

# InGaAsP 单量子阱半导体微盘激光器研究\*

章 蓓 王若鹏 丁晓民 杨志坚 戴 伦 崔晓明 王舒民

(北京大学物理系和介观物理国家重点实验室, 北京, 100871)

**摘要** 利用普通的液相外延和微加工技术成功地制备了 InGaAsP 单量子阱微盘激光器, 并从实验上观测到远低于普通激光器阈值条件下的单模振荡, 证实了微盘激光器中微盘很强的模式选择作用, 反映了微盘的微腔特征.

**关键词** 微盘激光器, 半导体激光器, 量子阱, InGaAsP/InP 异质结.

## 引言

以光电子器件取代部分微电子器件进行光互连与信息处理是信息高速化的必然趋势, 因此, 研究和发​​展超小型、低阈值、可集成化的微型半导体激光器一直是近 10 年来光电子学的一个重要研究方向. 最近从实验上演示成功的一种新颖的微型激光器——微盘激光器尤其引人注目<sup>[1,2,3]</sup>. 与普通的法布里-泊罗谐振腔型激光器不同, 这种微盘激光器是一种以半导体微型圆盘为谐振腔、以“回音壁”(Whispering Gallery 简称 WG) 模式为主要特征的微腔激光器, 这种激光器不仅具有高品质因子(Q 值)和大模式间距等微腔激光器的特点, 而且在制备中又避免了复杂的分布布拉格反射(DBR)镜面生长, 是一种很有研究价值和前途的新型微型激光器. 本文报道我们对这种微盘振荡器的初步研究结果, 我们首次研制成功液相外延(LPE)InGaAsP/InP 单量子阱微盘激光器, 并利用光致发光测量在液氮温度下演示了微盘激光器中远低于普通激光器阈值情况下的单模振荡效应.

## 1 微盘振荡器的理论考虑

为简化起见, 微盘光腔结构可近似看成是处于空间的一个圆盘介质. 由于这一体系具有不完整的对称性, 可将其分解为分别具有较高对称性的两个子系统来分析, 例如圆柱状子系统和平板状子系统. 原则上微盘中的光学模式应该是子系统中各种导波模式和辐射模式之组合. 分析表明, 其中有一类特殊的模式占优势, 即径向阶数最低、角度阶数较高而形成的品质因子很大的回音壁(WG)模式. 这种 WG 模式的光场主要沿微盘内周边环形传播, 只有小部分光能通过微盘壁发射出去. 图 1 给出微盘中 8 阶 WG 模式光能流的角度分量(曲线(a))

\* 国家自然科学基金资助项目  
本文 1994 年 10 月 5 日收到, 修改稿 1995 年 5 月 10 日收到

和径向分量(曲线(b))沿径向分布的近似计算结果. 详细计算将另文发表. 图 1 中曲线(a)表明, 角度分量的光能流集中在微盘周界内  $\lambda/n_{eff}$  附近的环形区域内, 其中  $\lambda$  为真空中的波长,  $n_{eff}$  为圆盘介质的有效折射率. 值得指出的是, 圆盘中径向辐射的光能量比角度能流低约 4 个数量级, 表明由于圆盘状微腔的内反射, 使光很好地被限制在微盘内, 导致了很高的 Q 值.

为了使光场在微盘中得到很好的限制并使最低阶模式占优势, 从实验上就要求半导体光学微型圆盘材料与周围介质之间有较强的折射率差, 而且其厚度应小于  $\lambda/2n_{eff}$ , 因此, 实际上典型的半导体微盘激光器往往制成图钉形的三维构形.

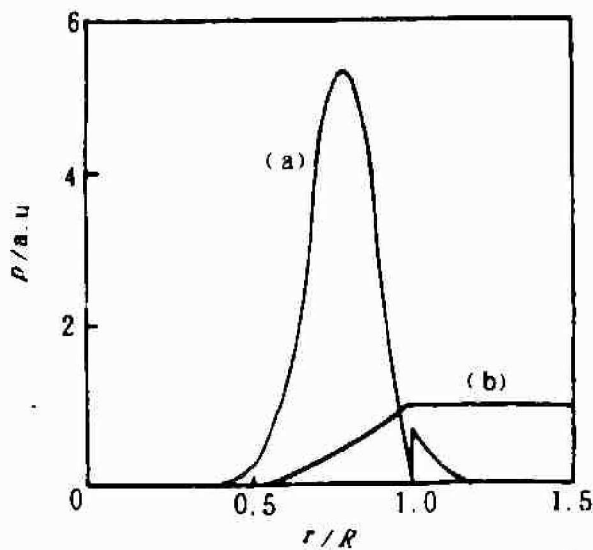


图 1 8 阶回音壁(WG)模式光流的径向分布  
(a)光流的角度分量,(b)光流的径向分量( $\times 2000$ )

Fig. 1 The radial distributions of angular and radial optical flux for an 8th order W.G. made in a microdisk cavity

(a) angular flux, (b) radial flux ( $\times 2000$ )

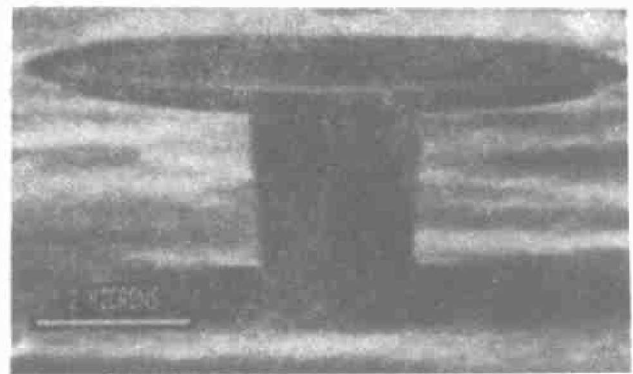


图 2 液相外延 InGaAsP 单量子阱  
微盘激光器侧视照片

Fig. 2 The side-view scanning electron microscopic image of the liquid phase epitaxial InGaAsP single quantum well microdisk laser

## 2 InGaAsP 微盘激光器的制备

本实验中, 制备 InGaAsP 微盘激光器的外延片是利用改进的液相外延技术生长的 InGaAsP/InP 单量子阱异质结构<sup>[4]</sup>. 外延层由成份不同的 5 层四元系 InGaAsP 外延膜组成, 其中量子阱是带隙波长为  $1.5\mu\text{m}$  的 InGaAsP, 阱层上下两边带隙波长分别为  $1.25\mu\text{m}$  和  $1.03\mu\text{m}$  的结构对称的四元系 InGaAsP 外延层, 其中势阱厚度约  $20\sim 40\text{nm}$ . 制备微盘激光器时, 在外延片上首先利用低温淀积  $\text{SiO}_2$  掩膜层, 然后用电子束曝光或普通光刻技术形成圆形图形, 最后用选择性化学腐蚀等微加工技术形成立体结构<sup>[5]</sup>. 我们成功地制成了微盘直径为  $2\sim 10\mu\text{m}$  的液相外延 InGaAsP/InP 单量子阱微盘激光器. 据我们所知, 这种液相外延的微盘结构尚属首次. 图 2 所示的照片是典型的液相外延 InGaAsP 微盘激光器的侧视图.

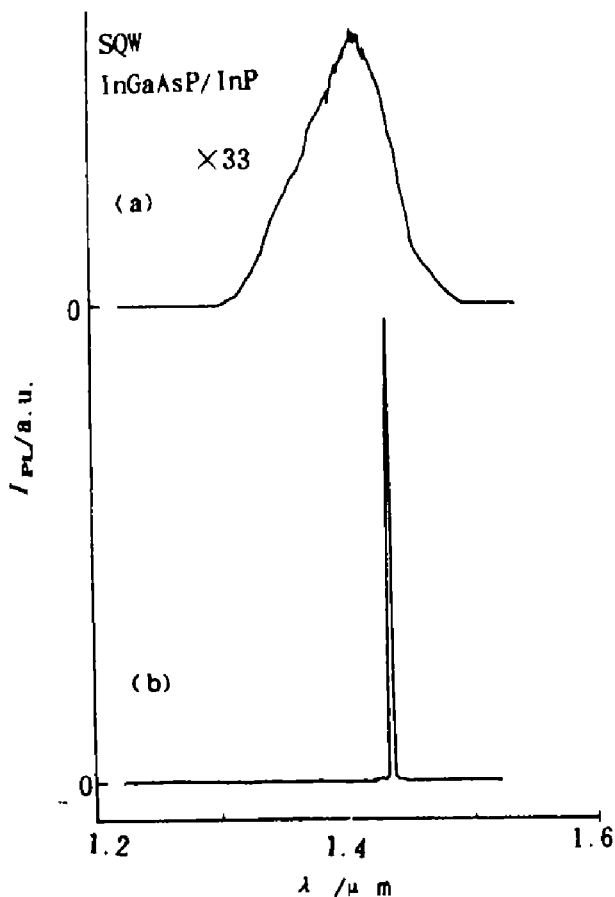


图 3 液相外延 InGaAsP/InP 单量子阱结构的 77K 光致发光(PL)谱

(a)未进行加工的外延片,(b)微盘激光器

Fig. 3 Photoluminescence spectra of LPE grown InGaAsP/InP single quantum well structure at 77K

(a) PL spectrum of unprocessed LPE wafer,  
(b) PL spectrum of microdisk laser

内,我们将探测器的接收方向偏离微盘的法线方向.为对比起见,对于未经加工的 InGaAsP/InP 单量子阱液相外延片和微盘激光器阵列,在相同的条件下分别进行了 PL 测量<sup>[6]</sup>.图 3 中曲线(a)和(b)分别是外延片未进行微盘加工前体样品和直径为  $7.0\mu\text{m}$  微盘激光器的 PL 光谱.由图 3 可见,曲线(a)中外延样品的 PL 谱在峰值  $1.408\mu\text{m}$  的半高全宽(FWHM)为  $80\text{nm}$ ,而微腔激光器的 PL 峰处于  $1.434\text{nm}$ ,其半高全宽值明显变小,仅为  $2\text{nm}$ ,如曲线(b)所示.这一结果表明,在微盘样品发光谱中出现了单模振荡,自发发射在激射模式上有很强的耦合作用.值得指出,图 3 所示 PL 实验中微盘振荡器的发光强度比同样面积外延样品的强度强约 60 倍,估计每个微盘的平均入射泵浦光功率至少小于  $1\mu\text{W}$ ,此时,微盘激光器处于远小于阈值条件下的工作状态.这说明即使在较低的光泵浦作用下,由于 InGaAsP 微盘的存在,可允许的腔模式大大减少,自发发射耦合到腔模式的作用大大增强,显示了很强的模式选择作用,导致了远低于阈值条件下的单模振荡.从而证实了微盘激光器与普通激光器明显不同的微腔特征.

综上所述,我们利用普通的液相外延和微加工技术首次成功地制备了 InGaAsP 单量子阱微盘激光器,并从实验上观测到了远低于普通激光器阈值弱泵浦条件下的单模发射,证实

尤如一个以 InGaAsP 外延层为顶盘、InP 为钉柱、站立在 InP 衬底上的微型图钉.圆盘顶部是直径为  $8\mu\text{m}$  厚约  $900\text{\AA}$  的  $\text{SiO}_2$  复盖层, $\text{SiO}_2$  下面是直径为  $6.5\sim 7.0\mu\text{m}$  由 5 层四元系 InGaAsP 所组成的单量子阱结构,圆盘底部由直径为  $2\mu\text{m}$ 、柱高为  $2.5\mu\text{m}$  的 InP 柱所支撑,由于腐蚀剂对 InP 不同晶向的影响,InGaAsP 圆盘和 InP 支柱截面演变成近似为四角体形状.实验表明,由这样的微盘激光器组成阵列,各微盘之间有较好的均匀性.微盘激光器研制的成功表明,上述微加工技术满足了微盘激光器研制的基本要求.

### 3 光泵 InGaAsP 微盘激光器的发光特性

为研究微盘激光器的发光特性,我们对制备的 LPE InGaAsP 微盘激光器进行了液氮温度下光致发光(PL)测量.泵浦光源是波长为  $488.0\text{nm}$  的 Ar 离子激光束,通过 HRDI 光谱仪连同液氮冷却的 Ge 探测器测量 PL 谱.由于 WG 模式径向光流主要分布在微盘平面附近较小的立体角

了微盘激光器中微盘很强的模式选择作用,反映了微盘的微腔特征.这些结果为进一步从实验上探讨微盘激光器的阈值行为和光学模式打下了较好的基础.显而易见,微盘激光器为我们提供了极为有趣生动的微型谐振器的实例,其深刻的物理内涵和应用潜力将有待进一步研究.

**致谢** 承蒙北京大学电镜室张存圭、徐军、张会珍在扫描电镜实验和北京大学物理系张丽珠、张伯蕊在光致发光测量中热忱帮助及甘子钊教授鼓励支持,不胜感谢.

### 参考文献

- 1 McCall S L, Levi A F J, Slusher R E, *et al.* *A. P. L.*, 1992, **63**(3):289
- 2 levi A F J, Slusher R E, McCall S L, *et al.* *Electron Lett.*, 1992, **28**(11):1010
- 3 Yamamoto Y, Slusher R E. *Physics Today*, 1993, June: 66
- 4 杨志坚,党小忠,等. *中国激光*, 1994; **21**(1):1
- 5 章蓓,张存圭,戴伦,等. *J. Chinese Electron Microscopy Society*, 1994, **13**(4):301
- 6 Zhang Bei, Wang Ruopeng, Ding Xiaomin, *et al.* *Solid State Commun.*, 1994, **91**(9):699

## THE STUDY ON InGaAsP SINGLE QUANTUM WELL SEMICONDUCTOR MICRODISK LASERS\*

Zhang Bei Wang Ruopeng Ding Xiaomin  
Yang Zhijian Dai Lun Cui Xiaoming Wang Shumin  
(Department of Physics, State Key Laboratory for Mesoscopic Physics,  
Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The InGaAsP single quantum well microdisk lasers were successfully fabricated by using the conventional liquid phase epitaxy and microfabrication techniques for the first time. The single mode oscillation in the condition of a much lower threshold than that of conventional laser diode was observed experimentally. It demonstrated strong mode-selection capability of the microdisk, reflecting the character of a microcavity.

**Key words** microdisk laser, semiconductor laser, quantum well, InGaAsP/InP heterostructure.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China