

像散椭球高斯光束的理论分析与实验模拟*

李银妹 楼立人

操传顺

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026) (北京大学物理系, 北京 100871)

摘 要 从理论上讨论了具有简单像散特性的椭圆高斯光束的处理方法, 在实验中利用两个正交的柱透镜模拟球面双轴透镜对半导体激光器的输出光束进行变换, 得到较为理想的结果, 即把椭圆高斯光束处理为近似圆高斯光束.

关键词 半导体激光器, 柱透镜, 像散, 高斯光束变换.

1 引 言

半导体激光器作为新一代迅速发展起来的激光器件, 具有体积小、设备简单、输出稳定、波长覆盖面广等多方面的优点, 因而可以在很多领域迅速取代原来的气体或固体激光器. 但是半导体激光器的光束质量还待进一步提高. 半导体激光器输出光束的质量特点是由其自身工作条件所决定的. 以典型的双异质结构半导体激光器为例, 其发光面的尺寸大约为几十微米乘几微米, 在此尺度内的光辐射进入自由空间时, 衍射将使光束散发成一、二十度到四、五十度左右的全角^[1]. 由于半导体激光器输出光束在相互垂直的两个方向上往往有不同的发散角, 而且在这两个相互垂直的平面内其光强分布都可近似为高斯分布. 因此, 可以把半导体激光器输出光束近似为像散椭圆高斯光束. 在应用中, 为了提高半导体激光的光束质量及利用效率, 一般先要对其光束进行变换. 根据不同的应用, 对光束的变换也有不同的方法. 比如在利用半导体激光泵浦固体激光器时, Luthy 等人采用矩形光纤与半导体激光器阵列耦合, 得到较高的能量传递效率^[2~4]. 对于单光束半导体激光, Du 利用两个分步反射镜加上基本的准直和聚焦镜把非对称的光束变换为近似圆对称光^[5]; Braat 则从理论上讨论了一种环状光束变换装置对半导体激光输出光束的改善情况^[6]. 与 Braat 的工作类似, 本文尝试利用光学变换的方法, 从理论上分析利用球面双轴透镜把上述光束变换为近似圆高斯光束的可能, 并用相互正交的双柱透镜进行实验模拟, 得到了较好的结果.

2 实验原理

高斯光束由其复参数 q 唯一确定:

$$1/q = 1/R - i\lambda/\pi\omega^2 \quad (1)$$

式中 R 为光束等相面曲率半径, ω 为光束的光斑半径, λ 为高斯光束的光波长. 高斯光束通过

* 国家自然科学基金、中国科学院科研基金资助.

收稿日期: 1997-11-03; 收到修改稿日期: 1998-03-02

变换矩阵 $M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的光学系统时，其复参数 q 的变换遵守 $ABCD$ 定律：

$$q_2 = (Aq_1 - B)/(Cq_1 - D) \tag{2}$$

对于像散椭圆高斯光束，其场函数一般可写为：

$$A(x, y, z) = A_{c0}^* \left[\frac{\omega_{bx}\omega_{by}}{\omega_x\omega_y} \right]^{1/2} \exp \left[-i \frac{k}{2} (x^2/q_x + y^2/q_y) \right] \exp \left[i \frac{k}{2} \left[\arctan \frac{z}{z_{0x}} + \arctan \frac{z}{z_{0y}} \right] \right] \tag{3}$$

在 xoz 和 yoz 面上，椭圆高斯光束的复参数 $q_x(z)$ 和 $q_y(z)$ (R_x 和 R_y , ω_x 和 ω_y) 一般是不相等的，但它们是可离的，即具有简单像散的特征。而且在光束传输变换中， $q_x(z)$ 和 $q_y(z)$ 分别服从 $ABCD$ 定律，即：

$$q_{iz}(z) = (A_i q_{i1} + B_i)/(C_i q_{i1} + D_i), \quad i = x, y \tag{4}$$

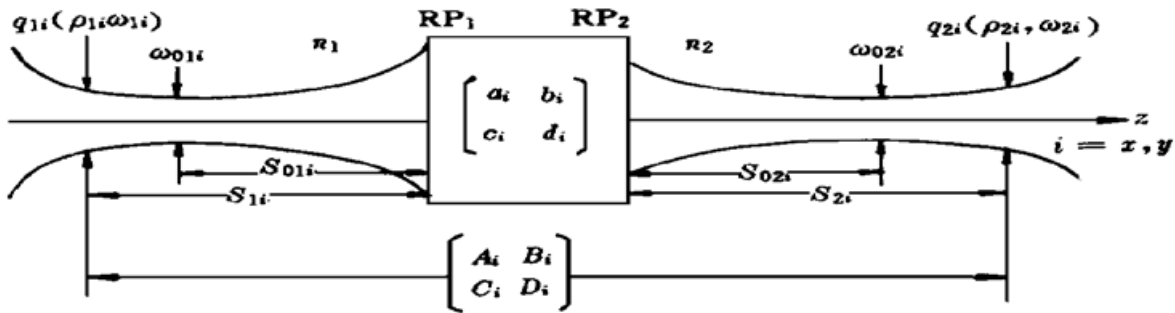


Fig. 1 The transformation of an astigmatic Gaussian beam

如图 1 所示，设折射率为 n_1 的物空间中有复参数为 q_{1i}

$$1/q_{1i} = 1/R_{1i} - i\lambda_1/\pi\omega_{1i}^2 = X_{1i} - iY_{1i} \tag{5}$$

的椭圆高斯光束，通过变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} a_x & 0 & b_x & 0 \\ 0 & a_y & 0 & b_y \\ c_x & 0 & d_x & 0 \\ 0 & c_y & 0 & d_y \end{bmatrix}$$

的非轴对称光学系统后，在折射率 n_2 的像空间中变为复参数 q_{2i} 的椭圆高斯光束，

$$1/q_{2i} = 1/R_{2i} - i\lambda_2/\pi\omega_{2i}^2 = X_{2i} - iY_{2i} \tag{6}$$

q_{2i} 与 RP_1 、 RP_2 相距分别为 S_{1i} 、 S_{2i} 。在 xoz 、 yox 面上分别使用 $ABCD$ 定律：

$$\frac{1}{q_{2i}} = \frac{C_i + D_i/q_{1i}}{A_i + B_i/q_{1i}} \tag{7}$$

式中 $\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_{2i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & S_{1i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 得到：

$$\left. \begin{aligned} X_{2i} &= \frac{(X_{1i}^2 + Y_{1i}^2)B_iD_i + X_{1i}(A_iB_i + B_iC_i) + A_iC_i}{A_i^2 + 2X_{1i}A_iB_i + (X_{1i}^2 + Y_{1i}^2)B_i^2} \\ Y_{2i} &= \frac{n_1Y_{1i}/n_2}{A_i^2 + 2X_{1i}A_iB_i + (X_{1i}^2 + Y_{1i}^2)B_i^2} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

对束腰间的变换 $X_{1i} = 0$, $X_{2i} = 0$ 。(8)式简化为：

$$\begin{aligned} Y_{01i}^2 B_i D_i + A_i C_i &= 0 \\ Y_{02i} &= \frac{n_1 Y_{01i} / n_2}{A_i^2 + B_i^2 Y_{01i}} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\text{式中} \quad Y_{01i} = \lambda_1 / \pi \omega_{01i}^2 = iq_{01i}^{-1}, \quad Y_{02i} = \lambda_2 / \pi \omega_{02i}^2 = iq_{02i}^{-1} \quad (10)$$

以球面双轴透镜为例. 球面双轴透镜可以看作由两个紧贴在一起的正交柱面薄透镜构成, 考虑 $n_1 = n_2 = 1$, 它在 xoz 和 $yozi$ 面上的变换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_i & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 f_i 为薄透镜的焦距. (11) 式代入 (9) 式, 得到束腰间的变换公式:

$$S_{02i} = f_i + \frac{(S_{01i} - f_i)f_i^2}{(S_{01i} - f_i)^2 + Z_{01i}^2} \quad (12)$$

$$\omega_{02i} = \frac{\omega_{01i}|f_i|}{[(S_{01i} - f_i)^2 + Z_{01i}^2]^{1/2}} \quad (13)$$

其中 $Z_{01i} = \pi \omega_{01i}^2 / \lambda$ 为瑞利长度.

根据高斯光束的性质, 束腰半径和束腰位置唯一地决定一束高斯光的各个参数. 而由 (12) 式可知, 对于像散椭圆高斯光束, 虽然在 xoz 和 $yozi$ 面上的束腰大小和位置并不相同, 即 $\omega_{01x} \neq \omega_{01y}$, $S_{01x} \neq S_{01y}$, 但通过选择适当的参数 f_i 、 S_{01i} , 是能够通过球面双轴透镜的变换使 $S_{02x} = S_{02y}$, $\omega_{02x} = \omega_{02y}$ 的, 即实现把像散椭圆高斯光束变换为圆高斯光的目的.

3 实验方法

实验中所使用的半导体激光器是由中科院北京半导体所研制的, 其输出单模激光波长为 980 nm, 功率为 60 mW. 输出光束在 xoz 和 $yozi$ 平面内的远场发散角分别为 35° 和 10° . 用红外上转换片观察输出光斑, 在距离激光输出端面分别为 2.5 mm、6.8 mm、13.0 mm、24.5 mm 处得到的激光光斑分别对应图 2 中的 (a), (b), (c), (d).

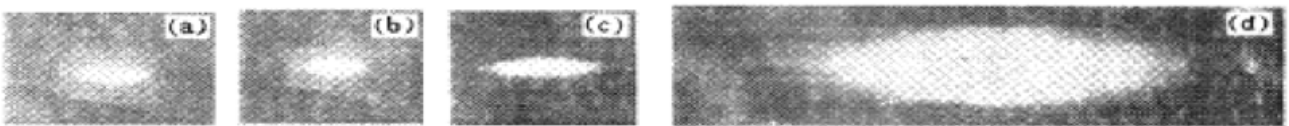


Fig. 2 The output beam pattern of semiconductor laser at different distances

使用 $f = 7.7$ mm, 15.4 mm, 39.0 mm, 58.3 mm 4 种焦距的柱透镜对半导体激光器输出光束进行变换. 先考虑单个柱透镜对光束在某一平面内 (xoz 平面或 $yozi$ 平面) 的性质进行变换, 实验光路如图 3 所示. 测量由 S_{01i} 的变化所引起的对应 S_{02i} 的改变. 另一方面, 由 (12) 式

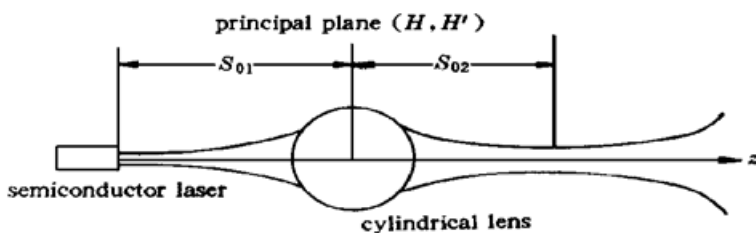


Fig. 3 The beam transformation of semiconductor laser with cylindrical lens

可以得到 S_{02i} 相对于 S_{01i} 变化的关系曲线. 而且由公式还可以看出, 由于入射光的束腰半径一般在微米量级 (这可由其发散角大致推算得到), 则 Z_{01i}^2 约在 10^{-2} mm² 量级. 当选取的 S_{01i} 满足 $|S_{01i} - f_i| > 0.5$ mm 时, 就有 $(S_{01i} - f_i)^2 \gg Z_{01i}^2$. 这时基本上可以不考虑 Z_{01i}^2 的

影响, 即对同一 f , $S_{02x} - S_{01x}$ 及 $S_{02y} - S_{01y}$ 的曲线近似是重合的, 可以不考虑 xoz 和 $yozi$ 面的差别. 对于激光束束腰半径之间的变换, 由于缺少有效的实验手段, 虽然没有测量微米级的腰

斑大小,但并不影响本研究结果.

4 结果分析

把由实验测得的数据及由(12)式得到的理论曲线放到同一坐标下进行比较,得到如图4中所示的四种情况.

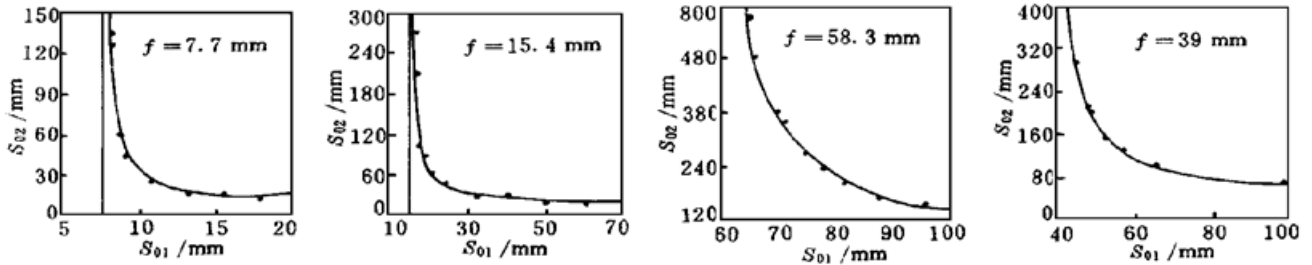


Fig. 4 The relationship between cylindrical lens position and waist position

图中圆点为实验测得的数据,曲线为(12)式计算所得.可以看到,在四种情况下,理论和实验的结果都是非常吻合的.

当用两个柱透镜分别在相互垂直的两个平面内同时对半导体输出激光进行变换时,通过调整两个柱透镜的焦距及位置,很容易得到如图5所示的变换后的激光光斑.

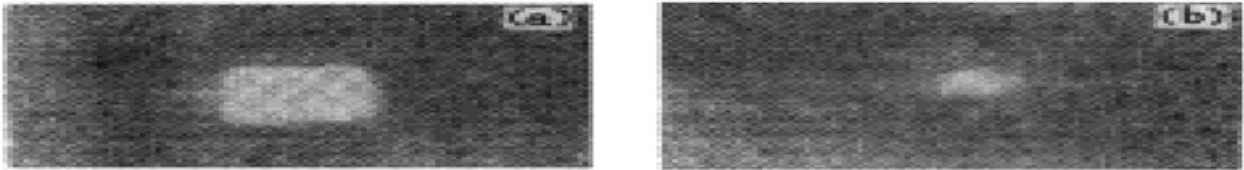


Fig. 5 The beam pattern of the semiconductor laser transformed by two cylindrical lenses

显然,由于使用两个相互垂直的柱透镜来模拟球面双轴透镜的情况,得到的光斑并不是一个圆斑而是正方形[非束腰位置测得,如图5(a)所示],但已明显地改变了 xoz 和 $yo z$ 平面内光束发散角显著不同的状况,基本达到了消像散的目的.图5(b)中,在束腰附近,测得光斑已渐趋于均匀的圆形.如果在实际实验中使用较精确的球面双轴透镜,将会得到更好的结果.

结 论 实验中利用柱透镜模拟球面双轴透镜对具有典型像散椭圆高斯光束性质的半导体激光器输出光束进行变换,基本上实现了对光束的消像散,改善了光束质量,并且与理论结果吻合很好.此方法简单易实现,可用于一般实验研究,本实验结果对利用球面双轴透镜进一步对半导体激光器输出光束进行精确的质量调整提供了可靠的实验依据,可以通过改善半导体激光器输出光束质量,有利于半导体激光器的推广应用.

参 考 文 献

- [1] Tompson G H. 半导体激光器件物理学,北京:电子工业出版社,1989.
- [2] Kasinski J J, Burnham R L. Near-diffraction-limited laser beam shaping with diamond-turned aspheric optics. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(14): 1062~ 1064
- [3] Luthy W, Weber H P. Diode-pumped IR solid-state lasers. *Infrared Phys. Technol.*, 1995, **36**(1): 267~ 272

- [4] Ehbets P, Herzig H P, D ndliker. *J. Modern Opt.*, 1993, **40**(4) : 637~ 645
- [5] Du K, Liao Y, Loosen P. Nd-YAG slab laser end-pumped by laser-diode stacks and its beam shaping. *Opt. Commun.*, 1997, **140**(1~ 3) : 53~ 56
- [6] Braat J. Design of beam-shaping optics. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(15) : 2665~ 2670
- [7] 吕百达. 激光光学: 激光束的传输变换和光束质量控制. 成都: 四川大学出版社, 1992.

The Theoretical Analysis and Experimental Simulation of Astigmatic Elliptic Gaussian Beam

Li Yinmei Lou Liren

(*Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Cao Chuanshun

(*Department of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

(Received 3 November 1997; revised 2 March 1998)

Abstract A method for dealing with a kind of elliptical Gaussian beam which has simple astigmatic character is discussed, and two across cylindrical lens are used to imitate a spherical biaxial lens on transforming the beam from a semiconductor laser. A fairly perfect result is obtained that elliptical Gaussian beam is transformed into an approximately similar circular Gaussian beam.

Key words semiconductor laser, cylindrical lens, astigmatism, Gaussian beam transformation.