

文章编号 : 0258-7025(2001)07-0583-04

GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器垂直于结方向上的光束质量研究*

周国泉^{1,2} 吕章德^{1,3} 王绍民¹

(¹ 浙江大学物理系 杭州 310028; ² 浙江林学院信息系 临安 311300; ³ 绍兴文理学院物理系 绍兴 312000)

摘要 用转移矩阵方法对 680 nm GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器的波导模式作了分析和计算。根据非傍轴光束传输的矢量矩理论,对该激光器垂直于结平面方向上的光束质量因子 M_{\perp}^2 进行了理论计算,结果表明 M_{\perp}^2 小于 1 和实验结果相符合。这一结果有助于认识半导体激光器垂直于结方向上光束的内在本性。

关键词 应变多量子阱激光器,光束质量,转移矩阵,波导模式

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

Study on the Perpendicular Optical Beam Quality of GaInP/AlGaInP Strained Multiple Quantum Well Laser

ZHOU Guo-quan^{1,2} LU Zhang-de^{1,3} WANG Shao-min¹

¹Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310028
²Department of Information, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300
³Department of Physics, Shaoxing College of Arts and Sciences, Shaoxing 312000

Abstract The waveguided mode of 680 nm GaInP/AlGaInP strained multiple quantum well laser is analyzed by using transfer matrix method. Based on the nonparaxial vectorial moment theory of light beam propagation, the perpendicular optical beam quality factor is shown to be far smaller than unity, which is coincided with the experimental result. This result is useful for understanding the intrinsic nature of the perpendicular semiconductor laser beam.

Key words strained multiple quantum well laser, optical beam quality, transfer matrix, waveguided mode

1 引言

自 1990 年 Siegman 教授提出用 M^2 因子统一评估傍轴光束的光束质量以来,对激光束质量的研究一直是激光学科中一个很活跃的领域。作为当前国际标准^[1],横基模高斯光束被认为是衍射极限光束,即具有最好的光束质量。近年来, M^2 因子概念从傍轴光束拓展到了非傍轴光束^[2,3]。同时,无论从理论上和实验上都实现了 M^2 小于 1。其实, $M^2 < 1$ 激光束早已在双异质结半导体激光器中存在^[4]。GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器^[5](630 ~ 680 nm)是用于光信息存储非常重要的光源。最近,我们实验演示了 650 nm GaInP/

AlGaInP 应变多量子阱(S-MQW)激光器垂直于结平面方向上的光束质量因子 M_{\perp}^2 小于 1^[6]。本文对 680 nm GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器垂直于结平面方向上的光束质量进行了理论研究。

2 激光器结构

图 1 是 680 nm GaInP/AlGaInP 压应变多量子阱激光器的结构示意图^[7]。多量子阱结构由 4 个 0.5% 压应变的 $\text{Ga}_{0.44}\text{In}_{0.56}\text{P}$ 量子阱和 5 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 $\rho = 57 \text{ nm}$ 。在上限制层上有一 GaAs 欧姆接触层,在下限制层下有一 GaAs 缓冲层和 GaAs 衬底。

* 国家自然科学基金(编号:19974038)资助项目。

收稿日期 2001-01-17;收到修改稿日期 2001-02-28

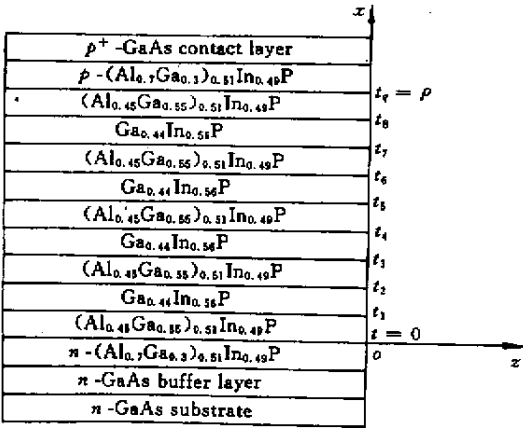


图1 GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器结构示意图
 x 轴垂直于结平面方向, t_j 为界面位置坐标;
 z 轴为光束传播方向

Fig.1 Structure of GaInP/AlGaInP S-MQW laser

The x coordinate is perpendicular to the junction plane, and t_j are the positions of the interfaces. The z coordinate is taken to be the beam propagating direction

不同层间的界面位置坐标 t_j 由下式决定

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

根据单振子折射率模型^[8],多元化合物的折射率可表示为

$$n^2 - 1 = \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - E^2} \quad (2)$$

其中 E 为光子能量。对于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{0.51-x}\text{In}_{0.49}\text{P}$, $E_0 = 3.39 + 1.216X \text{ eV}$, $E_d = 28.07 + 3.373X \text{ eV}^{[9]}$; 对于 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, $E_0 = 3.391 + 0.524X + 0.595X^2 \text{ eV}$, $E_d = 28.91 + 7.54X \text{ eV}^{[10]}$ 。

由此可得量子阱层、势垒层和限制层的折射率分别为 $n_w = 3.512$, $n_b = 3.384$ 和 $n_c = 3.304$ 。

3 波导模式

由于这里研究的是垂直于结方向上的光束质量,所以可将该激光器结构视为多层平板波导。

传播常数 K_c, K_b, K_w 定义如下

$$\begin{aligned} K_c &= k_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_c^2}; \\ K_b &= k_0 \sqrt{n_b^2 - n_{\text{eff}}^2}; \\ K_w &= k_0 \sqrt{n_w^2 - n_{\text{eff}}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为自由空间波数, n_{eff} 为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:

下限制层, 即 $x \leq 0$:

$$E_y(x) = E_0 \exp(-K_c x) \quad (4)$$

上限制层, 即 $x \geq \rho$:

$$E_y(x) = E_0 a \exp[-K_c(x - \rho)] \quad (5)$$

势垒区, 即 $t_{2l} \leq x \leq t_{2l+1}$, $l = 0, 1, 2, 3, 4$:

$$E_y(x) = E_0 \{ a_l \cos[K_b(x - t_{2l})] + b_l \sin[K_b(x - t_{2l})] \} \quad (6)$$

量子阱区, 即 $t_{2l+1} \leq x \leq t_{2l+2}$, $l = 0, 1, 2, 3$:

$$E_y(x) = E_0 \{ c_l \cos[K_w(x - t_{2l+1})] + d_l \sin[K_w(x - t_{2l+1})] \} \quad (7)$$

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 $\{a_l, b_l, c_l, d_l\}$ 和 a 以及模式有效折射率 n_{eff} 。在界面 $x = 0$ 由边界条件可得

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ K_b b_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ K_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

在界面 $x = \rho$ 处, 则有下式成立

$$a \begin{bmatrix} 1 \\ -K_c \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} a_4 \\ K_b b_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

转移矩阵 M 定义为

$$M = \begin{bmatrix} \cos(K_b d_b) & \sin(K_b d_b)/K_b \\ -K_b \sin(K_b d_b) & \cos(K_b d_b) \end{bmatrix} \quad (10)$$

在一般界面 $x = t_{2l}$, $l = 1, 2, 3, 4$, 有以下矩阵关系式

$$\begin{bmatrix} a_l \\ K_b b_l \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} c_{l-1} \\ K_w d_{l-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

转移矩阵 N 定义为

$$N = \begin{bmatrix} \cos(K_w d_w) & \sin(K_w d_w)/K_w \\ -K_w \sin(K_w d_w) & \cos(K_w d_w) \end{bmatrix} \quad (12)$$

在另一一般界面 $x = t_{2l+1}$, $l = 1, 2, 3$, 由边界连续条件可得

$$\begin{bmatrix} c_l \\ K_w d_l \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} a_l \\ K_b b_l \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(8)(11)和(13)可确定系数 $\{a_l, b_l\}$, $l = 0, 1, 2, 3, 4$:

$$\begin{bmatrix} a_l \\ K_b b_l \end{bmatrix} = (NM)^l \begin{bmatrix} 1 \\ K_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(9)和(14)给出本征值方程

$$A + K_c B + C/K_c + D = 0 \quad (15)$$

其中 A, B, C, D 是如下矩阵的矩阵元

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = M(NM)^{\dagger} \quad (16)$$

通过解本征值方程式(15),可得该激光器的模式有效折射率为 $n_{\text{eff}} = 3.314$ 。由式(9)(13)和(14)可确定系数 $\{a_l, b_l, c_l, d_l\}$ 和 a_0 。这样波导模式就可确定,该激光器只存在 TE_0 传输模。

4 垂直于结方向上的光束质量

当波导模从 GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器输出后,在自由半空间 $z \geq 0$ 的光场分布 $E_y(x, z)$ 为^[3]

$$E_y(x, z) = \frac{1}{\lambda_0} \int_{-\infty}^{+\infty} E_y(\alpha) \exp(ik_0 \gamma z) \cdot \exp(ik_0 \alpha x) d\alpha \quad (17)$$

其中

$$E_y(\alpha) = E_0 \sum_{l=0}^4 \left\{ \frac{K_b b_l + ik_0 \alpha a_l}{K_b^2 - k_0^2 \alpha^2} \exp(-ik_0 \alpha t_{2l}) + \frac{\exp(-ik_0 \alpha t_{2l+1})}{2} \left[\frac{-b_l - ia_l}{K_b - k_0 \alpha} \exp(iK_b d_b) + \frac{-b_l + ia_l}{K_b + k_0 \alpha} \exp(-iK_b d_b) \right] \right\} + E_0 \sum_{l=0}^3 \left\{ \frac{K_w d_l + ik_0 \alpha c_l}{K_w^2 - k_0^2 \alpha^2} \exp(-ik_0 \alpha t_{2l+1}) + \frac{\exp(-ik_0 \alpha t_{2l+2})}{2} \left[\frac{-d_l - ic_l}{K_w - k_0 \alpha} \exp(iK_w d_w) + \frac{-d_l + ic_l}{K_w + k_0 \alpha} \exp(-iK_w d_w) \right] \right\}$$

为激光器与空气交界面 $z = 0$ 处输出光束的角光谱, $\gamma = \sqrt{1 - \alpha^2}$ 。 $\alpha < 1$ 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。

时间平均的坡印亭矢量的 z 分量 $S_z(x, z)$

$$\text{为 } S_z(x, z) = \frac{1}{2} \text{Re}\{E_y(x, z) \times H_x^*(x, z)\} \quad (18)$$

其中 $H_x(x, z) = \frac{i}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_y(x, z)}{\partial z}$, ω 为圆频率, μ_0 为真空磁导率。

则经过任一 z 为常数的横截面的总功率 $P(z)$ 为

$$P(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_z(x, z) dx = \frac{\omega \epsilon_0}{2\pi} \int_{-1}^{+1} |E_y(\alpha)|^2 \gamma d\alpha = P(0) \quad (19)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数。

根据 ISO 标准^[1],垂直于结方向上的光束宽

度 $W_{\perp}(z)$ 由下式决定

$$W_{\perp}^2(z) = 4 \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 S_z(x, z) dx / P(0) \quad (20)$$

$$\text{其中 } \bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x S_z(x, z) dx / P(0) \quad (21)$$

以 $z = 0$ 的平面作参考面,则 $W_{\perp}(z)$ 满足如下传输规律

$$W_{\perp}^2(z) = W_{\perp}^2(0) + 2z \frac{W_{\perp}^2(0)}{R_{\perp}(0)} + z^2 \tan^2 \theta_{\perp} \quad (22)$$

其中垂直于结方向上的束腰 $W_{\perp}(0)$, 发散角 θ_{\perp} 和曲率 $1/R_{\perp}(0)$ 分别由以下三式给出^[3]

$$\frac{W_{\perp}^2(0)}{\lambda_0^2} = - \frac{\omega \epsilon_0}{2\pi^3 P(0)} \text{Re} \left\{ \int E_y(\alpha) \frac{\partial^2 E_y^*(\alpha)}{\partial \alpha^2} \gamma d\alpha \right\} \quad (23)$$

$$\tan^2 \theta_{\perp} = \frac{2\omega \epsilon_0}{\pi P(0)} \int_{-1}^{+1} |E_y(\alpha)|^2 \frac{\alpha^2}{\gamma} d\alpha \quad (24)$$

$$\frac{W_{\perp}^2(0)}{R_{\perp}(0)} = \frac{\omega \epsilon_0}{2\pi^2 P(0)} \text{Im} \left\{ \int E_y(\alpha) \frac{\partial E_y^*(\alpha)}{\partial \alpha} \alpha d\alpha \right\} \quad (25)$$

根据非傍轴光束的光束质量因子定义^[2,3], GaInP/AlGaInP 应变多量子阱激光器垂直于结方向上的光束质量因子 M_{\perp}^2

$$M_{\perp}^2 = \frac{\pi}{\lambda_0} W_{\perp}(0) \tan \theta_{\perp} \quad (26)$$

由此可得垂直于结方向上的光束质量 $M_{\perp}^2 = 0.30$, 该方向上相应的束腰和发散角分别为 $W_{\perp}(0) = 0.048 \lambda_0$ 和 $\theta_{\perp} = 63.2^\circ$ 。这一结果与实验结果相符^[5], 也与双异质结半导体激光器的理论结果类同^[4]。这是因为当波导中只存在基模时,多量子阱波导等同于一具有相同限制层、相同厚度平均折射率中央层的三层平板波导^[11]。

5 结论

本文用转移矩阵方法对 GaInP/AlGaInP 压应变多量子阱激光器的波导模式进行了分析,进而对该激光器垂直于结方向上的光束质量因子 M_{\perp}^2 进行了计算,结果表明 M_{\perp}^2 小于 1。这一结果有助于认识半导体激光器垂直于结方向上光束的内在本性。半导体激光器垂直于结方向上的光束具有优于平行于结方向上光束的传输变换性能。因此,通过非截取傍轴化变换系统后垂直于结方向上光束的第二束腰要比平行于结方向上光束的

远^[6]。

致谢 在进行本工作时,曾和赵道木副教授、黄富泉博士以及徐锦心硕士进行过有益的讨论,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 ISO/TC 172/SC 9/WG1, ISO/DIS 11146, Revision N81, 1995
- 2 Cao Qing, Deng Ximing, Guo Hong. Optical beam quality factor of nonparaxial light beams I. Definition. *Acta Optica Sinica* (光 学 学 报), 1996, **16**(9):1217 ~ 1222 (in Chinese)
- 3 M. A. Porrás. Non-paraxial vectorial moment theory of light beam propagation. *Opt. Comm.*, 1996, **27**(1/3) :79 ~ 95
- 4 G. Zhou, D. Zhao, J. Xu *et al.*. Semiconductor laser with beam quality factor $M^2 < 1$. *Opt. Comm.*, 2001, **187**(4/6) 395 ~ 399
- 5 Zhuang Wanru. Remarkably well-developing semiconductor lasers. *Chinese J. Lasers* (中 国 激 光), 1994, **A21**(5): 341 ~ 344 (in Chinese)
- 6 S. Wang, D. Zhao, Z. Lu *et al.*. Demonstrations for optical beam qualities of quantum well lasers. *Opt. Comm.*, 2001 (in press)
- 7 S. Kamiyama, T. Uenoyama, M. Manno *et al.*. Analysis of GaInP/AlGaInP compressive strained multiple quantum well laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(6): 1363 ~ 1369
- 8 S. H. Wemple, M. DiDomenico, Jr.. Behavior of the electronic dielectric constant in covalent and ionic materials. *Phys. Rev. B*, 1971, **3**(4):1338 ~ 1351
- 9 H. Tanaka, Y. Kawamura, H. Asahi. Refractive indices of $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51-x}\text{Al}_x\text{P}$ lattice matched to GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**(3) 985 ~ 986
- 10 M. A. Fromowitz. Refractive index of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$. *Solid State Commun.*, 1974, **15**(1) 59 ~ 63
- 11 W. Streifer, D. R. Scifres, R. D. Burnham. Optical analysis of multiple quantum well lasers. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(21) 3547 ~ 3548