

InGaAs 量子点激光器光增益的温度特性 *

宁永强^{1,2)} 刘云^{1,2)} 王立军^{1,2)} 高欣³⁾

¹⁾中国科学院激发态物理开放实验室,吉林,长春,130021;

²⁾中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林,长春,130021;

³⁾长春光学精密机械学院,高性能半导体激光国防重点实验室,吉林,长春,130022;

摘要 研究了非耦合多层 InGaAs 量子点材料光增益的温度特性,并与 InGaAs 单量子阱材料进行了对比,发现 InGaAs 量子点表现出更好的增益温度稳定性.同时发现随着温度升高,在 140~200K 温度范围内,InGaAs 量子点增益峰值首先增大,当温度超过 200K 后开始减小.对这种增益特性的产生机制进行了分析.增益曲线峰值波长随温度升高单调地向长波长方向移动,与量子阱材料相比具有更好的温度稳定性.

关键词 量子点,光增益,温度特性.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF OPTICAL GAIN IN InGaAs QUANTUM DOTS LASER *

NING Yong-Qiang^{1,2)} LIU Yun^{1,2)} WANG Li-Jun^{1,2)} GAO Xin³⁾

¹⁾Laboratory of Excited States Processes, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130021, China;

²⁾Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130021, China;

³⁾National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun
Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The temperature dependence of gain in InGaAs multi-stacked quantum dots (QDs) laser was investigated and compared with InGaAs single quantum well (SQW) laser. It was found that quantum dot laser showed a much better stability of gain on temperature. The gain in InGaAs QDs increases with temperature in the region from 140K to 200K. Beyond 200K the gain decreases with increasing temperature. The mechanism for the above gain characteristics was analyzed. The gain peak wavelength moves to longer wavelength range with increasing temperature and exhibits a better temperature stability compared with quantum well laser.

Key words quantum dots, optical gain, temperature dependence.

引言

近年来半导体量子点材料及光电器件成为研究的热门课题.理论上预言量子点激光器比量子阱、量子线激光器具有更好的激射特性.同量子阱、量子线相比,量子点在三个维度上的尺寸都与电子德布罗意波相当,使电子态密度呈 δ 函数形式,大大增加了电子在分立能级上的态密度.因此预期量子点激光器有可能实现更低的阈值电流密度、更高的特征温度和更高的微分增益^[1~3].然而在实验上要完全实

现理论上预言的与量子点相伴的优良特性是非常困难的.其主要原因是在量子点生长过程中量子点的尺寸、形状等不是均一的,而存在一定的分布.这样的分布将使电子态密度分布仍有一定的宽度,不可能形成实质意义上的 δ 函数.同时量子点大小的不均匀性将使量子点光增益具有比较宽的分布.为探索降低量子点激光器的阈值电流密度、提高温度稳定性和效率的途径,本文研究了 InGaAs 量子点激光器增益谱的温度特性,并对量子点光增益机制进行了分析.

* 国家自然科学基金(批准号 69976032,19974047)资助项目和吉林省科委基金资助项目。

稿件收到日期 2001-11-17,修改稿收到日期 2002-02-27

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 69976032, No. 19974047) and by the Science Foundation of Jilin Province of China.

Received 2001-11-17, revised 2002-02-27

1 实验

用 MOCVD 方法生长制备了 InGaAs/GaAs 量子点结构材料.首先在 GaAs 衬底上生长 GaAs 缓冲层和 AlGaAs 覆盖层,然后生长窄能带的 AlGaAs 波导层,再继续生长多个周期的 InGaAs 量子点有源区.其后继续生长 AlGaAs 波导层、AlGaAs 覆盖层、AlGaAs 和 GaAs 高掺杂欧姆接触层.有源区设计成非耦合的三层量子点结构.由三个周期的 5nm GaAs/1.8nm InGaAs/5nm GaAs/7nm AlGaAs 构成.InGaAs 量子点层之间由 7nm AlGaAs 势垒层在空间上隔离,避免不同量子点层间电子态的耦合,具体能带结构如图 1 所示.生长的量子点面密度约为 $3 \times 10^{10}/\text{cm}^2$,底部近似为方形,横向尺寸约为 10nm 左右.

为比较量子点与量子阱材料增益特性的不同,我们还生长制备了 InGaAs/AlGaAs 单量子阱激光器.量子阱 InGaAs 层 In 组分为 0.22, AlGaAs 势垒层中 Al 组分为 0.15.

量子点激光器光增益测量采用单程增益多段方法,每段长度为 $300\mu\text{m}$,如图 2 所示^[4].在段之间沿横向刻出宽度仅为 $2 \sim 3\mu\text{m}$ 左右的隔离沟槽,深入到 p 型 AlGaAs 覆盖层内,使不同的段之间电学上隔离,以便保证在电注入到某个段时没有电流扩散到相邻的段内.其增益测试原理如下所示^[5]

$$I = \frac{I_p}{G} (e^{G L} - 1), \quad (1)$$

式(1)中 I_p 是自发发射强度, L 是增益长度, G 是净模增益, I 是放大自发发射谱(ASE)强度.比较增益长度分别为 L 和 $2L$ 的两个 ASE 谱 I_L 和 I_{2L} 即可得到增益谱.

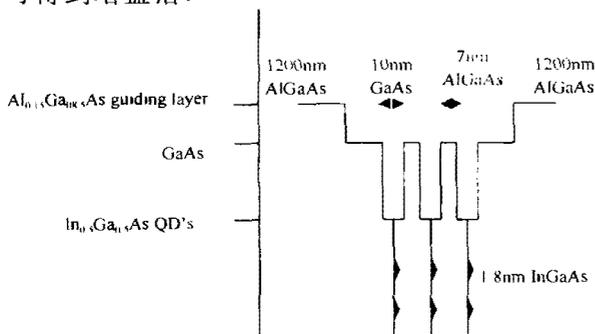


图 1 InGaAs/GaAs 非耦合三层量子点结构及能带示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure and energy bands of non-coupled 3-layer-quantum dots of InGaAs/GaAs

$$G = \frac{1}{L} \left[\ln \left(\frac{I_{2L}}{I_L} - 1 \right) \right]. \quad (2)$$

激光器样品通过常规的半导体激光器工艺制作成条型边发射结构,有源区条宽 $50\mu\text{m}$.在条型欧姆接触电极表面通过刻蚀方法刻出宽约 $10\mu\text{m}$ 的窗口,其深度穿透 p 型高掺杂 GaAs 和 AlGaAs 欧姆接触层.在电注入时测量从表面窗口发射的自发发射谱强度和谱峰形状,以保证不同段之间具有同样的注入电流密度和相同的费米能级分布.

量子点激光器增益测量采用电脉冲泵浦方式,脉冲宽度 300ns ,重复频率 1kHz .这样的电注入条件可以尽量避免有源区中的热效应而导致的费米能级分布变化.测试温度由 $150\text{K} \sim 300\text{K}$,通过 K20 高纯氮气 J-T 效应温度控制器控制低温样品室中的温度.

2 实验结果与讨论

InGaAs 量子点样品在温度 300K 下不同的注入电流密度时的光增益谱如图 3 所示.电流密度从 $400 \sim 1500\text{A}/\text{cm}^2$.随着电流密度的提高,增益谱峰连续地向短波长方向移动.这种连续移动是量子点尺寸大小及形状等的不均匀性导致增益谱非均匀展宽的结果.由于这种非均匀展宽,在增益谱中观察不到明确的量子点基态、激发态及浸润层的特征峰.随着电流密度增加,增益峰从低电流密度时的 10400\AA 移动到高注入电流密度下的 9800\AA ,相应于从量子点基态移动到激发态、直到浸润层.

InGaAs 量子点样品在相同注入电流密度 ($1\text{kA}/\text{cm}^2$)、不同温度 ($140 \sim 300\text{K}$) 时的光增益谱如图 4 所示.图中虚线为对应的 InGaAs 量子阱激光器样品增益曲线.由图 4 可看出,在相同的温度下量子点的增益峰值强度小于量子阱样品(相差约一倍).

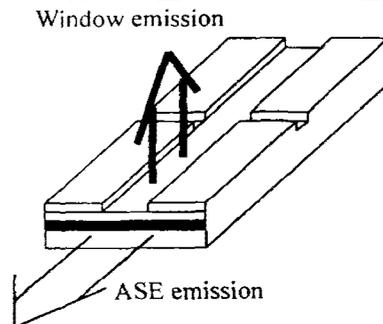


图 2 利用 multi-sections 方法测量单程光增益样品结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gain sample with single-pass multisections method

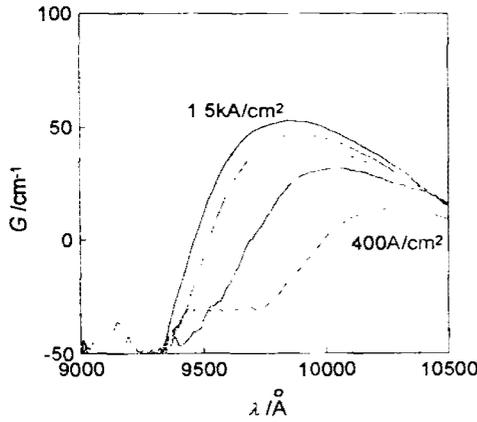


图3 InGaAs 量子点在 300K 时不同注入电流密度下的光增益谱。注入电流密度分别为：
1.5kA/cm²、1.4kA/cm²、1.1kA/cm²、800A/cm²、500A/cm² 及 400A/cm²

Fig.3 Net modal gain spectra of InGaAs QDs at 300K and different injected current densities. The injected current densities are 1.5kA/cm²、1.4kA/cm²、1.1kA/cm²、800A/cm²、500A/cm² and 400A/cm², respectively

根据量子点面密度及尺寸大小可以估算出其横向填充因子约 0.03,由此可以推断量子点的材料增益与量子阱相比有大的提高。

由图 4 还可以看出 InGaAs 量子点材料的光增益谱半宽比量子阱增益谱约宽一倍,且谱线形状不对称。这种非均匀展宽主要是由于量子点大小尺寸

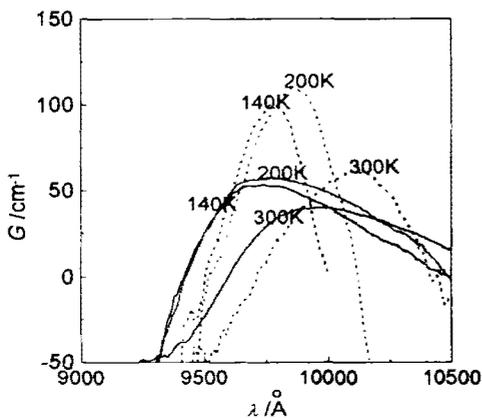


图4 InGaAs 量子点及量子阱不同温度的光增益谱。注入电流密度 1kA/cm², 实线是量子点,虚线是量子阱材料

Fig.4 Net modal gain spectra of InGaAs QDs and SQW at different temperature. The injected current density is 1kA/cm². The solid line is for the QDs sample and the dashed line is for the SQW sample.

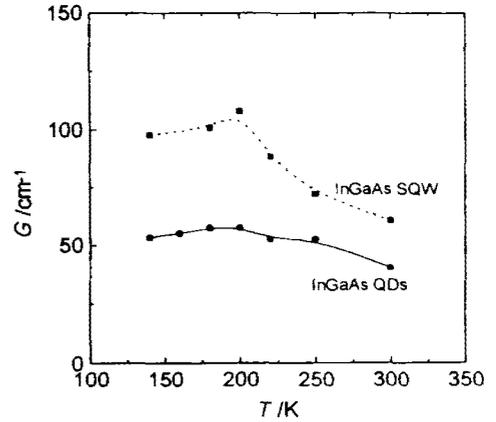


图5 InGaAs 量子点峰值增益与温度的关系,其中实线为 InGaAs 量子点,虚线为 InGaAs 量子阱。注入电流密度 1kA/cm²

Fig.5 Temperature dependence of peak net modal gain of InGaAs QDs. The solid line is for the QDs sample and the dashed line is for the SQW sample. The injected current density is 1kA/cm²

及形状分布产生的,同时量子点激发态跃迁、浸润层及 GaAs 量子阱层也对总的增益谱线形状有一定的贡献。

由图 4 我们发现 InGaAs 量子点和量子阱的峰值光增益均表现出类似的特征:随着温度升高,峰值增益首先增大,当温度超过 200K 以后开始减小,图 5 给出更直观的比较。对此结果一般认为是在低温下杂质不饱和电离、载流子未能充分“活化”,没有参

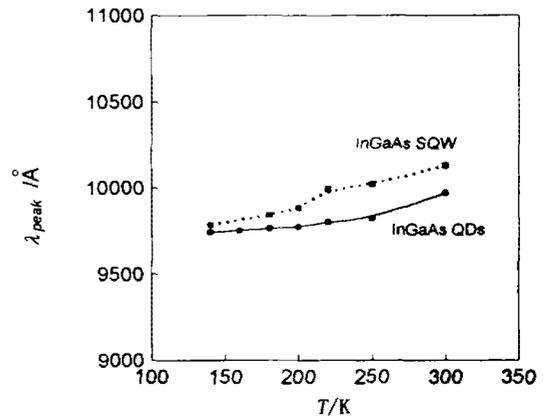


图6 InGaAs 量子点及量子阱增益谱峰值波长随温度变化关系。其中实线为量子点样品,虚线为量子阱样品。注入电流密度为 1kA/cm²

Fig.6 Temperature dependence of gain peak wavelength of InGaAs QDs and SQW samples. The solid line is for the QDs sample and the dashed line is for the SQW sample. The injected current density is 1kA/cm²

加注入载流子复合发光过程. 随温度的升高, 更多的载流子加入到跃迁中使光增益得到提高. 随温度的继续升高, 载流子分布展宽使光增益下降. 由图 5 曲线还可看出量子点峰值光增益随温度变化更为平缓, 从 140K~150K, 增益平均变化 $0.08\text{cm}^{-1}/\text{K}$. 而 InGaAs 量子阱样品增益平均变化 $0.23\text{cm}^{-1}/\text{K}$. InGaAs 量子点样品具有更好的增益温度稳定性, 结果与预期的量子点态密度 δ 分布相符.

InGaAs 量子点和量子阱样品的增益峰值波长随温度变化关系如图 6 所示. 注入电流密度仍保持为 $1\text{kA}/\text{cm}^2$. 随着温度升高, 量子点和量子阱的增益谱峰波长均向长波方向移动. 在 140~250K 温度范围内, 量子点样品波长变化 ($0.72\text{\AA}/\text{K}$) 明显比量子阱样品 ($2.2\text{\AA}/\text{K}$) 平缓.

3 结论

研究了 InGaAs 量子点材料的光增益与温度的关系, 并与量子阱材料的特性进行了对比. 发现 InGaAs 量子点发现出更好的增益温度稳定性. 同时对

增益随温度变化的机制进行了分析. 增益曲线峰值波长随温度升高单调地向长波长方向移动, 表现出比量子阱更好的温度稳定性.

REFERENCES

- [1] Ledentsov Nikolai N, Grundmann M, Heinrichsdorff F., *et al.* Quantum-dot heterostructure lasers. *IEEE J. Sel. Quantum Electron.*, 2000, **6**(3):439
- [2] Gyoungwon Park, Shchekin Oleg B, Huffaer Diana L, *et al.* Low-threshold oxide-confined 1.3 μm quantum dot laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **13**(3):230
- [3] Gyoungwon Park, Shchekin Oleg B, Sebastian Csutak, *et al.* Room-temperature continuous-wave operation of a single-layer 1.3 μm quantum dot laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(21):3267
- [4] Herrmann E, Snowton P M, Summers H D, *et al.* Modal gain and internal mode loss of a quantum dot laser. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(2):163
- [5] Oster A, Erbert G, Wenzel H. Gain spectra measurements by a variable stripe length method with current injection. *Electron. Lett.* 1997, **33**(10):864