

文章编号: 0258-7025(2002)07-0591-04

# 条形隐埋激光器光束质量的理论研究

周国泉<sup>1,2</sup>, 赵道木<sup>1</sup>, 王绍民<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学物理系, 浙江杭州 310028; <sup>2</sup> 浙江林学院基础部, 浙江临安 311300)

**摘要** 运用波导模式理论和光束传输的非傍轴矢量矩理论, 对 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 条形隐埋异质结半导体激光器 TE<sub>00</sub> 模的光束质量进行了理论研究。着重分析了平行于结平面方向上的光束质量因子与有源层宽度的关系。结果表明平行于结平面方向上的光束质量因子随有源层宽度而波动, 这一结果可作为有源层宽度合理设计的参考。

**关键词** 光束质量, 条形隐埋异质结激光器, 波导模式, 非傍轴矢量矩

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

## Theoretical Study on the Beam Quality of Strip Buried Heterostructure Laser

ZHOU Guo-quan<sup>1,2</sup>, ZHAO Dao-mu<sup>1</sup>, WANG Shao-min<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310028  
<sup>2</sup> Department of Basic Science, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300)

**Abstract** Based on waveguiding mode theory and non-paraxial vectorial moment theory, the beam quality of TE<sub>00</sub> mode propagating in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As strip buried heterostructure semiconductor laser is investigated theoretically, and the emphasis is laid on the variational relation between the beam quality factor in the direction parallel to the junction plane  $M_y^2$  and the active layer width  $W$ . The results show that  $M_y^2$  fluctuates with the active layer width  $W$ , which is useful for the proper design of the active layer width.

**Key words** beam quality, strip buried heterostructure laser, waveguiding mode, non-paraxial vectorial moment

## 1 引言

半导体激光器(LD)光束质量的好坏直接影响到其实际应用,因此对一些对光束质量要求较高的场合,为了改善半导体激光器的光束质量,必须采用条形激光器。尽管条形激光器从 20 世纪 70 年代后期到现在已有近百种结构<sup>[1,2]</sup>,但据侧模控制原理,可分为两类:增益导引条形激光器和折射率导引条形激光器。增益导引条形激光器由于波前在平行于结平面的传播方向上呈圆柱形凹面,因此给应用带来了甚多不便。而折射率导引条形激光器由于在两个方向上,都是由实折射率阶跃来控制基模运转的,因而在光通信、光盘、激光打印和光学条形码扫描器等领域占有绝对优势。本文以 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 条形

隐埋异质结(SBH)折射率导引激光器为例,对其两个方向上的光束质量进行全面的理论研究。由于半导体激光器垂直于结平面方向上的光束质量因子与有源层厚度的关系已有相关文献报道<sup>[3~5]</sup>,所以我们将着重讨论平行于结方向上的光束质量因子与有源层宽度的关系。了解折射率导引条形激光器光束质量的全貌,可为折射率导引激光器有源层宽度合理设计提供参考。

## 2 激光器模式

图 1 是 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 条形隐埋异质结半导体激光器的波导结构示意图<sup>[6]</sup>。宽为  $W$ , 厚为  $d_1 = 50$  nm 的有源层窄条  $p$ -GaAs 沉积在  $N$ -Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As

收稿日期 2001-06-04; 收到修改稿日期 2001-08-20

基金项目 国家自然科学基金(编号:19974038)资助项目。

作者简介 周国泉(1970—)男,浙江桐乡人,浙江林学院讲师,博士,主要从事光束传输和光束质量控制的研究。E-mail:

zhouguoquan178@sohu.com

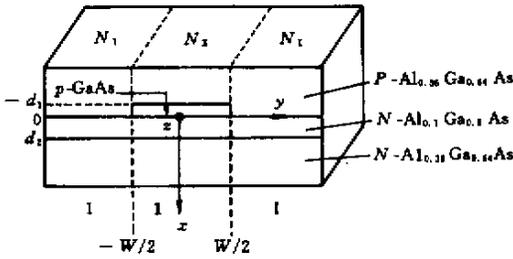


图 1 条形隐埋波导结构示意图

$x$  轴垂直于结平面方向,  $y$  轴为平行于结平面方向。

$z$  轴为光束传播方向

Fig. 1 Schematic diagram of the SBH waveguide

The  $x$  axis is normal to the junction plane, and the  $y$  axis is parallel to the junction plane. The  $z$  axis is taken to be the beam propagating direction

$\text{Ga}_{0.64}\text{As}$  上下两个限制层中间。  $p\text{-GaAs}$ ,  $N\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  以及  $P\text{-Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$  的折射率分别为  $n_a = 3.59$ ,  $n_w = 3.52$  和  $n = 3.34$ 。  $N\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  层的厚度  $d_2 = 0.50 \mu\text{m}$ 。 该激光器激射的波长约为  $\lambda_0 = 0.88 \mu\text{m}$ 。

由于该激光器的输出光束主要是 TE 偏振的, 所以在这里只讨论  $\text{TE}_{mn}$  模

$$E_y^{mn}(x, y) = E_y^m(x) E_y^n(y) \quad (1)$$

对于  $W/d_1 \gg 1$  (实际激光器一般均满足这一条件) 的情况, 可用有效折射率近似法确定其模式。 将波导结构分为两个不同的区域 I 和 II。 区域 I 是三层平板波导结构, 区域 II 是宽度为  $W$  的条区四层平板波导结构。 区域 I 和 II 的有效折射率分别为  $N_I$  和  $N_{II}$ 。

区域 II 中垂直于结平面方向上不含时的光场分布  $E_y^m(x)$  为

$$E_y^m(x) = \begin{cases} A_0 \exp[-K_1(x + d_1)] \exp(-i\beta_1 z) & x < -d_1 \\ [A_1 \cos(K_2 x) + B_1 \sin(K_2 x)] \exp(-i\beta_1 z) & -d_1 \leq x \leq 0 \\ [A_2 \exp(K_w x) + B_2 \exp(-K_w x)] \exp(-i\beta_1 z) & 0 \leq x \leq d_2 \\ A_3 \exp[-K_1(x - d_2)] \exp(-i\beta_1 z) & x \geq d_2 \end{cases} \quad (2)$$

传播常数  $\beta_1$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  和  $K_w$  分别为

$$\beta_1 = k_0 N_{II}; K_1 = k_0 (N_{II}^2 - n^2)^{1/2}; K_2 = k_0 (n_a^2 - N_{II}^2)^{1/2}; K_w = k_0 (N_{II}^2 - n_w^2)^{1/2} \quad (3)$$

其中  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  为自由空间波数。

有效折射率  $N_{II}$  可通过解如下本征方程得到

$$K_2 d_1 - \arctan\left(\frac{K_1}{K_2}\right) - \arctan\left[\frac{K_w}{K_2} \left(\frac{K_1 + K_w \tan(K_w d_2)}{K_w + K_1 \tan(K_w d_2)}\right)\right] = m\pi \quad (4)$$

对于 TE 波导模, 它的电场和一阶导数在边界是连续的。 应用该边界条件可确定待定系数  $A_0, A_1, A_2, A_3, B_1$  和  $B_2$ 。

区域 I 的有效折射率  $N_I$  由本征方程

$$\kappa_1 d_2 - 2\arctan\left(\frac{\kappa_2}{\kappa_1}\right) = m\pi \quad (5)$$

得到, 其中  $\kappa_1 = k_0 (n_w^2 - N_I^2)^{1/2}$ ,  $\kappa_2 = k_0 (N_I^2 - n^2)^{1/2}$ 。

平行于结平面方向上的是一自建折射率导引的对称三层平板波导, 其有效折射率为  $N_{\text{eff}}$ 。 平行于结平面上不含时的光场分布  $E_y^n(y)$  为

$$E_y^n(y) = \begin{cases} \frac{\beta_2 A_4}{\omega \epsilon_0 N_{II}^2} \cos(K_4 y) \exp(-i\beta_2 z) & |y| \leq W/2 \\ \frac{\beta_2 A_4}{\omega \epsilon_0 N_I^2} \cos(K_4 W/2) \exp[-K_3(|y| - W/2)] \exp(-i\beta_2 z) & |y| \geq W/2 \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\omega$  为圆频率,  $\epsilon_0$  为真空电容率, 传播常数  $\beta_1, K_3$  和  $K_4$  定义为

$$\beta_2 = k_0 N_{\text{eff}}; K_3 = k_0 (N_{\text{eff}}^2 - N_I^2)^{1/2}; K_4 = k_0 (N_{II}^2 - N_{\text{eff}}^2)^{1/2} \quad (7)$$

而有效折射率  $N_{\text{eff}}$  由以下本征方程决定

$$K_4 W - 2 \arctan \left( \frac{K_3 N_{\parallel}^2}{K_4 N_{\perp}^2} \right) = n\pi \quad (8)$$

由式(8)可得,其  $\text{TE}_{01}$  模式被截止的有源层宽度为

$$W_c = \frac{\lambda_0}{2(N_{\parallel}^2 - N_{\perp}^2)^{1/2}} \quad (9)$$

由式(4)(5)和(9)可得,当有源层宽度  $W$  小于  $1.80 \mu\text{m}$  时,激光器中只存在基模即  $\text{TE}_{00}$  传输模。

### 3 $\text{TE}_{00}$ 模的光束质量

当  $\text{TE}_{00}$  模半导体激光束从条形激光器输出后,在自由半空间  $z \geq 0$  不含时的光场分布为  $E_y'(x, y) = E_y'(x)E_y'(y)$ ,  $E_y'(x)$  和  $E_y'(y)$  由下式决定<sup>[7]</sup>

$$E_y'(j) = \frac{1}{\lambda_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}_j(\alpha) \exp[ik_0(1-\alpha^2)^{1/2}z] \times \exp(ik_0\alpha j) d\alpha \quad (10)$$

其中  $j$  等于  $x$  或  $y$ , 以下相同;  $\tilde{E}_x(\alpha)$  和  $\tilde{E}_y(\alpha)$  分别是激光器与空气界面  $z=0$  处垂直于结平面和平行于结平面方向上输出光束的角光谱,可由(2)式和(6)式通过傅里叶变换得到

$$\tilde{E}_x(\alpha) = \frac{A_0}{2K_2} \left[ \frac{-K_1 - iK_2}{K_2 - k_0\alpha} \left( e^{iK_2 d_1} - e^{ik_0\alpha d_1} \right) + \frac{-K_1 + iK_2}{K_2 + k_0\alpha} \left( e^{-iK_2 d_1} - e^{ik_0\alpha d_1} \right) \right] \quad (11a)$$

$$\tilde{E}_y(\alpha) = \frac{\beta_2 A_4}{\omega \epsilon_0 N_{\parallel}^2} \left\{ \frac{\text{sir}[(K_4 + k_0\alpha)W/2]}{K_4 + k_0\alpha} + \frac{\text{sir}[(K_4 - k_0\alpha)W/2]}{K_4 - k_0\alpha} \right\} \quad (11b)$$

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和平行于结平面方向上的束腰  $W_x(0)$ ,  $W_y(0)$  以及相应的发散角  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  分别为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\pi^2 W_j^2 \chi(0)}{\lambda_0^2} = - \frac{\text{Re} \left[ \int \tilde{E}_j(\alpha) \frac{\partial^2 \tilde{E}_j^*(\alpha)}{\partial \alpha^2} (1-\alpha^2)^{1/2} d\alpha \right]}{\int_{-1}^{+1} |\tilde{E}_j(\alpha)|^2 (1-\alpha^2)^{1/2} d\alpha} \quad (12a)$$

$$\tan^2 \theta_j = \frac{4 \int_{-1}^{+1} |\tilde{E}_j(\alpha)|^2 \alpha^2 (1-\alpha^2)^{-1/2} d\alpha}{\int_{-1}^{+1} |\tilde{E}_j(\alpha)|^2 (1-\alpha^2)^{-1/2} d\alpha} \quad (12b)$$

根据非傍轴光束的光束质量因子定义<sup>[7,8]</sup>,垂直于结平面和平行于结平面方向上的光束质量因子  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为

$$M_j^2 = \frac{\pi}{\lambda_0} W_j(0) \tan \theta_j \quad (13)$$

经数值计算得,该激光器垂直于结平面方向上的光束质量因子  $M_x^2 = 0.20$ 。图2给出了其平行于结平面方向上的光束质量因子  $M_y^2$  与有源层宽度  $W$  的变化关系。由于要求  $W/d_1 \gg 1$ , 故有源层宽度  $W$  的取值从  $0.25 \mu\text{m}$  (有源层厚度的5倍) 开始。

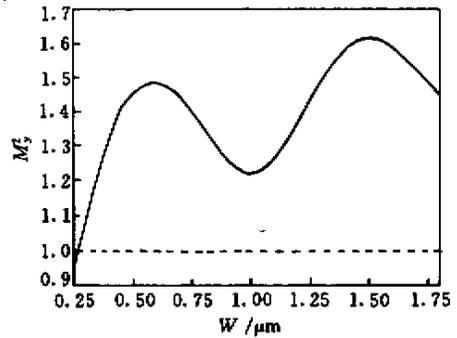


图2 平行于结平面方向上的光束质量因子  $M_y^2$  与有源层宽度  $W$  的变化关系

Fig.2 Beam quality factor in the direction parallel to the junction plane  $M_y^2$  as a function of the active layer width  $W$

由图2可知,光束质量因子  $M_y^2$  随有源层宽度  $W$  而波动:

1) 当有源层宽度  $0.25 \mu\text{m} \leq W \leq 0.60 \mu\text{m}$  时,光束质量因子  $M_y^2$  随有源层宽度  $W$  的增大而增大。当有源层宽度  $W = 0.27 \mu\text{m}$  (激光波长的0.31倍) 时,  $M_y^2 = 1$ 。当有源层宽度  $W$  小于  $0.27 \mu\text{m}$ , 光束质量因子  $M_y^2$  小于1。当  $W = 0.60 \mu\text{m}$  时,  $M_y^2$  达到其第二最大值1.49。

2) 当  $0.60 \mu\text{m} < W \leq 1.00 \mu\text{m}$  时,  $M_y^2$  随有源层宽度  $W$  的增大而减小。当  $W = 1.00 \mu\text{m}$  时,  $M_y^2$  取极小值1.22。当光束质量和输出功率两者须兼顾时,  $W = 1.00 \mu\text{m}$  是有源层的最佳选取宽度。

3) 当  $1.00 \mu\text{m} < W \leq 1.50 \mu\text{m}$  时,  $M_y^2$  又随有源层宽度  $W$  的增大而增大。当  $W = 1.50 \mu\text{m}$  时,  $M_y^2$  达到最大值1.61。

4) 当  $1.50 \mu\text{m} < W \leq 1.80 \mu\text{m}$  时,  $M_y^2$  随有源层宽度  $W$  的增大而减小。当  $W = 1.80 \mu\text{m}$  时,  $M_y^2$  下降为1.45。

半导体激光束由于具有较大的发散角和较小的束腰,因而精确测量其光束质量是比较困难的。文献<sup>[9]</sup>报道了正台面脊形折射率导引量子阱激光器等效光束质量的测量。该激光器的有源区厚度为

50 nm,脊宽为  $5\ \mu\text{m}$ ,基模运转时对应的等效光束质量因子分别为 0.6 和 1.2。考虑到测量上的误差以及激光器结构上的微小差异,我们对 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ As SBH 半导体激光器光束质量进行理论计算所得的结果和这一实验结果是比较吻合的。

## 4 结 语

本文运用波导模式理论和非傍轴矢量矩理论,对 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ As 条形隐埋异质结半导体激光器的光束质量进行了理论分析和数值计算。结果表明其平行于结平面方向上的光束质量因子  $M_y^2$  随有源层宽度的变化而波动。并且,发现在有源层宽度小于 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  $M_y^2$  小于 1。该研究工作的结果可作为有源层宽度设计的参考,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。

## 参 考 文 献

- 1 Li Shizhu, Zhang Jingming, Yang Guowen *et al.*. GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ As MQWs BH laser diodes [ J ]. *Chinese J. Semiconductors* ( 半导体学报 ), 1996, **17**( 4 ): 275 ~ 278 ( in Chinese )
- 2 Chen Gaoting, Bai Jingsong, Zhang Yunming *et al.*. A  $2\ \mu\text{m}$  waveband InGaAsSb/AlGaAsSb wide stripe MQW diode laser [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 1998, **A25**( 12 ): 1069 ~ 1072 ( in Chinese )
- 3 Zhou Guoquan, Lü Zhangde, Wang Shaomin. Semiconductor laser with beam quality factor  $M^2 < 1$  [ J ]. *Opt. Comm.*, 2001, **187**( 4/6 ): 395 ~ 399
- 4 G. Zhou, Z. Lu, S. Wang. Study on the perpendicular optical beam quality of GaInP/AlGaInP strained multiple quantum well laser [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 2001, **A28**( 7 ): 583 ~ 586 ( in Chinese )
- 5 S. Wang, D. Zhao, Z. Lu *et al.*. Demonstrations for optical beam qualities of quantum well lasers [ J ]. *Opt. Comm.*, 2001, **194**( 4/6 ): 425 ~ 428
- 6 W. T. Tsang, R. A. Logan. GaAs- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ As strip buried heterostructure lasers [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**( 6 ): 451 ~ 469
- 7 M. A. Porrás. Non-paraxial vectorial moment theory of light beam propagation [ J ]. *Opt. Comm.*, 1996, **127**( 1/3 ): 79 ~ 95
- 8 Cao Qin, Deng Ximin, Guo Hong. Optical beam quality factor of nonparaxial light beams. I. Definition [ J ]. *Acta Optica Sinica* ( 光学学报 ), 1996, **16**( 9 ): 1217 ~ 1222 ( in Chinese )
- 9 Wang Shaomin, Zhao Daomu, Lü Zhangde *et al.*. Optical beam quality factors of quantum well semiconductor lasers [ J ]. *Acta Photonica Sinica* ( 光子学报 ), 2001, **30**( 4 ): 483 ~ 486 ( in Chinese )