

文章编号: 0258-7025(2002)04-0293-04

InGaAs/GaAs 量子点类脊型激光器的激射特性

宁永强¹, 高欣², 王立军¹, Peter Smowton³, Peter Blood³

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院激发态物理开放实验室, 长春 130021
² 长春光机学院大功率激光国家重点实验室, 130022; ³ Astronomy and Physics Department, Cardiff University, UK)

摘要 用 MOCVD 方法生长制备了多层 InGaAs/GaAs 量子点结构, 并研制出量子点激光器。研究了多层量子点激光器阈值激射特性与量子点有源区结构之间的关系。结果表明激光器的阈值电流密度依赖于量子点的结构。通过采用多层量子点、对量子点层间进行耦合以及采用宽禁带 AlGaAs 作为量子点层势垒可以有效地降低激光器的阈值电流密度。获得了最低为 20 A/cm² 的平均阈值电流密度。量子点激光器的激射波长也与有源区结构有关。随着量子点层数增加, 激射峰向长波方向移动。

关键词 量子点, 脊型结构, InGaAs, 阈值电流密度

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Lasng Characteristics of InGaAs/GaAs Ridge-like Quantum Dots Laser

NING Yong-qiang¹, GAO Xin², WANG Li-jun¹, Peter Smowton³, Peter Blood³

(¹ Laboratory of Excited States Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021

² National Key Lab on High Power Semiconductor Lasers,

Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022

³ Astronomy and Physics Department, Cardiff University, UK)

Abstract In this work, InGaAs/GaAs multi-layers quantum dots are grown by using MOCVD technique and ridge-like stripe structures are fabricated. It is shown that the threshold current density is dependent on the QDs structure. The threshold current density is greatly lowered by using multi-layers quantum dots, coupled QDs layers and wide band gap barriers. The minimum average threshold current density of 20 A/cm² is achieved. The lasing wavelength is also dependent on the active region. With increasing the number of QDs layers, the lasing peak will move to long wavelength end.

Key words quantum dots, ridge, InGaAs, threshold current density

1 引 言

半导体量子点材料及光电器件的研究近年来成为热门课题。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^[1-6]。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。其中一个主要的原因是在生长过程中量子点的尺寸、形状等不是均一的,而是存在一定的分布。这样的分布将使电子态密度分布仍有一定的宽度,而不可能形成实质意义上的 δ 函数。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

收稿日期 2001-03-19;收到修改稿日期 2001-05-31

基金项目 国家自然科学基金(编号:69976032,19974047)及吉林省科委基金资助项目。

作者简介:宁永强(1965—)男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士,主要从事半导体量子点激光器与微腔激光器研究。E-mail:ningyq@mail.jl.cn

和效率的途径,本文研制了类脊型结构量子点激光器,并研究了不同的量子点结构对激光器阈值电流密度、效率及激光发射波长的影响。

2 实 验

用 MOCVD 方法生长制备了多层结构 InGaAs/GaAs 量子点材料,生长温度为 500℃。首先在 n 型 GaAs 衬底上生长 GaAs 缓冲层和宽禁带 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 覆盖层,然后生长窄禁带的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 波导层,两个 AlGaAs 层中的 Al 组份 x 分别为 0.6 和 0.15。再继续生长多个周期的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子点有源区,其中 In 组份为 0.5。其后继续生长 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 波导

层, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 覆盖层, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 和 GaAs 高掺杂欧姆接触层。量子点有源区设计成量子点层之间具有相互耦合及无耦合结构。非耦合的量子点有源区由多个周期的 5 nm GaAs/1.8 nm InGaAs/5 nm GaAs/7 nm AlGaAs 构成。InGaAs 量子点层之间由 7 nm 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。而具有耦合结构的量子点有源区则由多个周期的 5 nm GaAs/1.8 nm InGaAs/5 nm GaAs 反复而成,没有 7 nm 厚的 AlGaAs 势垒层,两种结构的具体能带如图 1 所示。量子点的层数分别设计为 3 层和 5 层。另外设计生长了以 AlGaAs 为量子点势垒层的结构,以提高 InGaAs/AlGaAs 量子点势垒,进一步改善对量子点电子分布的限制。

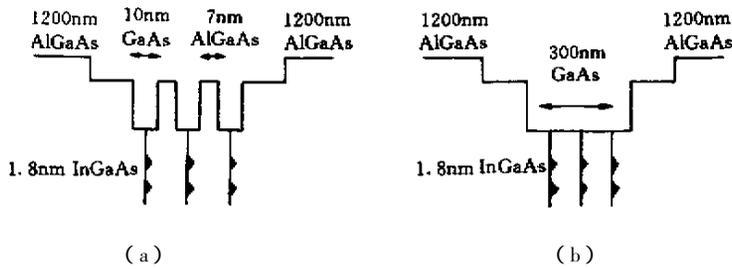


图 1 非耦合及耦合结构多层量子点能带示意图

(a) 非耦合量子点 (b) 耦合量子点

Fig.1 Schematic of energy bands of non-coupled and coupled multi-stacked quantum dots layers

(a) non-coupled quantum dots layers ;(b) coupled quantum dots layers

为减少由于注入电流在横向上的扩散造成的阈值电流密度的增加,我们在横向方向上对量子点有源区进行刻蚀。刻蚀深度穿透 p -AlGaAs 波导、量子点有源区和 n -型 AlGaAs 波导层并深入到 n -型 AlGaAs 覆盖层中形成类似脊型激光器的结构,如图 2 所示。脊型条宽度分别为 10 μm , 15 μm 和 20 μm , 激光器的腔长为 2000 μm 。在刻蚀出的脊型结构表面淀积 SiN 薄膜对暴露出的量子点有源区形成保护,并对 p 型和 n 型欧姆接触层之间形成电隔离。

量子点激光器 P - I 特性测量采用室温下电脉冲抽运方式。由脉冲电源产生的电脉冲宽度 300 ns, 重复频率 1 kHz, 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阈值电流密度的增加。发射激光强度测量采用硅光二极管。利用取样积分放大器来调整抽运电流脉冲与硅光二极管探测的光信号脉冲延迟和门宽。激射光谱测量采用 MS9710B 型光谱分析仪,光谱分辨率为 0.07 nm。用透镜将激光器光斑聚焦到光纤端面并输入到光谱分析仪中。测量时同样采用脉冲方式抽运激光器,

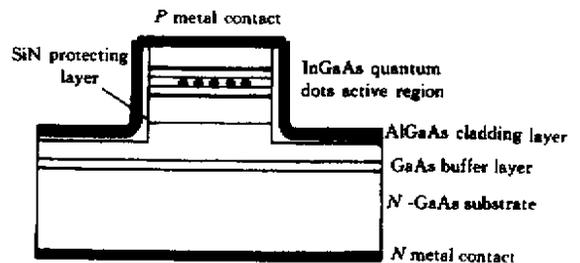


图 2 类脊型量子点激光器结构示意图

Fig.2 Schematic structure of ridge-like quantum dots laser

脉冲宽度及脉冲频率与 P - I 特性测量相同。

3 结果与讨论

图 3 表示不同量子点结构的类脊型 InGaAs/GaAs 激光器的 P - I 特性。测量在室温下以脉冲抽运方式进行,脊型条宽为 20 μm , 腔长 2 mm。最高的

阈值电流约为 50 mA, 外量子效率约为 10% 左右。以 AlGaAs 为量子点势垒层的激光器与 GaAs 势垒量子点激光器相比表现出较高的外量子效率。

是在脉冲条件下工作, 有源区中产生的温升也造成阈值电流密度增大。另一方面, 窄脊型 (10 μm) 激光器的阈值电流密度也比 15 μm 条宽的激光器高。其原因一般来说是双重的: 一方面, 在脊型结构中垂直方向的刻蚀对上、下波导层的边缘造成损伤, 产生额外的光散射, 增大了散射光损耗, 减小了模增益。相对于窄条型结构激光器来说, 这种影响更为明显。另一方面, 刻蚀穿过量子点有源区, 给有源区边缘带来损伤, 增加了内损耗。由于这两方面的原因, 窄条型量子点激光器的阈值电流密度与宽条型结构相比有一定的增加。

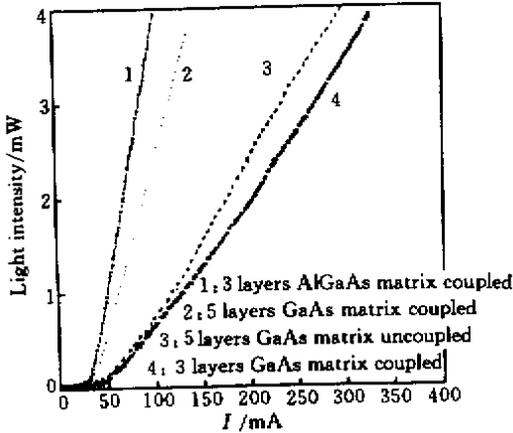


图3 InGaAs 量子点脊型激光器 P-I 曲线
量子点结构如图中所示

Fig.3 P-I curves of InGaAs quantum dots ridge-like laser

The detailed structures of the quantum dots layers are shown in the figure

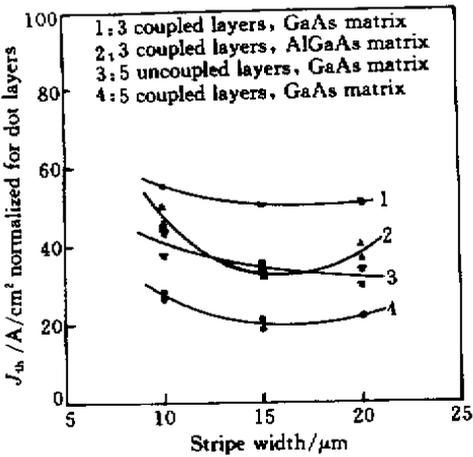


图4 不同结构量子点激光器总阈值电流密度与脊型条宽间关系, 具体量子点结构如图中所示

Fig.4 Dependence of total threshold current density on stripe width for different quantum dots lasers

图4 表示不同的量子点激光器总阈值电流密度与脊型结构条宽度之间的关系。图中的总阈值电流密度直接由注入电流密度与注入面积给出, 没有对量子点层数进行归一化。由图中可以看出总阈值电流密度与脊型条宽相关, 条宽为 15 μm 的激光器获得相对最低的阈值电流密度。随着脊型条宽度的增加, 阈值电流密度也略有增加。这一结果表明即使

图4 给出了具有不同层数或不同结构量子点激光器的总的阈值电流密度关系。在同样的量子点层数(5层)时, 比较相同脊型条宽的样品可以看出相邻量子点层之间存在耦合效应的激光器其阈值电流密度明显低于非耦合的量子点激光器(约差2倍)。对同样是3层量子点结构, 但分别以 GaAs 或 AlGaAs 作为量子点势垒的结果可以看出通过采用 AlGaAs 做势垒层, 总阈值电流密度有显著的降低, 最低约为 100 A/cm² 左右(条宽 15 μm)。阈值电流密度降低的原因是由于 AlGaAs 势垒的提高而使量子点能级电子态密度增加, 同时增强了对电子的限制, 减少了载流子的热分布。比较3层和5层的耦合量子点样品可以看出随着量子点层数的增加, 总阈值电流密度也有显著的减小。

图5 表示经过对量子点层数归一化后的平均阈值电流密度与量子点结构及脊型波导条宽间的关系。对具有5层耦合结构量子点激光器, 获得了最低的平均阈值电流密度(约为 20 A/cm²)。而3层耦

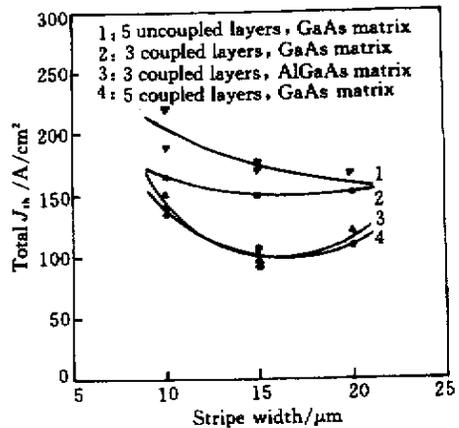


图5 对量子点层数归一化的平均阈值电流密度与脊型条宽间关系, 具体量子点结构如图中所示

Fig.5 Dependence of the normalized average threshold current density for quantum dots layers on stripe width

合量子点激光器的平均阈值电流密度约为 40 A/cm^2 ,是5层耦合量子点样品的2倍。在量子点结构设计中为研究量子点层数及耦合与否对阈值电流密度的影响,我们通过控制GaAs或AlGaAs势垒层的厚度来保持不同量子点层数的样品具有同样的光限制因子。这样随量子点层数的增加,量子点有源区的有效增益体积增大、增益增加,因而降低了激射阈值电流密度。

图6表示不同结构量子点激光器室温下的激射光谱。激光器的腔长固定为 $2000 \mu\text{m}$ 。激射光谱由很多模式构成,是典型的量子点光谱。以AlGaAs为量子点势垒层的激光器最强的激射峰波长在

1018 nm附近,是所测的所有样品中最短的波长。这与AlGaAs高势垒限制使量子点能级分裂更宽是相符的。以GaAs为量子点势垒层的激光器的激射峰在1040 nm附近。随着有源区中量子点的层数的增加,激射峰向长波方向移动。考虑到图5中所表示的归一化的平均阈值电流密度随量子点层数增加而减小,在较低的注入电流密度下激射的阈值条件就已经满足,此时其增益谱峰在长波长一端,因此多层量子点结构激光器的激射光谱与层数少的量子点激光器相比移向长波方向。

参 考 文 献

- 1 Nikolai N. Ledentsov, M. Grundmann, F. Heinrichsdorff *et al.*. Quantum-dot heterostructure lasers [J]. *IEEE J. Sel. Quantum Electron.*, 2000, (3) :439 ~ 451
- 2 Gyoungwon Park, Oleg B. Shchekin, Diana L. Huffaer *et al.*. Low-threshold oxide-confined 1.3- μm quantum-dot laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, (13) :230 ~ 232
- 3 Gyoungwon Park, Oleg B. Shchekin, Sebastian Csutak *et al.*. Room-temperature continuous-wave operation of a single-layered 1.3 μm quantum dot laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75 (21) :3267 ~ 3269
- 4 Hajime Shoji, Yoshiaki Nakata, Kohki Mukai *et al.*. Lasing characteristics of self-formed quantum dot lasers with multistacked dot laser [J]. *IEEE J. Sel. Quantum Electron.*, 1997, (3) :188 ~
- 5 D. Bimberg, N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov *et al.*. InGaAs-GaAs quantum dot lasers [J]. *IEEE J. Sel. Quantum Electron.*, 1997, (3) :196 ~
- 6 D. G. Deppe, D. L. Huffaker, S. Csutak *et al.*. Spontaneous emission and threshold characteristics of 1.3- μm InGaAs-GaAs quantum-dot GaAs-based lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, (35) :1238 ~ 1246

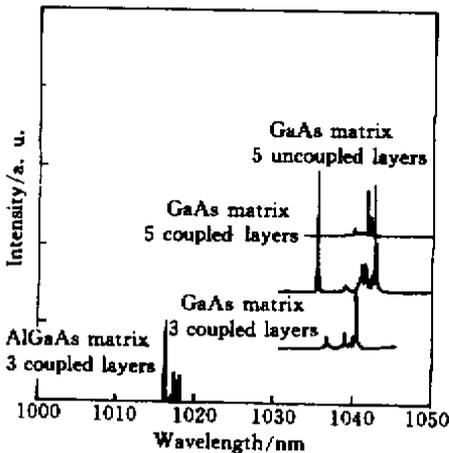


图6 量子点脊型激光器室温脉冲激射光谱,具体量子点结构如图中所示

Fig.6 Room temperature lasing spectra of quantum dots ridge-like lasers, the detailed structures are shown in the figure

国际光子学玻璃研讨会征文通知

国际光子学玻璃研讨会(International Symposium on Photonics Glasses—ISPG '2002)定于2002年10月14~17日在上海举行。会议由国际光学工程学会(SPIE)、中国硅酸盐学会、日本新玻璃论坛和中国国家自然科学基金委等发起;由中国科学院上海光机所、中国硅酸盐学会特种玻璃专业委员会和复旦大学先进光子学材料与器件国家重点实验室组织。会

议主席由干福熹院士担任。

会议主要议题包括:光子学玻璃、激光玻璃、光通信玻璃、光存储玻璃、功能玻璃以及溶胶-凝胶玻璃等。

请有意参加会议者,于5月15日前将论文题目和200字的英文摘要发至:

ISPG '2002 会议秘书组 戴世勋收

上海市 800-216 信箱 中国科学院上海光机所 邮编 201800

Fax 021-39910393

E-mail: dsx@laserglass.com.cn