

GaN 基激光器多量子阱结构的性能 表征与结构优化*

魏启元^{1,†} 李 侗² 王彦杰² 陈伟华² 李 睿² 潘尧波² 徐 科²
章 蓓² 杨志坚² 胡晓东²

(1 北京大学宽禁带半导体研究中心, 北京 100871)

(2 北京大学物理学院 人工微结构和介观国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 研究了包括四元合金在内的三种多量子阱结构, 对以此为有源层的激光器进行了性能表征和比较分析. 通过对阈值电流和外微分子效率的测量以及增益分布的模拟分析, 证实了四元合金用于量子阱结构生长对提高激光器性能的作用. 此外对优化的量子阱结构激光器的漏电流和增益饱和带来的影响进行了研究.

关键词: 氮化镓; 激光二极管; 量子阱; 多元合金; 增益

PACC: 7280E; 7845; 4260

中图分类号: TN365

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0471-04

1 引言

世界上第一只连续激射的 InGaN/GaN 多量子阱(MQW)半导体激光器(LD)问世已十年有余^[1]. 但是, 目前在 GaN 基 LD 的研究和开发中依然面临不少的物理问题和技术难点, 量子阱的结构优化和性能表征就是其中受人关注的课题之一.

多量子阱作为 LD 的有源发光层, 其结构参数, 包括阱数、阱宽和元素组分决定了量子阱的能带结构和电子态, 对激光器的性能有决定性的影响^[2]. 为了研究量子阱结构参数与 LD 宏观光电学性能的关系, 我们设计了三种不同结构的多量子阱, 而保持非有源区结构参数相对稳定一致, 对 LD 器件进行了功率-电流($L-I$)和电致发光(EL)谱等方面的测量分析. 以期通过比较不同结构下器件的性能, 实现对激光器结构评估的评估和优化.

2 实验

文中使用的样品均为蓝宝石衬底上用金属有机化合物气相沉积方法(MOCVD)生长的 LD 结构外延片, 波导层为 AlGaIn, 覆盖层为 AlGaIn/GaN 超晶格结构. LD 器件制备如 p 型电极和解理镜面等均使用固定的工艺技术.

我们研究了三种不同多量子阱结构 LD. 样品

的阱垒数均为 5. 样品 1 为阱材料为四元合金的 AlInGaIn/GaN 多量子阱, 其中 Al 组分约为 0.15, In 组分约为 0.03. 样品 2 和样品 3 均为阱材料为三元合金的 InGaIn/GaN 多量子阱, In 组分分别为 0.04 和 0.1. 运用半矢量方法模拟分析了它们各自的光场分布并具体计算了它们的限制因子, 分别为 0.0442, 0.0443 和 0.0439, 由此近似认为波导层等部分对 LD 中光场的限制作用是相同的, 所以作为分别限制异质结构(SCH)的 LD, 其性能主要受提供载流子限制的 MQW 结构的影响.

3 结果与讨论

LD 的激射阈值电流和外微分子效率是最重要的评估参数. 通过 $L-I$ 和 EL 谱的共同测量确定激射阈值电流. 在 $L-I$ 曲线的测量中, 使用脉冲电源以避免内部热效应, 采用积分球系统以保证阈值以下时 LD 在各个方向发散的自发辐射能够被全部采集.

脉冲电流注入条件为频率 500Hz, 变化脉宽从 200 到 1000ns. 测量过程中 $L-I$ 曲线在阈值以上斜率基本不变, 对应了激光器自身固定的外微分子效率. 阈值由 $L-I$ 曲线和 EL 谱测量共同确定. 如从图 1 中可见 800mA 时 $L-I$ 斜率突变, EL 谱线宽明显减小, 800mA 即判定为阈值电流.

待测的三种不同量子阱结构的激光器样品的阈

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60477011, 60476028, 60406007, 60276010)

† 通信作者. Email: lofi@pku.edu.cn

2006-12-11 收到, 2006-12-13 定稿

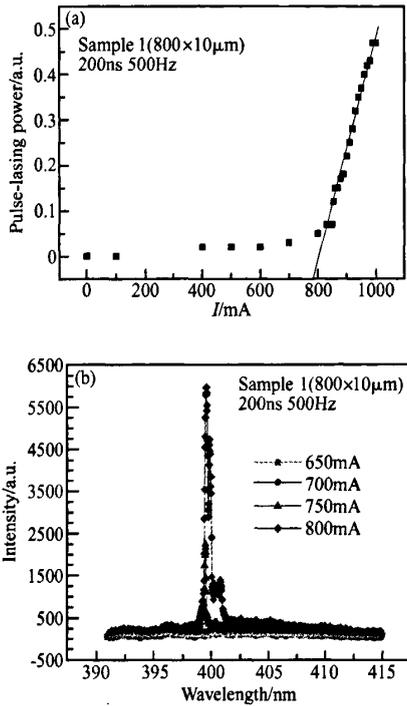


图 1 激光器样品 1 的 $L-I$ 图(a)和 EL 谱(b)

Fig. 1 (a) Light output versus current of LD sample 1; (b) Electroluminescence spectra of sample 1

值 I_{th} 和外微分子效率 η_d 的比较如表 1 所示:

表 1 三种不同量子阱结构样品性能比较

Table 1 Device performance of different MQW structure samples

	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Active region	AlInGaN /GaN	InGaN/GaN (low In)	InGaN/GaN (high In)
$I_{th}/(kA/cm^2)$	10	20	36
$\eta_d/\%$	7.0	1.3	0.3

可见三种不同量子阱结构的 LD 中,样品 1 的性能较好.为了更深入地研究 MQW 结构影响器件性能的机理,我们使用模拟软件 LASTIP 对不同结构进行了增益分布模拟.三种样品的量子阱均为 5 阱结构,但是各自的阱材料不同,具体模拟结果见图 2.各个样品的阱间增益分布都是不均匀的,这在本质上是因为空穴相对电子具有较低的迁移率和热运动速度,因此阱间载流子密度在接近 p 型区处较高,接近 n 型区处较低.在样品 2 和样品 3 中,接近 n 型区的较少的载流子复合使得两个阱增益为负,成为吸收层或称寄生量子阱,相应的低增益和高内部损耗直接降低激光器性能^[3],而在样品 1 中无此现象.我们认为这是由于样品 1 采用了四元合金结构,并通过调节 Al 和 In 的组分比,使其晶格常数与 GaN

晶格相匹配.在辐射复合机制方面,四元合金较之三元合金能更多地补偿应力,应力释放后的量子阱中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^[4];在非辐射复合机制方面,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.这两方面共同作用使得四元合金量子阱激光器性能较优.

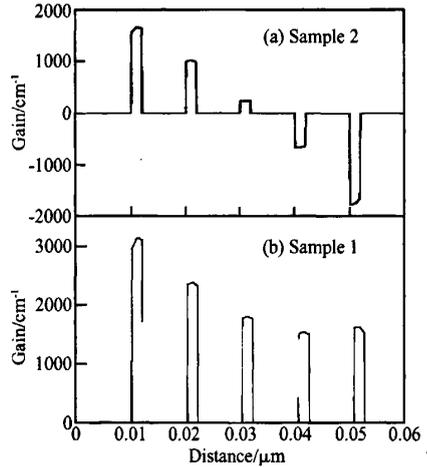


图 2 阱内增益分布模拟比较 左侧为近 p 面,右侧为近 n 面.

Fig. 2 Simulation of local gain through 5 wells From left to right is p-side to n-side.

对三种不同量子阱结构中性能最好的样品 1,进一步研究其内量子效率.它的外微分子效率随腔长变化如图 3 所示.根据公式 $\eta_d^{-1} = \eta_i^{-1} \times (1 + \frac{\alpha_i L}{\ln(1/R)})$ 作线性拟合^[5],得到其内量子效率为 12%,内部光学损耗为 $35cm^{-1}$.但是从图 3 明显可

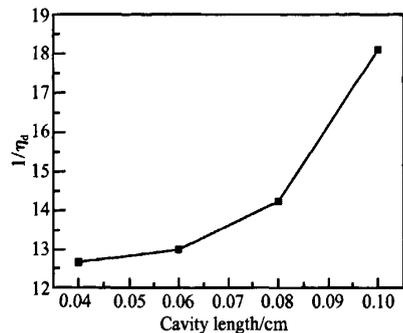


图 3 样品 1 的外微分子效率与腔长关系

Fig. 3 External differential quantum efficiency versus cavity length of sample 1

见 η_i^{-1} 和 L 的线性关系符合的不是很好,因此计算出的内量子效率和损耗可能不准确.分析其原因,应是由于对于不相同量子阱结构、不同腔长的样品,由于几何限制的因素导致漏电流增生的程度不同,从而内量子效率不是一个仅依赖于量子阱结构的定值,而是满足 $\eta_i = \eta_i(L)^{[6]}$.在漏电流的观测中发现,较长腔长的样品漏电流也较大,相应内量子效率较低,根据 $\eta_i^{-1} = \eta_i^{-1} \left(1 + \frac{\alpha_i L}{\ln(1/R)}\right)$,反映在 η_i^{-1} - L 关系上就是其斜率随腔长增加而增大.这与图 3 的趋势相一致,验证了上述分析.

还研究了样品 1 的腔长-阈值关系,从而得到腔长的优化参数.图 4 是实验结果.从中可以看出,阈值电流随腔长不是单调变化的,存在一个使得阈值

电流最小的腔长,并且 $\ln(j_{th})$ 和 L_c^{-1} 很好地符合线性关系.以上关系是基于对于量子阱的增益饱和模型假设 $\frac{g}{g_i} = \ln\left(\frac{J}{J_{tran}}\right)$ 推导得到的^[7],所以此结果验证了这一对数关系的增益饱和模型.更重要地,从 $\ln(j_{th})$ 和 L_c^{-1} 的线性拟合中得到其斜率为 $770\mu\text{m}$,此斜率恰为使阈值电流 I_{th} 最小的最优腔长.

4 结论

通过比较不同 MQW 结构的 LD 样品,确认了四元合金量子阱结构优于三元合金量子阱结构,表现为前者的阈值电流 I_{th} 更低和外微分量子效率 η_e 更高.按照应力补偿的原理可以初步解释这一现象.此外,通过对多量子阱结构 LD 样品的性能测量,研究并证实了漏电流对 LD 的影响,以及 LD 所遵从的增益饱和模型,在此基础上得到了 LD 腔结构的优化参数.

参考文献

- [1] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S C, et al. Room-temperature continuous-wave operation of InGaN multi-quantum-well structure laser diodes. *Appl Phys Lett*, 1996, 69: 4056
- [2] Nakamura F, Kobayashi T, Asatsuma T, et al. Room-temperature pulsed operation of a GaInN multiple-quantum-well laser diode with optimized well number. *J Cryst Growth*, 1998, 189/190: 841
- [3] Domen K, Soejima R, Kuramata A, et al. Interwell inhomogeneity of carrier injection in InGaN/GaN/AlGaIn multi-quantum well lasers. *Appl Phys Lett*, 1998, 73: 2775
- [4] Aumer M E, LeBoeuf S F, Moody B F, et al. Strain-induced piezoelectric field effects on light emission energy and intensity from AlInGaIn/InGaIn quantum wells. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 3803
- [5] Piprek J, Abraham P, Bowers J E. Carrier nonuniformity effects on the internal efficiency of multiquantum-well lasers. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 489
- [6] Smowton P M, Blood P. On the determination of internal optical mode loss of semiconductor lasers. *Appl Phys Lett*, 1997, 70: 2365
- [7] Blood P. The evaluation of laser diodes and gain media. *Proceedings of the Summer School on Semiconductor Nanostructures and Optoelectronic Devices*, 2005: 73

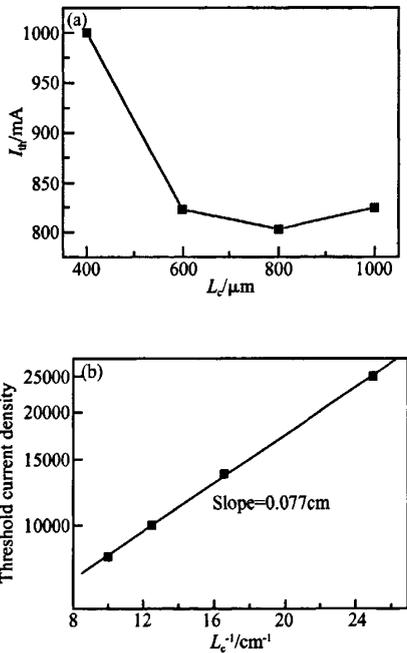


图 4 样品 1 的腔长-阈值关系 (a)原始测量结果;(b)换算后的阈值电流密度-腔长结果

Fig. 4 Cavity length dependence of threshold current (a) Raw measurement results; (b) Corresponding threshold current density versus reciprocal of cavity length

Characteristics and Structural Optimization of Multi-Quantum-Well Structure of GaN-Based Laser Diode*

Wei Qiyuan^{1,†}, Li Ti², Wang Yanjie², Chen Weihua², Li Rui², Pan Yaobo², Xu Ke²,
Zhang Bei², Yang Zhijian², and Hu Xiaodong²

(1 *Research Center for Wide Gap Semiconductors, Peking University, Beijing 100871, China*)

(2 *State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: For the quaternary and ternary alloy as active region of LDs, the key parameters including threshold current and external differential quantum efficiency of LD samples were compared and investigated, while the gain distribution was simulated. The better performance is attributed to the optimum quaternary MQW structure design. For the optimum MQWs, the further study on the leakage current and gain in LDs is performed.

Key words: GaN; laser diode; quantum well; quaternary alloy; gain

PACC: 7280E; 7845; 4260

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0471-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60477011, 60476028, 60406007, 60276010)

† Corresponding author. Email: lofi@pku.edu.cn

Received 11 December 2006, revised manuscript received 13 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics