

角反射器耦合的 InGaAs 应变层量子阱 锁相阵列激光器的模式特性

刘 斌 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 采用反应离子刻蚀技术, 设计、制备了一种角反射器耦合的 10 单元 InGaAs 应变层单量子阱锁相阵列激光器。在高达 $4 \times I_{th}$ 的工作电流范围内, 获得了主单瓣远场输出, 单瓣束宽最低达 0.64° , 接近衍射极限。考虑了角反射器引入的纵模与侧模之间的耦合, 及载流子注入引起的反折射率导引, 用微扰理论作了模拟计算, 表明角反射器耦合是锁相阵列的一种新的耦合机制; 主瓣对应于同相锁定, 支瓣是由周期性微扰引入的高阶本征模。

关键词 激光器阵列, 角反射器。

1 引 言

理论和实验表明: 均匀分布的瞬衰场耦合的锁相阵列激光器尽管工艺简单, 易获得高功率输出, 但一般只可能是最高阶超模工作, 远场呈双瓣光斑; 而且随载流子的注入, 其工作模式是不稳定的, 不可能获得基侧模单瓣工作。众多的研究者尝试了多种器件结构和耦合机制, 如 Y-形波导耦合阵列等, 但由于工艺和设计的复杂性, 未能获得理想的结果。近两年来, Botez 等人提出并实现了一种基于谐振光波导耦合的反导引锁相阵列结构^[1]。由于折射率反导引机制, 阵列相邻单元间可获得稳定的同相位工作, 从而获得近衍射极限的基侧模输出。

本文提出一种用反应离子刻蚀(RIE)制备的 45° 角反射器耦合 InGaAs 应变层量子阱锁相阵列激光器(CRLA)。实验结果和理论分析表明, 由于这种独特的耦合机制, 可以获得高稳定性近衍射极限输出单模工作的阵列器件。

2 器件结构

反应离子蚀刻技术可以形成相对于晶向和激光器轴向成各种不同角度的镜面, 大大突破了解理技术的限制; 从而可以设计制造各种特殊结构的激光器, 如角反射激光器^[2], 折迭腔激光器^[3]、环形腔行波激光器^[4]等。本文用反应离子蚀刻工艺构造一系列 45° 角反射器, 作为阵列的一个端面, 另一个腔面仍为解理面, 器件结构和它的扫描电镜照片如图 1 所示。反应离子蚀刻深度为 $2.5 \mu\text{m}$ 。所用材料为金属有机化学气相淀积生长的 InGaAs/GaAs 应变层单量子阱限制结构; 阱厚 10 nm , 波导层总厚 $2 \times 50 \text{ nm}$ 。激光峰值波长为 $1.065 \mu\text{m}$ 。每一个

单元由浅腐蚀(约 $0.4 \mu\text{m}$ 深)台面条形构成, 10 单元列阵总宽度为 $100 \mu\text{m}$ 。

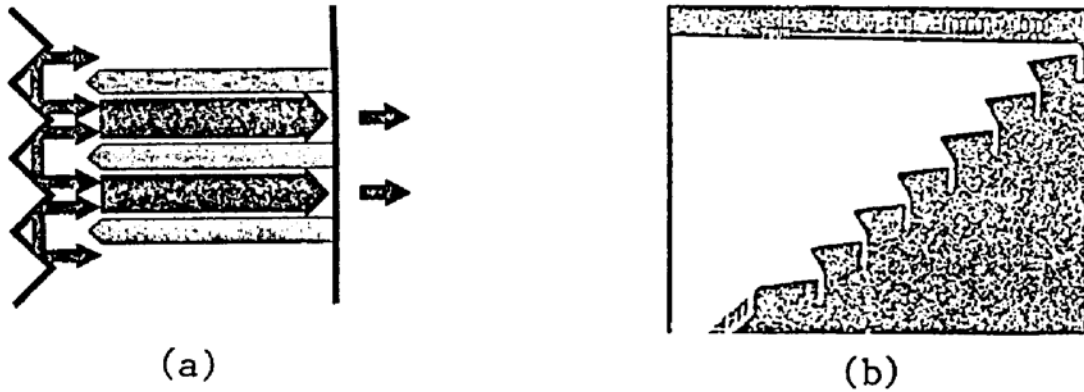


Fig. 1 (a) Schematic structure of the phase-locked laser array coupled with corner reflectors, (b) SEM micrograph of 45° corner reflectors etched with RIE

3 耦合机理

由于 InGaAs/GaAs 材料的有效折射率大于 3.0, 如果腐蚀腔面是理想的镜面, 那末以 45° 角入射的光线将发生全反射。因此, 本工作设计的角反射器将会把每一单元光场的一半分别全反射至相邻的两单元中。这样, 每相邻两条构成了腔长为 $2L$ 的一个法布里-珀罗腔激光器; 整个列阵为一多次折迭腔激光器(FCL)。条与条之间存在着很强的耦合, 这种耦合机制完全不同于瞬衰场的弱耦合。由于每相邻两单元构成一个折迭的法布里-珀罗腔, 光腔必须满足谐振条件, 其光学长度一定是半波长的整数倍。当腔长为半波长的偶数倍时, 相邻单元的输出光场同相; 当腔长为半波长的奇数倍时, 相邻单元的输出光场反相。它不可能象瞬衰场耦合的列阵那样, 存在相位差为 0° - 180° 间 N 个分立值的超模。而且这种耦合受每一单元折射率和增益分布变化的影响比较小。因此能够在较大的工作电流范围起作用。

在以角反射器作为一个腔面的单条激光二极管中, 对称分布的偶阶侧模具有较高的增益^[2]。这是因为, 在忽略增益饱和和空间烧孔效应的情况下, 条中心处具有最大的增益。从折迭腔的振荡模式来看, 只有偶阶纵模才能形成侧向场同相迭加, 在中心点出现光场的极大。因此, 基侧模具有最大的模增益。对于腔长为 $2L$ 的折迭腔, 其纵模间隔应为 $\lambda^2/4L$ 。但文献[2]实验所测得的模间隔却为 $\lambda^2/2L$ 。结合侧模场分布的实验结果可以知道, 只有偶阶纵模振荡。这种纵模和侧模之间的耦合是折迭腔激光器的一个重要特点。文献[3]中由多个角反射器构成的折迭腔激光器, 和本工作的折迭腔激光器列阵, 都测到了加倍的模间隔宽度。虽然还存在其他不同的机制, 但纵模和侧模之间的耦合显然是一个重要的因素。

在本文设计的角反射器耦合列阵中, InGaAs/GaAs 应变层材料有一个特点^[5]: 折射率随着注入载流子密度的增加而减少, 其程度远大于 GaAs 等材料。当载流子密度从零增加到激光值时, 有效折射率的减少可达 0.05。因此, 侧向有一强的反折射率导引机制存在, 从而造成的漏模, 使条间耦合比瞬衰场机制大为增强。而在谐振条件下, 只允许同相或反相锁定。但谐振条件是靠器件结构的设计和工艺来实现的, 要求很高的控制精度。用角反射器耦合就比较容易实现与谐振波导同样的相位锁定状态, 且侧模和纵模的耦合总是得到同相位锁定的基阶侧模工作的偶纵模振荡。由于 InGaAs 应变层材料的这种载流子反折射率导引, 列阵可以看作既有周期性的增益分布(折射率虚部), 又有周期性的折射率分布(实部), 两者之间

又在侧向位移半个周期。这种分布状态将使基侧模增益大于反相耦合的 N 阶模增益, 有利于列阵基模单瓣运转。

4 实验结果

在 1.5 kc 重复频率和 2 μ s 脉宽的电流下测量了角反射器激光器列阵器件的功率/电流特性和远场分布。对于腔长为 300 μ m 左右的列阵器件, 典型阈值电流为 60 mA。在 300 mA 工作电流下, 可获得约 80 mW 的输出功率。前后腔面输出功率之比约为 6-7:1, 由此数据, 并利用同一外延片做的两面解理宽条激光器的参数, 可以估算出角反射器的反射率为 48%, 散射损失为 43%。这说明角反射器有利于增加输出。但离开理想的全内反射还有一定的差距, 要在工艺上进一步提高。

远场是在一个分辨率为 0.2° 的机械转盘上测量的。图 2 显示了一个典型器件在不同的泵浦电流下的远场图样。可以看到, 器件以主单瓣工作; 并且在数倍阈值下维持了同样的远场特征。表明了这种角反射器激光器列阵器件与通常的瞬衰场耦合的列阵有本质上不同的耦合机理, 上述的分析是合理的。从图 2 还可看到, 主瓣的角宽度分别达到 0.8°。测到的最低值达 0.64°, 仅是衍射极限(按 $0.88 \lambda/W$ 计算为 0.54°)的 1.3 倍。这说明列阵各条之间达到相当好的相位锁定。在主瓣的两侧, 测到了对称分布的两对支瓣。瓣间角距典型值约为 6°。支瓣的相对强度随注入电流而变化。

用显微红外摄像方法测量图 2(b) 同一器件的近场, 如图 3 所示。可以看到, 在较小的泵浦下近场呈强弱相间的光斑, 较强的光斑对应于电流注入的条区。在大电流下条间出现一个以上较弱的光斑。条内光斑也开始出现分裂。这些实验现象给锁相机理的分析提供依据。

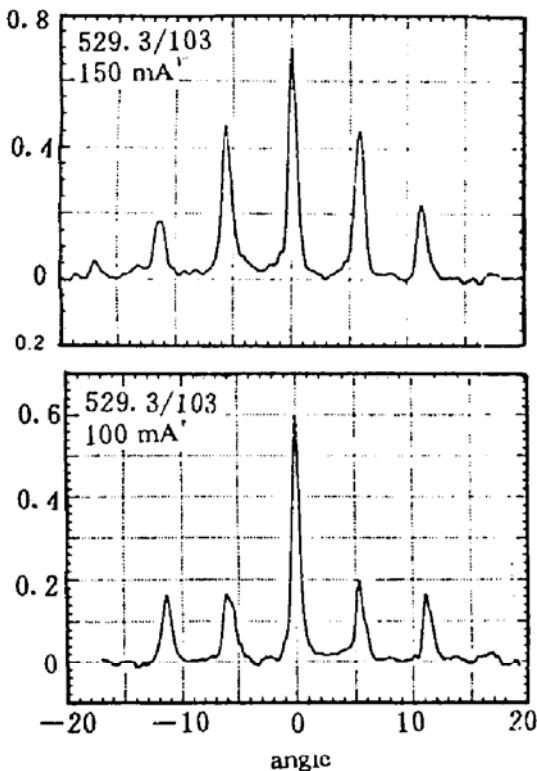


Fig. 2 Lateral far-field patterns of a CRLA at different currents, $I_m = 60$ mA

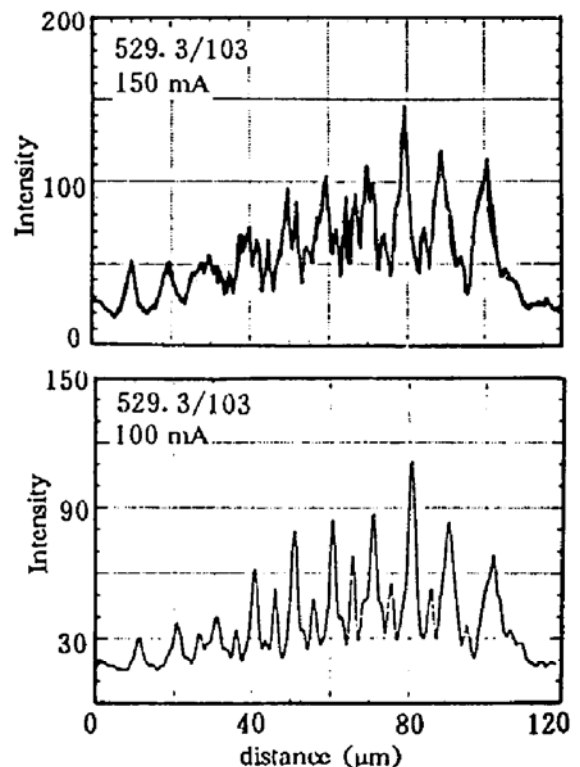


Fig. 3 Near-field intensity profiles of the same CRLA with Fig. 2

5 理论分析和数值计算

如上所述, 整个阵列存在着周期变化的折射率和增益分布。本文以宽接触激光器的各阶侧模作为本征模, 以折射率和增益的周期分布作为微扰量, 运用微扰理论分析阵列的近场和远场。电磁场的微扰解可表为^[6]:

$$E = E_m + \sum C_{n\pm} E_{2nN\pm m}$$

式中本征模 $E_m = \sin(m\pi y/W)$, W 为阵列侧向 (y 方向) 宽度, N 为阵列单元数, m 为本征模的阶次。 n 为正整数, 是微扰的阶次, 对 n 及正负脚标进行求和。 $C_{n\pm}$ 为微扰系数, 它可表为:

$$C_{n\pm} = \frac{-W \int_0^{W/N} \cos(2nN\pi y/W) \Delta\epsilon(y) k_0^2 dy}{4n(nN \pm m)\pi^2}$$

这里 $\Delta\epsilon(y)$ 为电介质常数的微扰变化量, k_0 为真空波矢。可见, 对于第 m 阶模, 周期性微扰使第 $(2nN \pm m)$ 阶模与 m 阶模耦合在一起。微扰系数随 n 的上升迅速减少, 因此一般只需考虑 $n = 1, 2$ 的情况。由上述定性分析和实验结果可知, 角反射器激光器阵列以主单瓣工作。因此, 只需考虑基模 ($m = 1$) 及与之耦合的第 $(2nN \pm 1)$ 阶模。此时, 近场可以写成下面的形式:

$$E = [1 + C_1 \cos(2N\pi y/W) + C_2 \cos(4N\pi y/W)] \sin(\pi y/W)$$

这是一种 Bloch 波形式。远场可以由此近场作傅里叶变换获得。图 4(a) 和 (b) 分别为在两组微扰系数下计算的近场和远场分布。可见与角反射器耦合锁相阵列测得的近场和远场分布 (图 2、3) 相当符合。计算中考虑到载流子的扩展效应, 取 $\Delta\epsilon(y) = \Delta\epsilon_0 \sin(N\pi y/W)$ 。

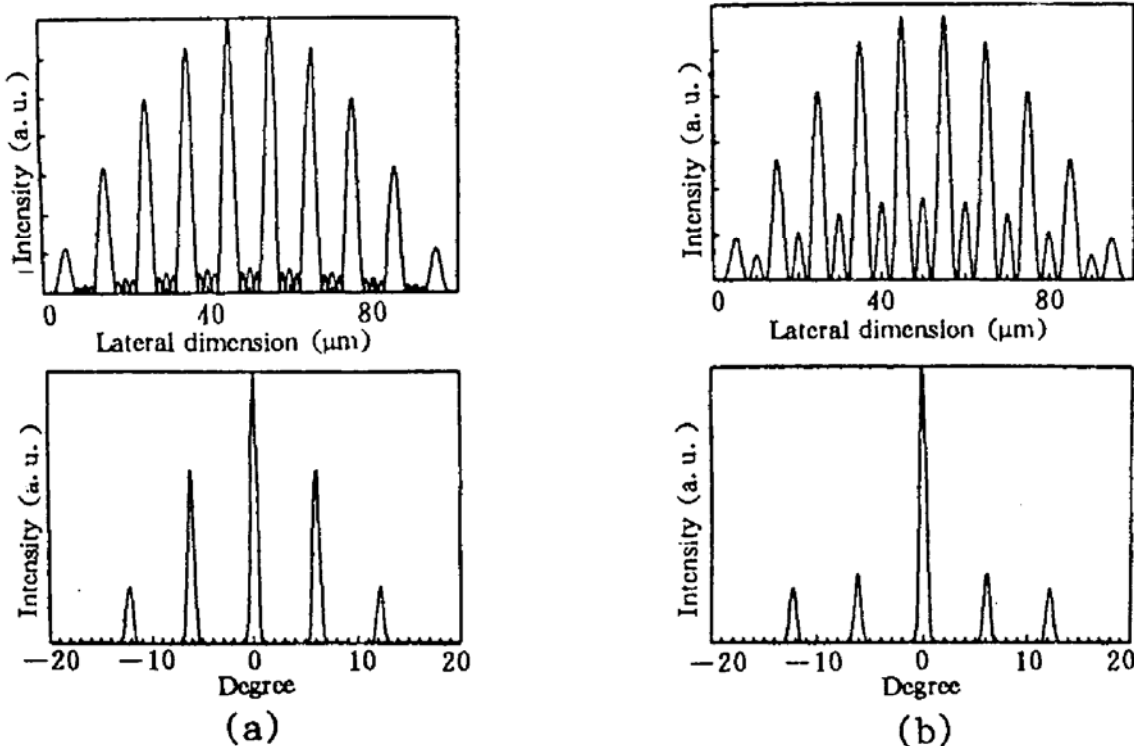


Fig. 4 (a) Theoretical near- and far- field profiles at a lower current (anti-index perturbation $\Delta\epsilon_0 \approx 0.025$),
(b) Theoretical near- and far- field profiles at a higher current (anti-index perturbation $\Delta\epsilon_0 \approx 0.04$)

根据上述微扰理论, 除了第 1 阶基模之外, 第 m 阶本征侧模的双瓣间距为 $\theta = 2 \arcsin(m\lambda/2W)$ 。因此, 由上面远近场的理论计算和实验曲线可以推断: 中心主瓣对应于第 1 阶基模, 第一对支瓣对应于第 $2N$ 阶模, 理论瓣间距为 12.2° , 与实验值一致; 第二对支瓣对应于第 $4N$ 阶模, 理论瓣间距为 24.5° , 也与实验值十分接近。

值得提出的是, 本文的简单模型给出的远近场图样, 与 Botez 等复杂计算得到的结果十

分相近。 $n = 1$ 的情况对应于文献[1]中的第 18 阶模, $n = 2$ 对应于第 36 阶模。这可能是由于两者都采用了反折射率导引结构。但是在角反射器激光器列阵中, 角反射器提供的强耦合更有利于模式的稳定。当然, 随着注入载流子的增加, 微扰系数也会增大, 从而支瓣所占的能量也变大。但整个列阵仍以主单瓣基模工作, 正如模拟计算所显示的。

实际应用要求中心主瓣所占能量的比例尽可能大。目前的实验结果在这一点上还是不能令人满意的。进一步改进角反射器的结构, 对折射率分布的机理作更深入的研究, 对微扰量作更合理的设计, 以获得具有更高方向性的高功率激光束, 是下一步应当开展的工作。

感谢美国依利诺大学微电子中心 Coleman 教授和他的同事们提供的实验技术和实验条件等各方面的帮助, 以及许多有价值的讨论。

参 考 文 献

- [1] D. Botez, L. J. Mawst, G. Peterson *et al.*, Phase-locked arrays of antiguides; Modal content and discrimination. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(3): 482~495
- [2] M. Hagberg, A. Larsson, S. T. Eng, Single-ended output GaAs/GaAlAs single quantum well laser with a dry-etched corner reflector. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(20): 1934~1936
- [3] J. E. Johnson, C. L. Tang, CW operation of folded-cavity semiconductor lasers with etched turning mirrors. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(21): 2025~2026
- [4] A. Behfar-Rad, J. M. Baillentyne, S. S. Wong, AlGaAs/GaAs based triangular-shaped ring ridge lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(14): 1658~1660
- [5] K. J. Beernink, J. J. Alwan, J. J. Coleman, Antiguiding in narrow stripe gain-guided InGaAs-GaAs strained-layer lasers. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(1): 56~60
- [6] 刘 斌, 方祖捷, 均匀分布锁相列阵半导体激光器的微扰理论. *量子电子学*, 1992, **9**(3): 253~259

Mode Characteristics of a Corner Reflector Coupled InGaAs Strained Layer Quantum Well Laser Phased Array

Liu Bin Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 8 December 1993; revised 13 June 1994)

Abstract A ten-element InGaAs strained-layer single quantum well laser phased array coupled with corner reflectors (CRLA) was designed and fabricated by using reactive ion etching (RIE). A far-field pattern with main single lobe was obtained in a larger current range up to $4 \times$ threshold. The narrowest beam width measured for the main lobe was 0.64° , near the diffraction limit. The mode characteristics of CRLAs were analyzed and simulated by using the perturbation theory, taking into consideration the inter-coupling between longitudinal and lateral modes caused by the corner reflectors, and the anti-index guiding caused by carrier injection into InGaAs active layer. The results show that the coupling with corner reflectors is a new kind of coupling mechanisms for phase-locked laser array; and the main lobe corresponds to in-phase locking, while the side lobes correspond to the higher order eigenmodes, as the result of periodical perturbation.

Key words laser array, corner reflector.