 为垒, 选择合适的 Al 和 In 的组分, 减小压电极化电场, 可以提高 GaN 多量子阱的晶体质量, 发光性能, 进而有效地降低 GaN 基激光器的阈值, 提高

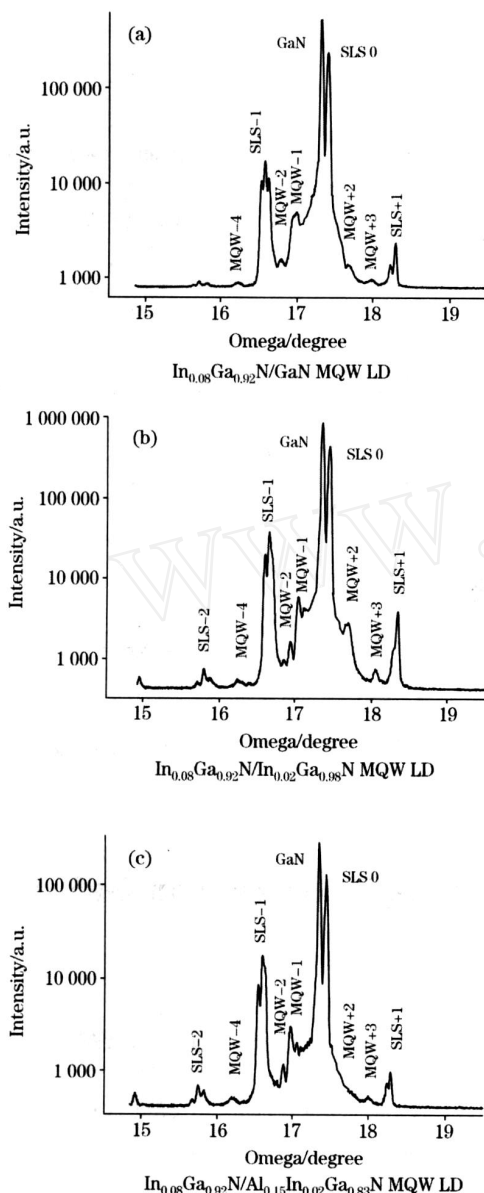


Fig 1 GaN (0002) synchrotron X-ray diffraction (XRD) spectroscopy of MQW GaN-based LDs with different barriers

GaN 基激光器的量子效率。

(1)在载流子限制方面,垒层 Al 的添入使得垒高增加,阱区收集载流子的能力增强。这使得在一定的注入条件下,阱区内载流子密度更高,更易实现粒子数反转。

(2)在辐射复合机制方面,组分调节合适的四元合金垒层能更多地补偿应力,减少量子阱中应力引致的压电场,电

子空穴波函数空间交叠得以加强,使得光学跃迁矩阵元增大,有利于整体提高量子阱的增益。

(3)在非辐射复合机制方面,组分调节合适的四元合金晶格失配相对较小,阱内由于缺陷和位错所产生的非辐射复合中心密度大大降低。

这三方面共同作用使得在阱区结构一致的情况下,以 AlInGaIn 四元合金作为垒层的激光器样品具有较优的性能。

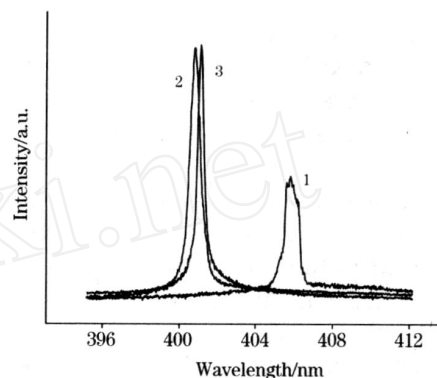


Fig. 2 Stimulated emissions of the InGaIn MQW LDs under forward current with pulse width of 300ns with different barriers

1: $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/\text{GaIn MQW LD}$ under a current of 2000 mA;

2: $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N MQW LD}$ under a current of 1 200 mA;

3: $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/\text{Al}_{0.15}\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.83}\text{N MQW LD}$ under a current of 700 mA

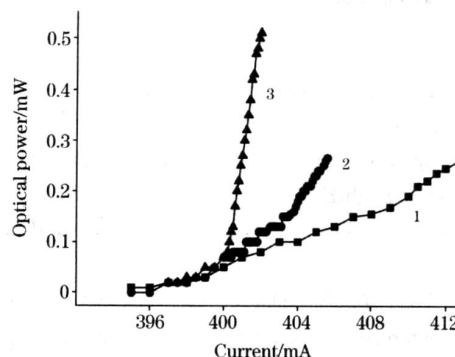


Fig. 3 L-I characteristics of InGaIn MQW LDs measured under pulsed current operation at room temperature. The samples were operated at a current of 200 ns pulse width and 500 Hz repeat frequency

1: $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/\text{GaIn MQW LD}$;

2: $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N MQW LD}$;

3: $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/\text{Al}_{0.15}\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.83}\text{N MQW LD}$

参 考 文 献

- [1] Nakamura S. Solid State Communications, 1997, 102: 237.
- [2] L Ū Guo-wei, TANG Ying-jie, LI Wei-hua, et al(吕国伟, 唐英杰, 李卫华, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(1): 39.
- [3] GAO Min, LIU Wei, YANG Jun-tao, et al(高 敏, 刘 伟, 杨军涛, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(5): 928.
- [4] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S I, et al. Appl. Phys. Lett., 1996, 69: 3034.
- [5] Nakamura S. Journal of Crystal Growth, 1997, 170: 11.
- [6] Kwon S Y, Baik S I, Kim Y W, et al. Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 192105.
- [7] ZHAO De-wei, SONG Shu-fang, ZHAO Su-ling, et al(赵德威, 宋淑芳, 赵谏玲, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(4): 625.
- [8] FU Fang-zheng(付方正). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2001, 21(6): 749.
- [9] Lahiri B, Datta R, Kundu S. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2005, 25(4): 449.
- [10] McIntosh F G, Boutros K S, Roberts J C, et al. Appl. Phys. Lett., 1996, 68(1): 40.
- [11] Yasan A, McClintock R, Mayes K, et al. Appl. Phys. Lett., 2002, 81: 801.
- [12] Kipshidze G, Kuryatkov V, Zhu K, et al. J. Appl. Phys., 2003, 93: 1363.
- [13] Watanabe K, Nakanishi N, Yamazaki T, et al. Appl. Phys. Lett., 2003, 82: 715.
- [14] LIU Shi-wen, GUO Xia, AI Wei-wei, et al(刘诗文, 郭 霞, 艾伟伟, 等). Semiconductor Optoelectronics(半导体光电), 2006, 27(3): 240.
- [15] Fewster P F. Rep. Prog. Phys., 1996, 59: 1339.
- [16] LI De-yao, ZHANG Shu-ming, WANG Jian-feng, et al(李德尧, 张书明, 王建峰, 等). Science in China Series E: Technological Sciences(中国科学 E 辑: 技术科学), 2007, 37: 356.
- [17] Aumer M E, LeBoeuf S F, Moody B F, et al. Appl. Phys. Lett., 2001, 79: 3803.

Research on Al In Ga N Quaternary Alloys as MQW Barriers in Ga N Based Laser Diodes

CHEN Wei-hua¹, LIAO Hui¹, HU Xiao-dong^{1*}, LI Rui¹, JIA Quan-jie², JIN Yuan-hao³, DU Wei-min³, YANG Zhi-jian¹, ZHANG Guo-yi¹

1. State Key Laboratory for Mesoscopic Physics and School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
3. Institute of Modern Optics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract InGaN/ GaN, InGaN/ InGaN and InGaN/ AlInGaN multi-quantum-well (MQW) laser diodes (LDs) were grown on (0001) sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD). The GaN (0002) synchrotron X-ray diffraction (XRD), electroluminescence (EL) and optical power-current (L-I) measurement reveal that AlInGaN quaternary alloys as barriers in MQWs can improve the crystal quality, optical emission performance, threshold current and slope efficiency of the laser diode structure to a large extent compared with other barriers. The relevant mechanisms are that: 1. The Al component increases the barrier height of the MQWs so that more current carriers will be caught in. 2. The In component counteracts the strain in the MQWs that decreases the dislocations and defects, thereby the nonradiative recombination centers are decreased. 3. The In component decreases the piezoelectric electric field that makes the electrons and the holes recombine more easily.

Keywords GaN-based LD; Multi-quantum-well (MQW); AlInGaN; Barrier material

(Received May 10, 2008; accepted Aug. 20, 2008)

* Corresponding author