

# MOCVD 生长 InGaAs/InGaAsP 多量子阱光泵微碟激光器\*

吴根柱<sup>1</sup> 张子莹<sup>2</sup> 任大翠<sup>1</sup> 张兴德<sup>1</sup>

(1 长春光机学院高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

(2 中国科学院半导体研究所国家光电子工艺中心, 北京 100083)

**摘要:** 用 MOCVD 方法生长了 InGaAs/InGaAsP 多量子阱光泵微碟激光器外延片, 用光刻、干法刻蚀和湿法刻蚀等现代化的微加工技术制备出直径  $9.5\mu\text{m}$  的 InGaAs/InGaAsP 微碟激光器, 并详细介绍了整个制备工艺过程。在液氮温度下用氩离子激光器泵浦方式实现了低阈值光泵激射, 测出单个微碟激光器的阈值光功率为  $150\mu\text{W}$ , 激射波长约为  $1.6\mu\text{m}$ , 品质因数  $Q=800$ , 激射光谱线宽为  $2\text{nm}$ , 同时指出微碟激光器激射线宽比 F-P 普通激光器宽很多是由于其品质因数很高造成的。

**关键词:** 微碟激光器; 干法刻蚀; 光泵浦; 湿法刻蚀; 品质因数

**EEACC:** 4320J; 2530C

中图分类号: TN 248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)08-1057-06

## 1 引言

光电子学作为通信、计算、数据存储等方面的重要学科已经发展出高效率、高可靠性的各种光电子器件, 如激光器、LED、探测器、滤光器、放大器及逻辑器件等等。近年来, 随着半导体微加工技术的发展和大规模光电集成器件、光子集成器件的需要, 微小尺度器件的研究也开始吸引人们的注意。微腔激光器就是其中得到广泛关注的一个分支。典型的微腔激光器如图 1(a) 所示, 是一个平面微腔, 其约光波长量级的有源区夹在两个具有高反射率的平行反射镜之间, 这种结构就是标准的面发射激光器 (VCSEL), 如图 1(b) 所示, 是典型的沿轴向一维限制。而图 1(c) 代表一类新型微腔激光器——碟型微腔激光器<sup>[1-3]</sup>, 可以实现对光子的二维限制。

碟型微腔激光器不同于 F-P 型微腔激光器。在碟型激光器中光场模式是由于碟与空气之间的折射率差而在碟的边缘形成的全内反射建立起来的。其优点是不需要生长制备结构复杂的高反射率多层

DBR 反射镜, 这一点对 InP 系列材料尤为重要。因为不同组分 InGaAsP 之间的折射率差别很小, 要达到高反射率就要求生长更多的周期, 给实际的外延生长带来很大的困难, 这就是目前研究 InGaAsP 材料的微碟激光器比较多的原因。

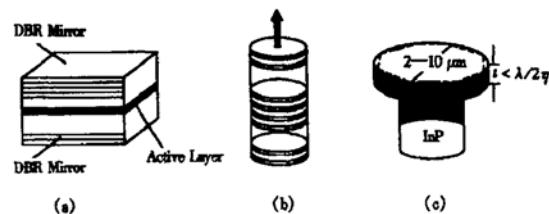


图 1 平面、垂直腔面(VCSEL) 和碟型微腔激光器示意图

FIG. 1 Schematic of Microcavity Laser with Plan, VCSEL and Microdisk Resonant Cavity

自从 McCall<sup>[1]</sup> 等人在 1992 年报道了第一个低温光泵 InGaAsP 系材料碟型微腔激光器以来至今, 半导体微碟激光器在研究人员的不断努力下先后在脉冲室温电泵浦<sup>[4]</sup>、连续室温电泵浦<sup>[5]</sup> 和连续室温光泵浦<sup>[6]</sup> 等三个不同工作方式下实现了激光发射,

\* 兵器预研基金资助项目(CHGJ-1998)。

吴根柱 1967 年出生, 博士研究生, 目前从事微腔激光器方面的研究。

2000-09-21 收到, 2000-11-22 定稿

©2001 中国电子学会

而且在 GaAlAs/GaAs<sup>[7]</sup>、GaN/AlGaN<sup>[8]</sup>、InGaN/GaN<sup>[8]</sup>等多种新材料体系中也实现了低温或室温光泵激光.

半导体微腔物理是半导体微碟激光器的理论基础. 半导体微腔物理是研究半导体微腔中腔量子电动力学(CQED)现象的一门新的交叉学科. 文献[9]详细介绍了它的一些最基本的物理内含和器件应用, 对国内这方面的研究工作起了开头作用, 但没有具体介绍与微腔激光器应用直接有关的器件物理、工艺制作等方面的问题. 本文中我们以低温光泵 InGaAs/InGaAsP 微碟激光器为例初步研究半导体微碟激光器的制备、测试和光谱及激射阈值特性等情况.

## 2 微碟激光器的器件制备工艺

制备微碟激光器的主要工艺过程包括: 外延片生长、光刻、刻蚀和测试等四大部分. 下面我们分别加以详细的介绍.

### 2.1 MOCVD 法生长 InGaAs/InGaAsP 多量子阱外延片

我们所研制的 InGaAs/InGaAsP 碟型微腔激光器由两部分组成: 一是由多量子阱构成的微碟层, 另一个是支柱层, 该层用来形成细圆柱以支撑微碟于低折射率介质中. InGaAs/InGaAsP 多量子阱材料是以 MOCVD 方法生长的, 因为所研制的是光泵浦激光器, 所以各层均未掺杂. 表 1 为材料的各层结构. 多量子阱材料外延层的组分主要是由 InP 衬底的晶格匹配和激射波长的要求而设计的. 这里 InGaAsP 势垒层和包层的禁带宽度设计为 1.1eV. 首先, 在半绝缘衬底上生长一薄层 InGaAs 腐蚀停止层, 厚度为 100—200nm, 这层的作用是精确控制腐蚀高度, 在腐蚀工艺中避免腐蚀过度进入 InP 衬底. 在刻蚀停止层之上生长约 0.5μm 厚的 InP 支撑柱层, 用来形成细圆柱以支撑微碟.

这里需要指出的是合理设计支撑层厚度(即细圆柱高度)尤为重要, 因为考虑到良好热接触, 圆柱高度应越小越好, 但也不能太小, 要保证足够高度以避免衬底影响微腔里的模式. 这个要求对室温状态下工作的微腔激光器更苛刻. 理论计算表明, 圆柱高度的最佳值为  $\lambda/3$  左右( $\lambda$  为辐射光波长). 这也就是我们为什么要设计支撑层厚度为 0.5μm 的理由.

表 1 外延片结构

Table 1 Layer Structure

Material	Thickness/nm	Doping
Ino.84Ga0.16As0.33P0.67	21	i
Ino.53Ga0.47As	8	i
Ino.84Ga0.16As0.33P0.67	5	i
Ino.53Ga0.47As	8	i
Ino.84Ga0.16As0.33P0.67	5	i
Ino.53Ga0.47As	8	i
Ino.84Ga0.16As0.33P0.67	5	i
Ino.53Ga0.47As	8	i
Ino.84Ga0.16As0.33P0.67	5	i
Ino.53Ga0.47As	8	i
Ino.84Ga0.16As0.33P0.67	21	i
InP	500	i
Ino.53Ga0.47As	100—200	i
InP	Substrate	$n = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

在 InP 支撑柱层生长完之后其上面应生长多量子阱有源碟层. 该碟层由 6 个 8nm 厚的 InGaAs 量子阱和 5 个 5nm 厚的 InGaAsP 势垒层构成, 在其两侧是 21nm 厚的 InGaAsP 包层, 微碟层的总厚度为 125nm 左右. 所设计的这个厚度小于一阶平板波导模式的截止厚度, 此时大多数的自发辐射进入到最低阶平板导模模式中. 理论计算表明, 这时对偏振垂直于微碟表面的模式增益受到抑制, 而平行于微碟表面的模式增益得到增强, 因此该种结构可以期望获得较高的自发辐射耦合系数  $\beta$  值. 图 2 给出了 MOCVD 多量子阱外延片在室温下的光致发光谱. 从图中可以看出我们制作的外延片具有很高的光增益.

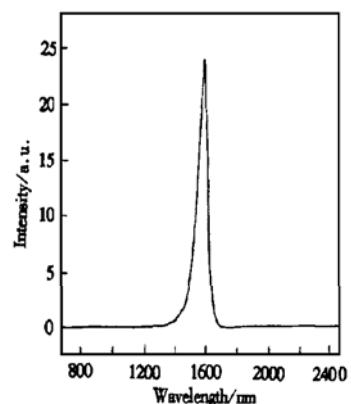


图 2 MOCVD 外延片在室温下的光致发光谱

FIG. 2 Photoluminescence Spectrum of an MOCVD-Wafer at Room Temperature

## 2.2 光刻

生长出理想的外延片后,要进行光刻。在进入光刻工艺之前,对生长制备好的样品和光刻版必须经过认真的清洗。实验证明在后续产生的很多问题都可以追溯到样品和光刻版表面清洗的不完善方面。如图 3 所示,由于清洗的不干净,造成光刻板和样品之间贴的不紧,曝光时产生了衍射效应,刻蚀结果本来要保留的圆形图中心部分却出现了小圆孔,并且大圆边缘很不整齐,呈锯齿状。为了得到边缘整齐的微碟图形,除了注意认真清洗外最好用电子束曝光的方法光刻,这里由于条件的限制我们采用了紫外灯曝光法。

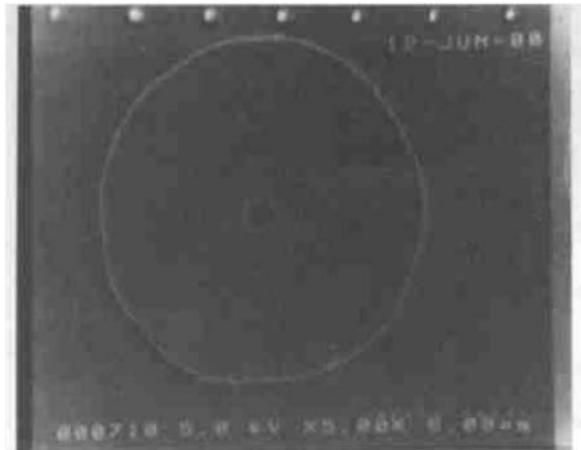


图 3 由于光刻失败造成的变形刻蚀图形

FIG. 3 Deformed Etching Photo Due to the Failure of Photolithography

## 2.3 刻蚀

通过成功的光刻得到边缘整齐的圆图形之后,样品可以进入下一步刻蚀工艺。对微碟激光器来说,刻蚀工艺包括两个部分。首先是非选择性刻蚀,其目的是在样品表面上刻蚀出边缘比较光滑且侧面垂直陡峭的圆柱,并一直深入到 InP 支撑柱层部分。为此,主要采取干法反应离子刻蚀(RIE)方法,该法可以产生垂直而且光滑的侧壁,减少微碟边缘的散射损失。第二步是选择性刻蚀,其目的是根据腐蚀液对 InGaAsP 和 InP 腐蚀速率不同的特点,将 InP 支撑柱层向内、向下腐蚀进入到 InGaAsP 微碟层之下形成一个细圆柱,为此主要采取湿化学腐蚀法。

首先,在非选择型干法刻蚀工艺中,注意控制刻

蚀深度。一定要保证刻蚀一直深入到 InP 支撑柱层部分,但不能深入到刻蚀停止层部分,为此刻蚀深度最好取 400—500nm 范围内。另外,要注意刻完之后一定要保持样品表面的干净,样品表面上不能遗留很多沉积物,为此应通过多次实验来合理选择 RIE 刻蚀条件。这里给出我们的 RIE 实验所选的刻蚀条件,可供参考。刻蚀 InGaAsP 材料实用的混合气体是甲烷、氢气和氩气的混合气体,各气体的流量分别为:甲烷: 10sccm, 氢气: 34sccm, 氩气: 10sccm。反应室压力控制在 5.99Pa, 射频功率为 90W。在这样条件下对 InGaAsP 材料的刻蚀速率为 25nm/min, 刻蚀深度约为 400nm。

其次,在选择性湿法刻蚀工艺中,一方面为了容易控制腐蚀时间,另一方面为了尽量减少湿法刻蚀造成的各向异性腐蚀情况,腐蚀过程最好在低温状态下进行。为此,我们采取冰水混合物温度作为腐蚀温度。我们在实验中使用的选择性腐蚀液是盐酸和水的混合液,盐酸和水的比例为 3:1。这种选择性腐蚀液对 InP 和 InGaAsP 的腐蚀速率比为 1000:1,具有极好的选择性,零摄氏度下对 InP 的腐蚀速率为 1μm/min 左右。

## 2.4 测试

对所制备的微碟型微腔激光器主要用扫描电镜和光致发光方法对其器件的形貌和光学性质以及激光特性进行研究,分析激光光谱中的模式和光谱线宽特性。

图 4 是我们用光泵方法研究微碟激光器光谱、进行光学测量分析的光路配置示意图。由于微碟的直径很小,用一般光致发光方法测试不能保证得到的光谱确实来自微碟自身。因此,我们在测试光路中

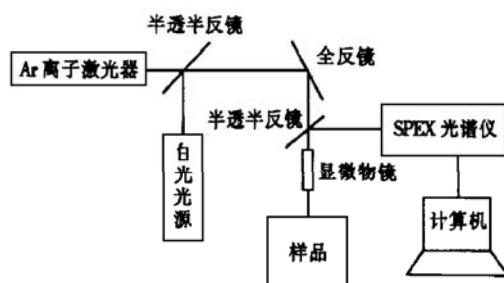


图 4 微碟激光器测试光路配置示意图

FIG. 4 Optical Path for Measuring a Microdisk Laser

加入一个白光源, 经过物镜聚焦后, 用 CCD 监视将光点调到单个的微碟上。我们使用的泵浦光源是氩离子激光器, 采用两种方式泵浦: 一是连续光泵浦, 另一种是脉冲方式。经过锁模, 其频率为 80MHz, 脉宽为 230ps, 占空比约为 1:50。光谱仪型号为 SPEX 1403, 用液氮制冷的锗探测器收集光信号。

具体测试原理如下: 微碟激光器样品放在一个由液氮制冷的样品室中, 氩离子激光器的 514.5nm 或 488nm 线通过反射镜、半透半反镜和显微物镜聚焦到微碟激光器的单个微碟上。微碟产生的光致发光信号再经过同一个物镜聚焦到 SPEX 光谱仪的狭缝, 进入光谱仪。为观察泵浦激光的聚焦位置, 我们在第一个反射镜之前放置一个半反半透镜, 将一路白光引入到光路中。该白光与泵浦激光走同样的光路, 并精细调节使激光的聚焦小圆点位于白光聚焦圆点的中央。在这样的条件下我们可以方便地进行微碟激光器的激光泵浦实验。在测试时先用白光光源调节微碟的位置, 使白光聚焦在微碟的表面, 然后关掉白光, 引入激光, 此时已经确保激光照射在微碟上, 开始测试。

### 3 微碟激光器的测试结果及分析

图 5、图 6 是我们制备的微碟激光器的扫描电镜形貌照片。图 5 是干刻以后, 湿刻以前的圆柱状形貌, 图 6 为干刻和湿刻以后的图钉式微碟图形, 微碟的设计直径为 10μm。但由于在湿刻工艺中腐蚀液对材料侧向腐蚀的作用, 所制备微碟的最后尺寸均比设计的要小, 其大小为 9.5μm。

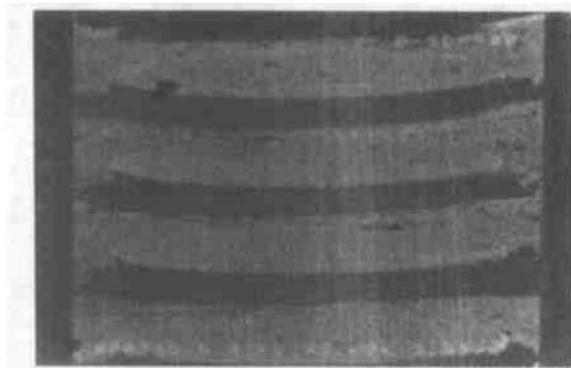


图 5 微碟激光器的圆柱状 SEM 照片

FIG. 5 SEM Image of a 9.5μm-Diameter and 0.5μm-High Microcylinder Array

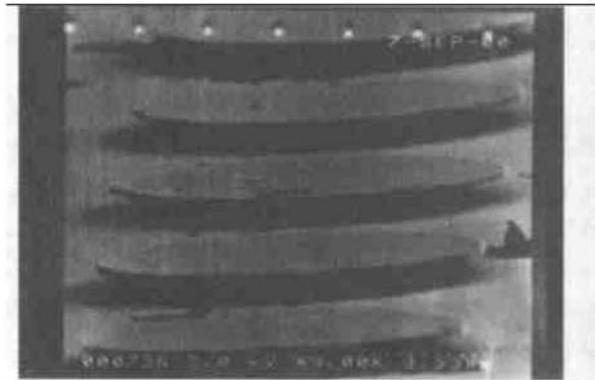


图 6 直径为 9.5μm 的微碟激光器图钉状 SEM 照片

FIG. 6 SEM Image of a 9.5μm-Diameter and 20μm-Spacing Microdisk Array

图 7 是我们研制的直径为 9.5μm 碟型 InGaAs/InGaAsP 微腔激光器在液氮温度下, 氩离子激光器泵浦所测得的激射光谱。单个微碟上的泵浦光功率约为 450μW, 在 1.6μm 附近观察到窄的激射峰, 激射峰半宽约为 2nm。

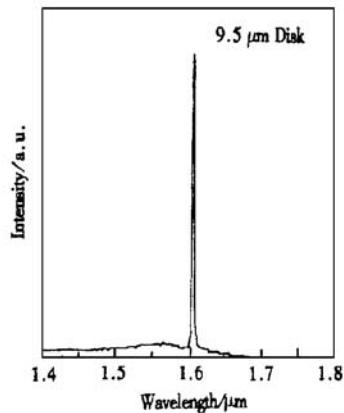


图 7 微碟激光器在液氮温度下, 光泵浦所测得的激射光谱

FIG. 7 Emission Spectrum of a 9.5μm-Diameter Microdisk Laser

这里需要指出的是一般微碟激光器的激射峰半宽基本上都在几个 nm 左右, 比普通 F-P 半导体激光器的线宽(0.02—0.2nm)宽很多。而且, 随着泵浦功率的增大出现激射以后, 光谱激射峰的线宽基本上保持在几个 nm 之间, 并不随泵浦光功率的增加而发生规律性变化, 表现出与普通半导体激光器不同的光谱行为。在普通半导体激光器中激射线宽表现出随着输出光功率增强而减小的特点。

我们认为在微碟激光器中激射线宽较宽的原因是由于微碟激光器的品质因子  $Q (Q = \lambda / \Delta\lambda)$  比普通

半导体激光器的  $Q$  值大几个数量级造成的。微碟激光器的  $Q$  值很高是由于微碟激光器中的模式不同于普通 F-P 腔半导体激光器模式。在微碟中由于其厚度在  $\lambda/2n$  量级以及微碟材料与周围介质(一般是空气)的高折射率差,光学模式被强烈地限制在微盘内。在这个厚度上只有最低阶 TM 和 TE 模。在碟型微腔中光子沿盘碟内边缘由于全反射传播而建立起“回音壁”(Whispering-Gallery) 模式(简称 WG 模式),WG 模式是一种相当成功的高  $Q$  值微型腔。显然,我们研制的直径为  $9.5\mu\text{m}$  碟型 InGaAs/InGaAsP 微腔激光器的品质因子估计为  $Q = \lambda/\Delta\lambda = 800$ 。

另外一个使微碟激光器的激射线宽增宽的原因一般认为是由于在微腔激光器中自发辐射耦合系数  $\beta$  比普通半导体激光器的  $\beta$  值大几个数量级,因此导致激射线宽比较宽<sup>[10-12]</sup>。

图 8 是直径为  $9.5\mu\text{m}$  时的微碟激光器在液氮温度下单碟吸收的光泵功率与光谱激射峰强度的关系。随泵浦光功率的增大,微碟光谱激射峰强度的变化出现一个非常明显的拐点,泵浦功率超过这个拐点后,激射峰迅速增强,由图可以估计出激射阈值功率约为  $150\mu\text{W}$ 。考虑到微碟的光泵浦面积可以估计出阈值光泵浦功率密度约为  $400\text{W}/\text{cm}^2$ ,远低于普通半导体激光器的泵浦功率密度。

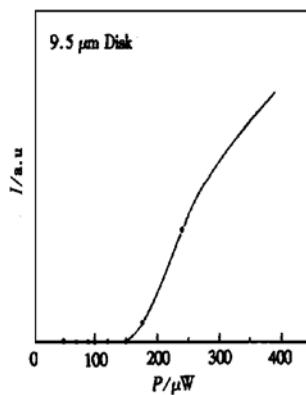


图 8 微碟激光器的光泵功率与激射光强之间的关系

FIG. 8 Light Intensity as a Function of the Pump Power for a  $9.5\mu\text{m}$  Microdisk Laser

## 4 结论

本文初步研究了半导体微碟激光器的研制及其光谱特性,演示成功阈值非常低和品质因数很高的低温光泵 InGaAs/InGaAsP 微碟激光器,并分析了微碟激光器的光谱线宽比普通 F-P 半导体激光器宽很多的原因,对工艺中的一些更细致的规律性的特征进行了提炼和报道,以便对国内外同行提供参考。另外考虑到器件的实际应用,今后应多发展连续室温电泵或连续室温光泵工作方式的微碟激光器。

**致谢** 本研究得到南京电子部 55 所王向武研究员在材料生长方面的帮助以及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的王立军教授和刘云老师在光刻和测试方面的大力支持,作者深表感谢。

## 参考文献

- [1] S. L. McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**: 289.
- [2] R. E. Slusher, A. F. J. Levi, U. Mohideen *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**: 1310.
- [3] U. Mohideen, W. S. Hobson, S. J. Pearton *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**: 1911.
- [4] A. F. J. Levi, R. E. Slusher *et al.*, *Electron. Lett.*, 1992, **28**: 1010.
- [5] M. Fujita, T. Baba *et al.*, *Electron. Lett.*, 1998, **34**: 278.
- [6] S. M. K. Thiagarajan, A. F. J. Levi *et al.*, *Electronics Lett.*, 1998, **34**: 2333.
- [7] U. Mohideen, W. S. Hobson *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(15): 1911.
- [8] R. A. Mair, K. C. Zeng *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**: 1530.
- [9] Houzhi Zheng, *Chinese Journal of Semiconductors*, 1997, **18**: 481[郑厚植, 半导体学报, 1997, **18**: 481].
- [10] G. Bjork *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**: 306.
- [11] R. Jin *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**: 1883.
- [12] D. Kuksenkov *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**: 277.

## Optically Pumped InGaAs/InGaAsP MQW Microdisk Lasers Grown by MOCVD\*

WU Gen-zhu<sup>1</sup>, ZHANG Zi-ying<sup>2</sup>, REN Da-cui<sup>1</sup> and ZHANG Xing-de<sup>1</sup>

(1 National Key Laboratory of High-Power Semiconductor Laser, Changchun Institute of Optics  
and Fine Mechanics, Changchun 130022, China)

(2 Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The wafer of an InGaAs/InGaAsP multiple quantum wells (MQW) microdisk laser is grown by MOCVD, and a 9.5μm-diameter InGaAs/InGaAsP MQW microdisk laser is made with modern microfabrication such as photolithography, dry etching, wet etching, etc. The fabrication process is described in detail. The InGaAs/InGaAsP MQW microdisk lasers are demonstrated, which are optically pumped with a 514.5nm Ar<sup>+</sup> laser beam at liquid nitrogen temperature. A threshold pump power of 150μW is obtained at pump wavelength of 514.5nm for a 9.5μm-diameter single disk, when the lasing emission wavelength is about 1.6μm, quality factor  $Q=800$  and the emission linewidth  $\Delta\lambda=2\text{nm}$ . At the same time, it is pointed out that the linewidth of a microdisk laser is larger than that of the conventional semiconductor lasers is due to the former having a high  $Q$ -factor.

**Key words:** microdisk Lasers; dry etching; optically pumping; wet etching; quality factor

**EEACC:** 4320J; 2530C

**Article ID:** 0253-4177(2001)08-1057-06

\* Project Supported by National Defense Advanced Research Foundation(CHGJ-1998).

WU Gen-zhu was born in 1967. He is a PhD candidate. His main research is focused on the theoretical and experimental study on semiconductor microcavity lasers.