

文章编号: 0253-2239(2006)06-0851-3

# 半导体激光器远轴光束的准直特性研究\*

董洪舟 石顺祥 李家立 陈守满

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

**摘要:** 对半导体激光器光束准直场的研究具有重要的意义, 半导体激光器的远轴模型能精确描述其发出的光束。根据瑞利-索末菲衍射公式, 利用稳相法得出了半导体激光器远轴光束经过透镜准直后的场分布解析表达式。根据该表达式可以得出如下结论: 准直后光束在两个方向上的光斑大小与透镜焦距成正比, 且与传输距离无关, 沿轴光强与波导尺寸参量和准直透镜焦距有关, 且与透镜焦距成平方反比关系, 在传输距离较短的情况下, 准直光场相位分布近似为球面, 传输距离较长时, 光场相位近似为平面。这些结论在工程应用中具有重要的价值。

**关键词:** 半导体激光; 稳相法; 瑞利-索末菲衍射; 准直

中图分类号: TN256 文献标识码: A

## Study on Collimation Properties of Semiconductor Laser off-Axis Beams

Dong Hongzhou Shi Shunxiang Li Jiali Chen Shouman

(School of Technical Physics, Xidian University, Xian 710071)

**Abstract:** The study on collimation properties of semiconductor laser beams is valuable and the off-axis model can characterize accurately the output beams of semiconductor laser. Based on Rayleigh-Sommerfeld diffraction formula, the analytical expression of the collimation field of semiconductor laser off-axis beams is derived by the method of stationary phase. According to the expression, it is found that the spot size of collimation beams in two directions is not correlative with transmission distance but proportional to the focal length of lens. On-axis intensity is inversely proportional to the square of the focal length and related to the parameters of optical waveguides. The phase distribution of collimation field is nearly spherical for a short transmission distance, while for a long transmission distance the phase distribution is close to a plane. These results are important in engineering applications.

**Key words:** semiconductor laser; method of stationary phase; Rayleigh-Sommerfeld diffraction; collimation

## 1 引言

半导体激光器是一种重要光源, 其输出光束在工程中的应用被广泛地加以研究<sup>[1~4]</sup>。由于有源层的特殊结构, 半导体激光器输出的光束可达到  $10^\circ \times 30^\circ$  的发散角, 实际应用中因为接收点光功率密度的大小差不多是按光束发散角平方反比率关系迅速变化的, 所以需要半导体激光束进行准直以便于工程应用, 因此半导体光束准直后的特性研究就变得很重要了。

半导体激光器的输出光束可以用其远轴模型精确描述<sup>[5]</sup>, 这已经通过实验验证, 但对该远轴模型经过光学系统传输变换的研究很少。稳相法是一种比较理想的渐进方法, 它被广泛用于分析光学中的衍

射问题<sup>[6~9]</sup>。本文根据瑞利-索末菲衍射公式, 利用稳相法得出了半导体激光束远轴模型准直场的解析结果, 利用该结果分析了两个方向上光斑和沿轴光强特性, 以及相位分布情况。

## 2 透镜对半导体激光束的准直

### 2.1 半导体激光远轴模型

根据文献[5], 半导体激光的远轴模型为

$$E_1(x, y, z) = A \frac{z}{r} \frac{\exp(ikr)}{r} \frac{Dr^2}{Dr^2 + x^2} \exp\left(-\frac{y^2}{Gr^2}\right), \quad (1)$$

它是激光二极管端面为坐标原点, 其中  $z$  对应图 1 中的  $os$ , 而  $x, y$  是横向坐标, 且  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ,

\* 国家自然科学基金(60277006)资助课题。

作者简介: 董洪舟(1978~), 男, 四川广元人, 西安电子科技大学博士研究生, 主要从事激光束传输变换的研究。

E-mail: dhz2001@tom.com

收稿日期: 2005-07-18; 收到修改稿日期: 2005-11-10

$A = 2u_0 ip \sqrt{\pi/q/\lambda}$ ,  $D = p^2/k^2$ ,  $C = q^2/k^2$ ,  $u_0$  为常量,  $p, q$  是与激光二极管波导结构有关的常量, 可以由实验确定。

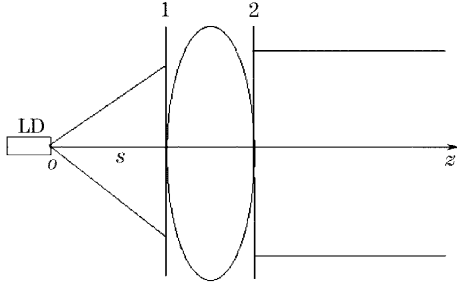


图 1 半导体激光束准直示意图

Fig. 1 Scheme of collimation of semiconductor laser beams

## 2.2 光波在准直透镜出射面的场分布

对半导体激光束进行准直和聚焦时,所选用的

透镜一般都是球差、彗差都经过精确修整的优良透镜,这种透镜可以看作是空间相位变换器,可以将透镜后焦点处发出的点源球面相位变换为平面相位,而振幅能无失真地传输。假设半导体激光器的发光面位于透镜的后焦点,则经过透镜变换后(即图 1 中 2 面处)的光场可表示为

$$E_2(x, y) = A \frac{f}{r^2} \frac{Dr^2}{Dr^2 + x^2} \exp\left(-\frac{y^2}{Cr^2}\right), \quad (2)$$

其中  $f$  为透镜的焦距,此时  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}$ 。

## 3 光波瑞利-索末菲衍射后的解析场分布

### 3.1 瑞利-索末菲衍射公式

用瑞利索末菲衍射公式来分析(2)式光场的传输情况。亥姆霍兹方程在  $z > 0$  半空间的解为

$$E(x, y, z) = \frac{-1}{2\pi} \iint_s E(x_0, y_0, 0) \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\exp(ikR)}{R} \right] dx_0 dy_0, \quad (3)$$

(3) 式即为瑞利-索末菲衍射公式,其中  $R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}$ , 积分在源平面  $x_0, y_0$  上进行,此平面处  $z = 0$ 。将  $R$  展开为泰勒级数,仅保留第一和第二项,有

$$R \approx \rho + (x_0^2 + y_0^2 - 2xx_0 - 2yy_0)/(2\rho), \quad (4)$$

其中  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , (3) 式中指数项中的  $R$  用(4)式代替,其余用  $\rho$  代替得到

$$E(x, y, z) = \frac{-iz}{\lambda\rho} \frac{\exp(ik\rho)}{\rho} \iint_s E_2(x, y) \exp\left[ ik \frac{x_0^2 + y_0^2 - 2x_0x - 2y_0y}{2\rho} \right] dx_0 dy_0, \quad (5)$$

将(2)式代入(5)式后不能直接积分出解析的表达式,只能进行数值计算,因此要分析衍射后直观的光场情况是不容易的。

### 3.2 稳相法分析

由于  $k$  很大 ( $10^4 \text{ mm}^{-1}$ ), (5) 式积分号中相位因子会剧烈震荡,震荡的结果是各积分点的积分贡献相互抵消,最后只有一个或几个积分点贡献最大,这些积分点称为稳相点。令(5)式中积分域为无穷大,即不考虑透镜孔径对光束的限制,此时根据文献[10]中(3.3-41)式有

$$F(k) = \iint_D f(x, y) \exp[ikg(x, y)] dx dy \approx \frac{2\pi i \sigma}{k \sqrt{|\Delta|}} f(x_1, y_1) \exp[ikg(x_1, y_1)],$$

式中  $F(k)$  为衍射场,  $f(x, y)$  为源场,  $\Delta = \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y}$ ,  $\sigma$  为与  $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}$ ,  $\frac{\partial^2 g}{\partial y^2}$  和  $\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y}$  有关的常量,  $x_1, y_1$  为第一类稳相点。(5) 式中令  $g(x, y) = (x_0^2 + y_0^2 - 2x_0x - 2y_0y)/(2\rho)$ , 则由

$$\frac{\partial g}{\partial x_0} = \frac{x_0 - x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = 0, \quad \frac{\partial g}{\partial y_0} = \frac{y - y_0}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = 0,$$

得到唯一稳相点为  $x_0 = x$  和  $y_0 = y$ 。且  $\frac{\partial^2 g}{\partial x_0^2} = \frac{\partial^2 g}{\partial y_0^2} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$ ,  $\frac{\partial^2 g}{\partial x_0 \partial y_0} = 0$ , 将稳相点代入(5)式得到

$$E(x, y, z) = \frac{zADf}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \frac{1}{D(x^2 + y^2 + f^2) + x^2} \exp\left[\frac{-y^2}{C(x^2 + y^2 + f^2)}\right] \exp\left[ik\left(\frac{x^2 + y^2 + 2z^2}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right)\right], \quad (6)$$

由(6)式得到光强表达式为

$$I(x, y, z) = \frac{(z|A|Df)^2}{(x^2 + y^2 + z^2)} \left[ \frac{1}{D(x^2 + y^2 + f^2) + x^2} \right]^2 \exp\left[\frac{-2y^2}{C(x^2 + y^2 + f^2)}\right]. \quad (7)$$

## 4 准直光束特性分析

利用解析光强公式(7)就可以对准直后光束的各项光学特性进行分析,可以得出概念直观的结论,现分析如下。

### 4.1 光斑尺寸

因为是非对称光波,所以分别考虑  $x, y$  两个方向的光斑尺寸。利用  $I(x, 0, z) = I(0, 0, z)/2$  在  $x$  方向可以得到:

$$(x_m^2 + z^2)[D(x_m^2 + f^2) + x_m^2]^2 = 2z^2 D^2 f^4, \quad (8)$$

同理在  $y$  方向可以得到

$$\frac{2z^2 f^4}{y_m^2 + z^2} \frac{1}{(y_m^2 + f^2)^2} \exp\left[\frac{-2y_m^2}{(y_m^2 + f^2)C}\right] = 1, \quad (9)$$

式中求解出  $x_m, y_m$  即为两个方向上的光斑尺寸。当考查离透镜较远处的光场时,有  $x_m^2 + z^2 \approx z^2$  和  $y_m^2 + z^2 \approx z^2$ , 则(8)式和(9)式变为

$$\begin{cases} [D(x_m^2 + f^2) + x_m^2]^2 = 2D^2 f^4, & (10) \\ \frac{2f^4}{(y_m^2 + f^2)^2} \exp\left[\frac{-2y_m^2}{(y_m^2 + f^2)C}\right] = 1, & (11) \end{cases}$$

由(10)式解得

$$x_m = \sqrt{\frac{(\sqrt{2}-1)D}{D+1}} f, \quad (12)$$

由(12)式可以知道,  $x_m$  仅与参量  $D$  和  $f$  有关,与  $f$  成正比关系。而(11)式虽然是个超越方程,但不难证明它关于  $y_m/f$  有唯一解,设为  $t_0$ 。从而有

$$y_m = t_0 f, \quad (13)$$

因此  $y$  方向光斑尺寸也与传输距离无关。

### 4.2 沿轴光强

令  $x = y = 0$ , 由(7)式可得到轴上光强为

$$I(0, 0, z) = |A|^2 / f^2,$$

可以知,沿轴方向光强与传输距离无关,由于  $|A| = \left| u_0 \frac{2i}{\lambda p} \sqrt{\frac{\pi}{q}} \right|$ , 可以知道沿轴光强仅与半导体激光器波导结构的源尺寸参量和焦距有关,若要得到较大的沿轴光强可以用较小焦距的透镜来实现。

### 4.3 相位分布

由(6)式可以得到相位函数为

$$h(x, y, z) = k \frac{x^2 + y^2 + 2z^2}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}},$$

由此函数可以知,在两个方向上具有相同的相位分布,在考虑离透镜出射面很近的情况下,即  $z$  很小时,有  $h(x, y, z) \approx k \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , 可知此时等相位面为球面。而当  $z$  远大于  $x, y$  时,  $h$  近似为常量,此时相位分布近似为平面。

## 5 结 论

根据瑞利-索末菲衍射公式,利用稳相法得出了半导体激光的远轴模型经过透镜准直后的场分布解析表达式,分析可得,经过透镜准直后,在两个方向上的光斑大小基本不变,且与透镜焦距成正比关系,轴上光强为与波导尺寸结构参量和准直透镜焦距有关的常量,其相位分布在传输距离较大时近似为平面分布。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Hongzhan, Liu Liren, Xu Rongwei *et al.*. Application of optical matrix in semiconductor laser coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 825~828 (in Chinese)  
刘宏展,刘立人,徐荣伟等. 矩阵理论在半导体激光器耦合中的应用[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 825~828
- 2 Liu Hongzhan, Liu Liren, Xu Rongwei *et al.*. Measuring near the diffraction limited wavefront of semiconductor laser beam[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(4): 519~522 (in Chinese)  
刘宏展,刘立人,徐荣伟等. 近衍射极限半导体激光束波面检测[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 519~522
- 3 Gao Mingwei, Gao Chunqing, He Xiaoyan *et al.*. Study of twisted beam symmetrization from laser diode bar[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(5): 604~608 (in Chinese)  
高明伟,高春清,何晓燕等. 半导体激光器线阵光束扭转对称化的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 604~608
- 4 Liang Yiping, Dai Teli. Improving on the collimating performance of cylindrical lens to the beam of laser diode bar[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1305~1311 (in Chinese)  
梁一平,戴特力. 圆柱透镜对半导体激光束准直性能的改进[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1305~1311
- 5 Zeng Xiaodong, Mu Meili. Far-field properties of diode laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8): 1086~1088 (in Chinese)  
曾小东,穆美丽. 半导体激光器光束远场特性研究[J]. *光学学报*, 1997, **17**(8): 1086~1088
- 6 Chen Hui, Wu Zhensen, Bai Lu. Research on the coherent scattering of Gaussian beam from arbitrarily shaped convex object with rough surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 115~120 (in Chinese)  
陈辉,吴振森,白璐. 任意形状凸粗糙物体高斯光束相干散射研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 115~120
- 7 Kailiang Duan, Baida Lü. Nonparaxial analysis of far-field properties of Gaussian beams diffracted at a circular aperture[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(13): 1474~1480
- 8 Zhao Bin, Li Zhu. The focus diffraction property of axicon illuminated by inclined plane wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(3): 299~305 (in Chinese)  
赵斌,李柱. 同轴共轭透镜对斜入射平行光的聚焦衍射特性[J]. *光学学报*, 1999, **19**(3): 299~305
- 9 Xu Chao, Zhang Jinguan, Chen Junben. A phase-only optical system for wavefront transformation of rotational symmetric beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 1993, **8**(42): 1245~1251 (in Chinese)  
许超,张静娟,陈俊本. 用于圆对称光束波前变换的相位型光学系统[J]. *物理学报*, 1993, **42**(8): 1245~1251
- 10 L. Mandel, E. Wolf. *Optical Coherence and Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 136