

文章编号: 0258-7025(2001)08-0681-04

微碟激光器的单模低阈值激射*

潘玉寨^{1,3} 索辉^{1,4} 宁永强² 刘云¹ 王立军²

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130021; ² 中国科学院激发态物理开放实验室 长春 130021
³ 长春科技大学光电子研究所 长春 130026; ⁴ 吉林大学电子工程系 长春 130023

提要 简单分析了碟型微腔激光器中的激射模式及自发发射系数。采用反应离子刻蚀和选择性刻蚀方法蚀刻出 InGaAs/InGaAsP 多量子阱(MQW) 碟型激光器, 碟直径 3 μm, 在液氮温度下进行光抽运实验, 观察其模式特性。实现了单模激射, 波长 1.5 μm, 抽运阈值 18 μW。

关键词 多量子阱, 微碟激光器, 单模激射, 耳语回廊模式

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Single-mode Lasing of Microdisk Lasers with Low Threshold

PAN Yu-zhai^{1,3} SUO Hui^{1,4} NING Yong-qiang² LIU Yun¹ WANG Li-jun²

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021

² Lab. of Excited State Processes, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021

³ Changchun University of Science and Technology, Changchun 130026

⁴ Department of Electronics Engineering, Jilin University, Changchun 130023

Abstract The lasing modes and the spontaneous emission factors of microdisk lasers are simply analyzed in this paper. InGaAs/InGaAsP multiple quantum wells (MQWs) microdisk lasers are fabricated by using the methods of active ion etching (RIE) and selective chemical etching. The diameter of the microdisk lasers was 3 μm. InGaAs/InGaAsP MQWs microdisk lasers cooled by liquid nitrogen was optically pumped. The single-mode lasing at 1.506 μm wavelength with threshold pump power about 18 μW is obtained.

Key words multiple quantum well (MQW), microdisk laser, single-mode lasing, whispering-gallery mode

1 引言

微腔激光器是一类基于谐振光学和半导体量子工程理论,且器件尺寸非常微小的激光器。半导体微加工技术的发展及大规模光电集成器件、光子器件发展的需要,使研究微腔激光器结构及其特性成为热点。微腔激光器体积小、集成度高、功耗低,可实现大规模集成,另一方面由于微腔激光器的一维或三维尺度在光波长量级,在增益微型光学腔中仅有几个光学模式存在,因此可增加自发发射耦合到激射模中的几率,具有极高的 Q 值,大大降低激射

阈值,微腔激光器同普通半导体激光器相比将自发耦合系数 β 提高了 3~5 个数量级。

微碟激光器是代表一类新型微腔结构的激光器,光子以不同于 F-P 腔半导体激光器的 Whispering Gallery Mode (WGM) 模式在碟中传播,微碟介质的高折射率和周围低折射率介质(如空气)间形成高折射率差,实现对光子三维限制作用,在碟内形成反馈振荡。同面发射微腔激光器相比,其优点是免去生长制作结构复杂的多层 DBR (Distributed Bragg Reflector) 高反射镜,结构较简单,有利于实现大规模光子器件集成,对一同组分间折射率差变化不大的 InGaAsP 系列材料尤为重要。微碟激光器的阈值更低,进一步接近“无阈值激光器”的极限。随工艺进步及结构优化,微碟激光器具有更好的选模

* 中国科学院“九五”重大项目和国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 2000-03-09; 收到修改稿日期: 2000-07-07

特性,可实现单模运转,在集成光路和光学微型器件如谐振器中有更加广阔的用途。国际上已对微碟激光器有不少报道^[1,2],目前本实验组已对微碟激光器的阈值、线宽等问题进行了研究^[3,4]。

本文研究了 InGaAs/InGaAsP 多量子阱(MQW)微碟激光器的低温单模激射行为。用气源分子束外延(MBE)方法生长该外延层材料,利用光刻技术蚀刻出直径 3 μm 圆柱形,采用非选择性干法刻蚀即反应离子刻蚀(RIE)和选择性化学刻蚀方法蚀刻出微碟结构。在液氮温度下进行光抽运实验,观察 3 μm 直径微碟激光器的低温激射行为,实现了低阈值单模激射。

2 圆碟结构中 WGM 光场模式和自发辐射耦合系数

一个微碟激光器可以看成是一个光子限制阱,即由于微碟材料的折射率与周围低折射率介质如空气等之间存在较大的折射率突变而使得光子被约束在微碟内。下面简单分析微碟型光子阱中的耳语回廊模式。

考虑一个理想的、边缘光滑无起伏的微碟,微碟半径为 R ,厚度 L ,如图 1 所示。分布在整个空间有许多光学模式,因微碟的特殊结构,其中的非导引模式与导引模式之间存在很大的差异,在考虑与电介质碟中激发态强耦合作用的光学模式时,可忽略非

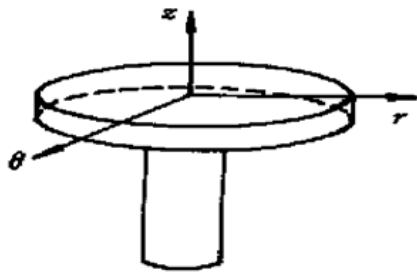


图 1 圆碟场中柱坐标系 z, θ, r

Fig. 1 Cylindrical system of disk z, θ, r

导引模式。由于微碟的厚度很薄,加上微碟介质与周围空气高的折射率差,在轴向上光场不能存在稳定的模式,因此可以只考虑沿碟平面的二维方向上传播的模式,在图示轴向极坐标下近似求解光场 $\phi(r, \theta)$ 的二维 Helmholtz 方程

$$(\nabla^2 + n_{\text{eff}}^2 \omega^2 / c^2) \phi = 0$$

在厚度 ($L = \lambda/2n$) 是半波长量级的微碟中,垂直与

碟平面方向的极化模式增益受到强烈抑制,而且只支持平行与微碟面方向极化模式,光场以 WGM 模式存在。通过应用圆碟边界条件

$$\phi_{\text{in}}(R, \theta) = 0$$

求解出碟中 WGM 模式。在这种情况下根据柱坐标对称性,光场可以写成

$$\phi_{\text{in}}(r, \theta) = A_{M,N} J_M(x) e^{iM\theta}$$

式中 $J_M(x)$ 是第一种 Bessel 函数, $x = rn_{\text{eff}} \omega_{M,N} / c$, r 和 θ 是极坐标。 $M = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, $A_{M,N}$ 是归一化常数。由上面的边界条件可以得出模式频率

$$\omega_{M,N} = x_{M,N}^N c / n_{\text{eff}} R$$

其中 $x_{M,N}^N$ 是 Bessel 函数 $J_M(x) = 0$ 第 N 个根。 $N = 1$ 表示在碟边缘 $r = R$ 的 WGM 模式,其频率

$$\omega = x_{M,N}^1 c / n_{\text{eff}} R$$

根据腔长与模式之间的关系可以大致定出碟内所能允许的最大模阶数 M

$$M = \frac{2\pi n_{\text{eff}} R}{\lambda} \quad \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi R n_{\text{eff}}}$$

其中 R 为微碟的半径, λ 为真空中的波长, n_{eff} 为微碟介质折射率, $\Delta\lambda$ 为模式间距。对我们所研制的 InGaAs/InGaAsP/InP 多量子阱微碟激光器来说,折射率 n_{eff} 为 3.5, 激射波长 λ 为 1.5 μm。可见,微碟的直径越小,碟中可以存在的模式数越少,同时模式间的间距更大,容易实现单模运转。

对微碟结构而言,一般在自发发射光谱内,微腔中存在几个光学模式与自发发射光谱耦合,为实现单模运转,对其他光学模式进行抑制,减小碟中模式同自发光谱耦合的数目,同时获得较高的自发发射系数。实验证明,在微碟激光器激活区采用一定量子阱结构,可使自发发射光谱变窄,与之耦合的模式数相应减小,可望实现单模激射。

微碟结构是一个光子强受限微腔,其中光子态密度发布和自发发射特性得到强烈而显著的修饰。低透明率微腔激光器的阈值主要由自发发射耦合系数决定,一般微腔激光器自发发射耦合系数值较之普通半导体激光器要高出几个量级。微碟的自发发射耦合系数可表示为: $\beta = R_L / R_T$, R_L 为自发发射到激射模的速率, R_T 为总发射速率。假定自发发射只进入一个导模模式中,这时需要 $\Delta\nu_c > \Delta\nu_{\text{sp}}$, $\Delta\nu_{\text{sp}}$ 为自发发射宽度, $\Delta\nu_c \approx c / (2\pi R n_{\text{eff}})$ 为模式间距。即在自发发射宽度小于模式间距时,自发发射光谱与该导引模式耦合几率远大于其他模式,而当微碟中光

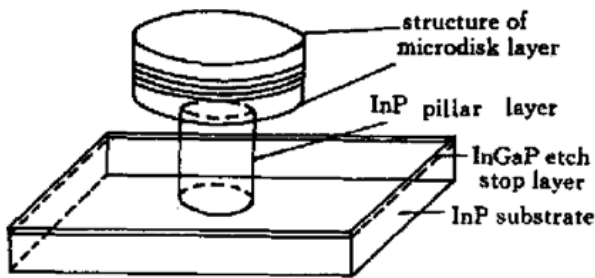
学模式间距小于自发发射宽度时, 自发发射将更多地进入其他非激光模式中, 降低 β 值。如果自发发射宽度接近模式间距, 自发发射耦合系数(即 β 值) 将接近 1。对微碟满足区域 $0 < L/\lambda_m < 0.5/n_1$ (L 为微碟厚度, λ_m 为材料中波长) 的情况, 这个区域正是我们对微碟腔感兴趣的地方, 对不同的 L/λ_m 有不同的值, 在 $L = 0.14\lambda_m$ 时, 值较大, 同时半径减小, 模式宽度减小, 进一步考虑径向和角向偶极子同时激发情况, β 值约为上面计算的一半。

3 实 验

半绝缘 InP 衬底上生长薄的 InGaAsP 蚀刻阻挡层, 阻挡制作微腔过程中选择性腐蚀进入 InP 衬底。在蚀刻阻挡层上生成 $1\ \mu\text{m}$ InP 柱层, 然后生长三层量子阱有源区的微碟结构, 有源区是三个厚度为 10 nm 的 InGaAs 量子阱, 由 10 nm 厚的 InGaAsP 垒层分

开, 在量子阱两侧是 70 nm 厚的 InGaAsP 包层, 整个微碟厚度为 190 nm, 由平行波导模式理论第 m 阶模式截止厚度公式: $L_m = m\lambda/2(n^2 - n^0)^{1/2} = m\lambda/2(n^1 - 1)^{1/2}$, 此厚度是第二阶平行波导模式的截止厚度。

外延层结构是采用气源 MBE 方法生长在 InP 衬底上的, 图 2 给出微碟型 InGaAs/InGaAsP/InP 激光器的结构图, 对清洗完毕的外延片, 采用光刻技术, 在外延片上形成 $3\ \mu\text{m}$ 直径的圆形图形。坚化光刻胶后采用干法刻蚀技术即反应离子刻蚀(RIE)方法刻蚀 InGaAsP 材料, 反应气体由甲烷、氢气和氩气混合而成, 各气体流量分别为: 甲烷 $10\ \text{cm}^3/\text{s}$, 氢气 $34\ \text{cm}^3/\text{s}$, 氩气 $10\ \text{cm}^3/\text{s}$, 室温下刻蚀速率约为 $25\ \text{nm}/\text{min}$ 。将图形垂直向下腐蚀形成一圆柱进入 InP 层。然后用选择性腐蚀方法, 侧向腐蚀 InP 柱形成支撑微碟的圆柱, 选择性腐蚀液为 $(2\text{HCl}: 3\text{H}_3\text{PO}_4)$, 室温下对 InP 柱的腐蚀速率约为 $2\ \mu\text{m}/\text{min}$ 。



Materials	Thickness/nm	Doped
InGaAsP	70	Undoped
InGaAs	10	Undoped
InGaAsP	10	Undoped
InGaAs	10	Undoped
InGaAsP	10	Undoped
InGaAs	10	Undoped
InGaAsP	70	Undoped

图 2 微碟激光器结构图

Fig. 2 Schematic of microdisk laser

4 测试及讨论

为研究 InGaAs/InGaAsP 微碟激光器的激光特性和光谱特性, 本实验用氩离子激光器(发射波长在 $514.5\ \text{nm}$) 作为抽运光源, 在液氮温度下观察微碟激光行为。将微碟放置在由液氮制冷的样品室中, 激光束经过 40 倍的显微镜聚焦到单个微碟表面, 保证整个微碟均匀照射, 用同一物镜收集微碟产生的荧光信号并聚焦到 SPEX 光谱仪中, 由冷却至液氮温度的锗探测器收集光谱信号。

图 3 是 $3\ \mu\text{m}$ 直径微碟激光器液氮温度下光抽运的单模激光光谱, 微碟的单模激光波长为 $1.506\ \mu\text{m}$ 。实验观察到在不同抽运光功率下激光峰强度

相应增大, 与背景荧光强度间的对比增加, 随抽运功率增大到超过阈值, 微碟激光峰强度急剧增加, 表明微碟出现单模激光振荡。微碟中耳语回廊模式激光与微碟半径及介质折射率有关, 在不考虑较高温度下折射率的显著变化时, 对微碟平面内存在的稳定模式, 实验结果(图 3 中)证实了这一点。同时, 激光模式峰位置同材料荧光谱有较好的重叠, 所以有较高的耦合系数, 低的激光阈值。该稳定存在的模式, 其模式数 $M = 21$, 对应波长为 $1.506\ \mu\text{m}$, 这同我们的实验设计: 微碟厚度 $190\ \text{nm}$, n_{eff} 为 3.5 的电介质多量子阱微碟的耳语回廊模式激光一致。模式间距 $\Delta\lambda = \lambda/M = 72\ \text{nm}$, 本实验在 $10\sim 200\ \mu\text{W}$ 光功率范围内对 $3\ \mu\text{m}$ 微碟抽运并未发现其他模式峰, 考虑是

其他模式与材料发光增益区之间的弱耦合,同时器件制作工艺中微碟边缘的光滑度比较好,使得碟内不存在多个竞争程度相近的 WGM 模式光场。激射峰半高宽(FWHM)为 3 nm,可以估计 Q 值约为 $\lambda/\delta\lambda = 500$ 。微碟腔型激光器的线宽较之普通半导体激光器线宽要宽出几十倍,使用多体理论(many-body carrier dynamics theory)可以解释这种激光线宽加宽现象,一般认为在微腔激光器中,由于腔体积减小,光场模式数减小,辐射场与增益介质有更强的耦合。光抽运时与增益介质中产生的电子空穴处于非平衡状态,这种载流子的非平衡分布带来的多体效应使激光线宽表现出反常特性。

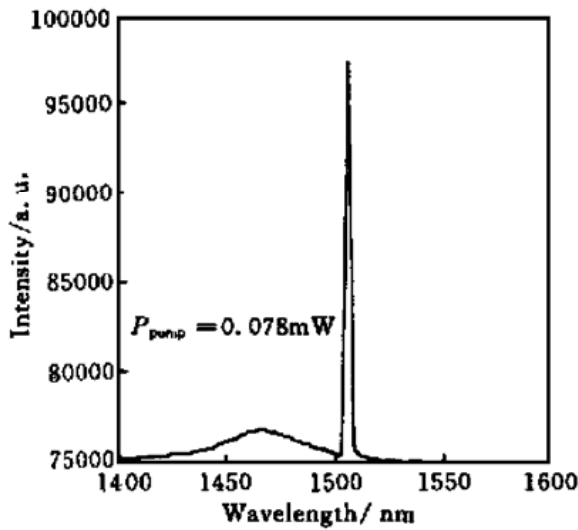


图 3 3 μm 直径微碟 80 K 时的光抽运单模激射光谱
Fig. 3 Single mode lasing spectrum for 3 μm diameter microdisk at 80 K

我们可以这样考虑,对第 M 阶 WGM 模式分布在碟中一个近似环形区域,其自发发射耦合系数 β 和模式体积与光学场之间的耦合有关,如果采用一种方法使得光场能量集中注入到该增益模式所在的环形区域内,其光学增益将更加大于其他模式,能够获得更大的耦合效率和模式特性。因此,对电抽运器件,电极形状与光学增益模式形状的相近程度对耦合效率及模式有很大的影响。

图 4 给出激射峰强度同抽运功率间的关系。微碟光抽运激射阈值约为 18 μW 。碟中模式体积小,光学模式同增益介质具有很好的耦合,获得低阈值激射,自发发射耦合系数较大,从而降低了激射阈值,提高转换效率,随抽运光功率的增大,激射峰强度在达到一个阈值后迅速增大出现激射。当抽运功率继续增加时,激射强度增大的趋势开始变缓,并趋于饱和。我们认为这种饱和现象是由于碟内温度

的改变。碟内温度随抽运功率增加而增加,引起激活区增益的减小,激射强度的减小,导致饱和现象的发生。碟中温度的改变是实现器件在室温下实用化的关键^[5]。

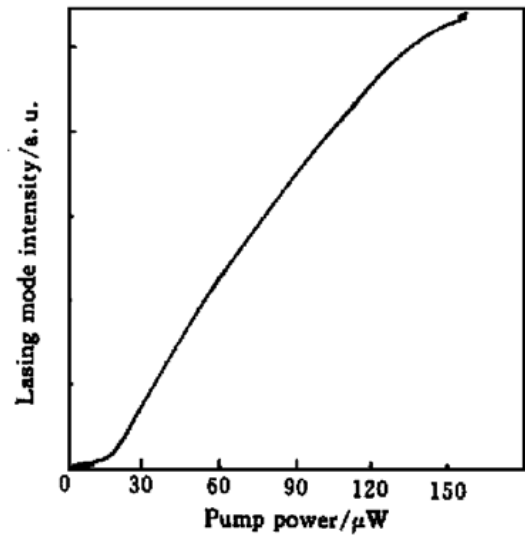


图 4 激射峰强度同抽运功率的关系
Fig. 4 Lasing mode intensity vs pump power

5 结 论

简单分析了微碟激光器中的模式及自发发射耦合系数,实现自发发射耦合系数增强和获得单模低阈值激射和微腔中的谐振模式与材料发光增益区之间的耦合有关,其耦合越强,自发发射耦合系数 β 值越大,越易获得单模低阈值激射。用化学刻蚀方法和光刻技术制作了 InGaAs/InGaAsP/InP 多量子阱微碟激光器。在液氮温度下进行光抽运实验,实现了微碟激光器单模激射,并具有极低阈值,阈值功率约为 18 μW ,激射波长 1.5 μm 。

参 考 文 献

- 1 S. L. McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher *et al.*. Whispering-gallery mode microdisk lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(3): 289~ 291
- 2 B. Corbett, J. Justice, L. Consideine *et al.*. Low-threshold lasing in novel microdisk geometries. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(7): 855~ 857
- 3 Ning Yongqiang, Wu Shengli, Wang Lijun *et al.*. InGaAsP MQW microdisk lasers. *J. Infrared and Millimeter Waves* (红外与毫米波学报), 1998, **17**(5): 345~ 348 (in Chinese)
- 4 Ning Y. Q., Wu S. L., Wang L. J. *et al.*. Linewidth in microdisk laser. *SPIE*, 1998, **3547**: 191193
- 5 Damien Courtney, Peter O' Brien, Peter M. W. Skovgaard *et al.*. Room temperature CW operation of InGaAsP/InP microdisk lasers. *SPIE*, 1998, **3286**: 138~ 151