

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0327-04

GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器的光束质量*

王绍民¹ 赵道木¹ 周国泉^{1,2}

(¹ 浙江大学物理系, 杭州 310028
² 浙江林学院光电子研究所, 临安 311300)

提要 运用非截取地把非傍轴激光束变换到傍轴的技术对 GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器的等效光束质量进行了测量, 实验测得垂直于结平面方向上的等效光束质量因子小于 1。同时, 用波导模式理论和非傍轴矢量矩理论对其光束质量进行了初步的理论分析和计算, 理论结果和实验结果基本符合。

关键词 应变多量子阱激光器, 光束质量, 波导模式, 非傍轴矢量矩

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

Beam Quality of GaInP/AlGaInP Strained Multiple Quantum Well Laser

WANG Shao-min¹ ZHAO Dao-mu¹ ZHOU Guo-quan^{1,2}

(¹ Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310028
² Research Institute of Photoelectron, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300)

Abstract The equivalent beam qualities of GaInP/AlGaInP strained multiple quantum well laser are measured by transforming nonparaxial semiconductor laser beam into paraxial one non-truncatedly. The beam quality factor in the direction perpendicular to the junction plane is shown to be smaller than unity. Based on the waveguiding mode and nonparaxial vectorial moment theory, the beam qualities are analysed and calculated, which are basically coincided with the experimental results.

Key words strained multiple quantum well laser; beam quality; waveguiding mode; nonparaxial vectorial moment

1 引言

在传统的半导体激光器理论中, 远场发散角定义为 FWHM 即半功率全宽^[1]。这样的定义在某些方面有其合理的一面, 但在评价光束质量时若仍采用这样的定义会导致与其他非半导体激光器的光束质量无法比较, 为了统一衡量各类激光器的光束质量, 半导体激光束的远场发散角也应采用 ISO 的标准定义^[2,3]。650 nm GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器(SMQW-LD)是目前用于光信息存储非常重要的光源^[4]。在光信息存储系统中, 高的信息存储密度可通过减小焦斑即第二束腰得到。这就意味着激光器的光束质量越好, 信息存储密度就越大。因此对其光束质量的测量和分析具有十分重要的现实意义。本文设计了一大角度能将非傍轴半导体激光束非截取地变换到傍轴光束的光学变换系统, 用于

测量这种激光器的等效光束质量。同时, 用波导模式理论^[5]和非傍轴矢量矩理论^[6]对其光束质量进行了理论分析和计算。

2 实验测量结果

图 1 是 650 nm GaInP/AlGaInP SMQW-LD 的结构, 是一正台面脊形折射率波导结构。从上往下依次是 P-GaAs 欧姆接触层, P-(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P 上限制层, (Al_{0.4}Ga_{0.6})_{0.5}In_{0.5}P 上空间限制层, 厚为 0.05 μm 的 (Al_{0.4}Ga_{0.6})_{0.5}In_{0.5}P/GaInP 压应变多量子阱有源区, (Al_{0.4}Ga_{0.6})_{0.5}In_{0.5}P 下空间限制层, N-(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P 下限制层, N-GaAs 缓冲层和衬底。在实验测量时, 只用了 SMQW-LD 的管芯。图 2 是解理面上和远场的光场分布图, 其中, 水平方向平行于结平面, 而竖直方向垂直于结平面(下同)。图 2(a)是用 1000 倍带油显微镜观察拍摄的。此

* 国家自然科学基金(19974038)资助课题。

时,注入电流和出射功率分别是 28 mA 和 3.2 mW, 而激光器的阈值电流为 18 mA^[7]。

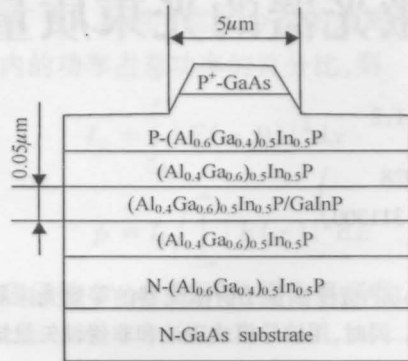


图 1 GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器结构示意图
Fig. 1 Laser structure of GaInP/AlGaInP SMQW-LD

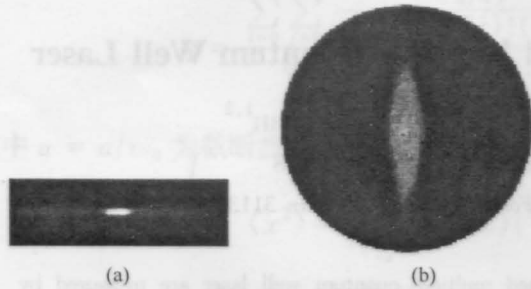


图 2 非截取激光束在解理面上(a)和远场(b)的分布
Fig. 2 Distributions of non-truncated laser beam in the cleavage plane (a) and the far field (b)

显然,若象图 2 来直接测量束腰和远场光斑尺寸,从而计算光束质量因子,其精度是不够的,主要原因是束腰太细而现有的光学仪器分辨本领不够。这样导致无法直接精确测量半导体激光束的光束质量,因此我们采取间接测量的方法。采用直径为 3 mm,放大倍数为 100,数值孔径为 1.25 的油浸显微镜将非傍轴半导体激光束变换成傍轴激光束,然后

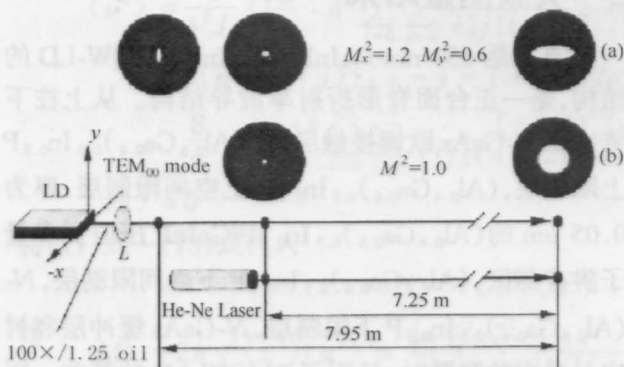


图 3 光学变换系统和测量结果
Fig. 3 Optical transformation system and measuring results

用 ISO 标准中的移动刀口法测量傍轴激光束的光束质量。图 3 是光学变换系统和测量结果图。运用该油浸显微镜,光束的截取率低于 1%,总的耦合效率约为 90%。为了衡量实验的精度,同时也为了和基模高模光束的光束质量进行比较,在实验中使用了 633 nm 的 He-Ne 激光器。图 3(a)是半导体激光束经变换后在束腰和远场的光场分布图。其中,水平方向的实测束腰是 0.30 mm,竖直方向的实测束腰是 0.45 mm;并且竖直方向的束腰位置要比水平方向上的远 0.70 m。而远场光斑水平方向和竖直方向的实测半径分别为 4.40 cm 和 3.00 cm。图 3 (b)是基模高斯光束在束腰和远场的光场分布图。由图 3 上标明的位置可看出,远场的距离大于瑞利距离的 7 倍以上。实验测得半导体激光束经变换后平行于结平面方向和垂直于结平面方向上的等效光束质量因子分别为 1.2 和 0.6。而基模高斯光束的等效光束质量因子测得为 1。由于变换系统还存在着截取和像差,未经变换前的非傍轴半导体激光器的光束质量应比实验测量结果要好。

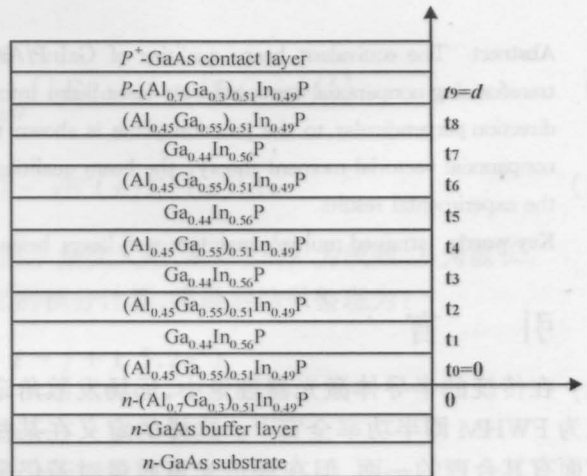


图 4 GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器结构示意图。 x 轴垂直于结平面方向, t_j 为界面位置坐标; z 轴为光束传播方向
Fig. 4 Laser structure of GaInP/AlGaInP SMQW. The x coordinate is normal to the junction plane, and t_j are the positions of the interfaces. The z coordinate is taken to be the beam propagating direction

3 理论分析

由于商业上的原因,650 nm GaInP/AlGaInP SMQW-LD 中存在着一些未知的参数,所以我们将以 680 nm GaInP/AlGaInP SMQW-LD 作为理论研究

的对象,以对上述实验结果作出定量的解释。如图4所示,其多量子阱结构由四个压应变的 $\text{Ga}_{0.44}\text{In}_{0.56}\text{P}$ 量子阱和五个 $(\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ 势垒层组成,夹在 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ 上下两个限制层中间,形成一个波导芯。每个阱层和势垒层的厚度分别为 $d_w = 8\text{ nm}$ 和 $d_b = 5\text{ nm}$, 整个波导芯厚为 $d = 57\text{ nm}$ 。量子阱层、势垒层和限制层的折射率分别为 $n_w = 3.512$, $n_b = 3.384$ 和 $n_c = 3.304$ 。

先考虑垂直于结平面方向上的光束质量,此时

可将激光器结构视为多层平板波导处理。定义传播常数 k_c, k_b, k_w 如下

$$\left. \begin{aligned} k_c &= k \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_c^2}; \\ k_b &= k \sqrt{n_b^2 - n_{\text{eff}}^2}; \\ k_w &= k \sqrt{n_w^2 - n_{\text{eff}}^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波数, n_{eff} 为垂直于结平面方向上波导模式的有效折射率。

在不同层内 TE 波导模的光场分布如下^[5]

$$E_y(x) = \begin{cases} E \exp(k_c x) & x \leq 0 \\ E a \exp[-k_c(x-d)] & x \geq d \\ E \{ a_l \cos[k_b(x-t_{2l})] + b_l \sin[k_b(x-t_{2l})] \} & t_{2l} \leq x \leq t_{2l+1} \quad l = 0, 1, 2, 3, 4 \\ E \{ c_l \cos[k_w(x-t_{2l+1})] + d_l \sin[k_w(x-t_{2l+1})] \} & t_{2l+1} \leq x \leq t_{2l+2} \quad l = 0, 1, 2, 3 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$t_j = \begin{cases} 13l \text{ (nm)} & j = 2l, l = 0, 1, 2, 3, 4 \\ (5 + 13l) \text{ (nm)} & j = 2l + 1, l = 0, 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (3)$$

表示不同层间的界面位置坐标。

垂直于结平面方向上波导模式有效折射率 n_{eff} 可通过解本征值方程得到

$$A + k_c B + C/k_c + D = 0 \quad (4)$$

其中, A, B, C 和 D 是如下矩阵的矩阵元

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_b d_b) & \sin(k_b d_b)/k_b \\ -k_b \sin(k_b d_b) & \cos(k_b d_b) \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \cos(k_w d_w) & \sin(k_w d_w)/k_w \\ -k_w \sin(k_w d_w) & \cos(k_w d_w) \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \cos(k_b d_b) & \sin(k_b d_b)/k_b \\ -k_b \sin(k_b d_b) & \cos(k_b d_b) \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(1)式, (4)式和(5)式, 可得该激光器的垂直于结平面方向上模式有效折射率为 $n_{\text{eff}} = 3.314$ 。应用边界条件可确定待定系数 $\{a_l, b_l, c_l, d_l\}$ 和 a_0 。经计算, 该激光器只存在 TE_0 传输模。

当波导模从激光器输出后, 在自由半空间 $z \geq 0$ 传输的光场分布 $E'_y(x, z)$ 为^[6]

$$E'_y(x, z) = \frac{1}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}_y(\alpha) \exp(ik\gamma z) \exp(ikax) d\alpha \quad (6)$$

其中, $\tilde{E}_y(\alpha) = \sum_{l=0}^4 \int_{t_{2l}}^{t_{2l+1}} E_y(x) \exp(ikax) dx + \sum_{l=0}^3 \int_{t_{2l+1}}^{t_{2l+2}} E_y(x) \exp(ikax) dx$ 是激光器与空气界面 $z = 0$ 处输出

光束的角光谱, $\gamma = \sqrt{1 - \alpha^2}$ 。 $\gamma < 1$ 的值对应于和 z 轴成角 $\arcsin \alpha$ 传输的均匀波, 而 $\alpha > 1$ 的值对应于倏逝波。

由光束传输的非傍轴矢量矩理论可得, 基于强度二阶矩定义的垂直于结平面方向上的束腰 $W_{\perp}(0)$ 和发散角 θ_{\perp} 分别为^[6]

$$\frac{\pi^2 W_{\perp}^2(0)}{\lambda^2} = -\text{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}_y(\alpha) \frac{\partial^2 \tilde{E}_y^*(\alpha)}{\partial \alpha^2} \gamma d\alpha \right\} / \int_{-1}^{+1} |\tilde{E}_y(\alpha)|^2 \gamma d\alpha \quad (7)$$

$$\tan^2 \theta_{\perp} = 4 \int_{-1}^{+1} |\tilde{E}_y(\alpha)|^2 \frac{\alpha^2}{\gamma} d\alpha / \int_{-1}^{+1} |\tilde{E}_y(\alpha)|^2 \gamma d\alpha \quad (8)$$

式中, Re 表示取实部, 星号表示复共轭。

根据非傍轴光束的光束质量因子定义^[6,8],

680 nm GaInP/AlGaInP SMQW-LD 垂直于结平面方向上的光束质量因子 M_{\perp}^2

$$M_{\perp}^2 = \frac{\pi}{\lambda} W_{\perp}(0) \tan \theta_{\perp} \quad (9)$$

由此可得,垂直于结平面方向上的光束质量因子 $M_{\perp}^2 = 0.30$ 。这一计算结果符合文献[9]中的垂直于结平面方向上的光束质量因子与有源区厚度的变化规律。因此,垂直于结平面方向上的光束质量因子 M_{\perp}^2 小于 1 的条件是有源区厚度小于 0.32 个波长。

至于平行于结平面方向的光束质量因子,可通过类似的方法得到。对于折射率导引条形激光器,平行于结平面方向上的光束质量因子 M_{\parallel}^2 随有源区宽度的变化而波动。并且,在有源区宽度小于 0.31 个波长且远大于其厚度时,平行于结平面方向上的光束质量因子 M_{\parallel}^2 小于 1^[10]。上述理论研究的结果可作为有源区厚度和宽度合理设计的参考,同时,也有助于加深对突变波导半导体激光器光束本性及其传输变换特性的认识。

运用上面的理论分析结果就能解释 650 nm GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器光束质量的实验测量结果。由于有源区厚度为 50 nm,脊宽为 5 μm ,所以相应方向上的光束质量因子应分别小于 1 和大于 1。由于变换系统不够完善,实验结果与理论计算值有一定差距也是合乎情理的,因此该光学变换系统有待于进一步改进和完善。

4 结 论

本文运用非截取地把非傍轴光束变换成傍轴光束的技术,测量了 650 nm GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器的等效光束质量因子,实验测得垂直于

结平面方向上的等效光束质量因子小于 1。同时,用波导模式理论和非傍轴矢量矩理论对其光束质量进行了初步的理论分析和计算,得到光束质量因子小于 1 的基本条件是有源区的尺寸小于 0.3 个波长。理论计算结果和实验结果基本符合。

参 考 文 献

- 1 H. C. Casey Jr., M. B. Panish, J. L. Merz. Beam divergence of the emission from double-heterostructure injection lasers. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(12):5470~5475
- 2 ISO/TC 172/SC 9/WG 1, ISO/DIS 11146. Terminology and test methods for lasers, Revision N80, 1995
- 3 S. Wang, D. Zhao. *Matrix Optics*. Beijing: CHEP-Springer, 2000, 65~67
- 4 W. Zhuang. Remarkably well-developing semiconductor lasers. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1994, **A22**(5):341~344 (in Chinese)
- 5 I. M. Skinner, R. Shall, B. L. Weiss. Modal propagation within MQW waveguides. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(1):6~11
- 6 M. A. Porrás. Non-paraxial vectorial moment theory of light beam propagation. *Opt. Commun.*, 1996, **127**(1/3):79~95
- 7 S. Wang, D. Zhao, Z. Lu *et al.*. Demonstrations for optical beam qualities of quantum well lasers. *Opt. Commun.*, 2001, **194**(4/6):425~428
- 8 Q. Cao, X. Deng, H. Guo. Optical beam quality factor of nonparaxial light beams I. Definition. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(9):1217~1222 (in Chinese)
- 9 G. Zhou, D. Zhao, J. Xu *et al.*. Semiconductor laser with beam quality factor $M^2 < 1$. *Opt. Commun.*, 2001, **187**(4/6):395~399
- 10 G. Zhou, D. Zhao, S. Wang. Theoretical study on the beam quality of strip buried heterostructure laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), accepted (in Chinese)