

文章编号: 1001-3806(2004)06-0661-03

半导体激光器远场光强特性分析

薛灏, 张全, 李鹏

(浙江大学 光电系 光电子所, 杭州 310027)

摘要: 利用傅里叶变换及坐标变换的方法推导了处于空间任意位置的半导体激光器远场模场表达式, 在此基础上对半导体激光器相对于原点发生平移及转动情况下的远场光强分布进行了分析。为半导体激光器的发散角、功率分布等参数的测试提供了理论基础。

关键词: 远场; 模场; 分布; 坐标变换

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

The analysis of far-field light intensity characteristic of laser diode

XUE Hao, ZHANG Quan, LI Peng

(Institute of Photonics, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The expression of the far-field light intensity of LD (laser diode) at any spatial location is deduced with Fourier transformation and conversion of coordinates. On this basis, the far-field light intensity distribution is analyzed while the posture of LD relative to origin O has rotated or translated. The theoretical basis has been provided for the testing of parameters like disperse angle and distribution of light intensity etc. of LD.

Key words: far-field; mode; distribution; conversion of coordinates

引言

在半导体激光器同光纤的耦合中, 无论是直接耦合, 还是光纤透镜^[1]、球形透镜光纤^[2,3]及柱形透镜光纤^[4]等间接耦合方式, 判断该方式是否优越的主要标准是耦合效率和失准容忍度。上述两个关键指标同半导体激光器的功率及发散角直接相关, 而由于生产工艺等原因造成不同半导体激光器个体的功率及发散角不尽相同, 生产厂商给出的只能是一个典型值, 用典型值来进行参数估算, 必然造成结果的不准确性。因此, 对半导体激光器个体的功率及发散角在远场的分布情况进行测试就是一项十分必要的工作。目前常用的测试手段为: 将光电探测器安装在长度为 R 的可旋转臂上, 用此旋转臂带动探测器在半导体激光器远场中扫描, 并从扫描结果判断半导体激光器的光场特性。作者的目的是通过对半导体激光器远场光强在特定情况下的特性分析, 为测试工作建立理论模型。

作者简介: 薛灏(1975-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤耦合方面的研究工作。

E-mail: 911@zjip.com

收稿日期: 2003-11-11; 收到修改稿日期: 2003-12-24

1 理论模型

1.1 半导体激光器远场光束模场表达式

假设从半导体激光器发出的光束为高斯光束, 且束腰位于半导体激光器端面, 如图1所示, 设 x, y

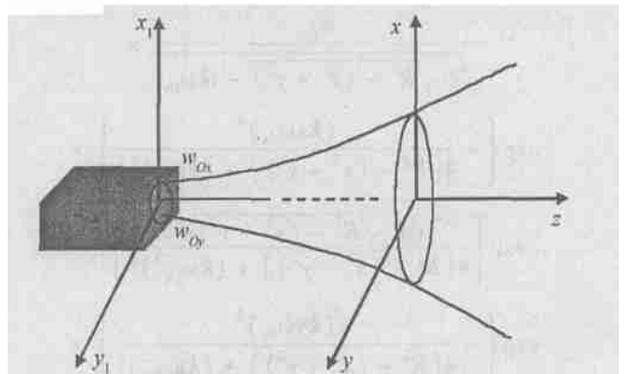


Fig. 1 Schematic illustration of laser beam emitting from LD

方向上的光斑半径分别为 w_{0x}, w_{0y} , 从半导体激光器端面所发出的光可以写成:

$$E_0(x_1, y_1) = \exp\left[-\frac{x_1^2}{w_{0x}^2} - \frac{y_1^2}{w_{0y}^2}\right] \quad (1)$$

光束在空气中沿 z 轴传播, 根据菲涅耳衍射及夫琅和费定理, 可得到光线沿 z 轴传播的表达式:

$$E(x, y, z) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x_1, y_1) \times \exp\left\{ \frac{ik}{2z} [(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2] \right\} dx_1 dy_1 \quad (2)$$

式中, λ 为半导体激光器波长, k 为波矢量, x 和 y 是离激光器端面距离为 z 的 xy 平面中的坐标, 如图 1 所示。将(1)式代入(2)式中并对(2)式进行傅里叶变换可得:

$$E(x, y, z) = -i \exp(ikz) \frac{w_{0x} w_{0y}}{\sqrt{2z - ikw_{0x}^2} \sqrt{2z - ikw_{0y}^2}} \times \exp\left[-\frac{(kxw_{0x})^2}{4z^2 + (kw_{0x})^2} \right] \exp\left[\frac{i2kzx^2}{4z^2 + (kw_{0x})^2} \right] \times \exp\left[-\frac{(kyw_{0y})^2}{4z^2 + (kw_{0y})^2} \right] \exp\left[\frac{i2kzy^2}{4z^2 + (kw_{0y})^2} \right] \quad (3)$$

1.2 半导体激光器远场光束模场在球面及圆弧上的表达式

圆心位于原点 O , 半径为 R 的球面方程为: $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$, 由于光束沿 z 轴正向前进, 所以上述方程可改写为:

$$z = \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} \quad (4)$$

将(3)式、(4)式联立, 便可得到半导体激光器远场模场在球面上的表达式:

$$E(x, y, z) = -i \exp[ik \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)}] \times \frac{w_{0x}}{\sqrt{2 \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} - ikw_{0x}^2}} \times \frac{w_{0y}}{\sqrt{2 \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} - ikw_{0y}^2}} \times \exp\left\{ -\frac{(kw_{0x})^2}{4[R^2 - (x^2 + y^2)] + (kw_{0x})^2} \right\} \times \exp\left\{ \frac{i2k \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} x^2}{4[R^2 - (x^2 + y^2)] + (kw_{0x})^2} \right\} \times \exp\left\{ -\frac{(kw_{0y})^2}{4[R^2 - (x^2 + y^2)] + (kw_{0y})^2} \right\} \times \exp\left\{ \frac{i2k \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} y^2}{4[R^2 - (x^2 + y^2)] + (kw_{0y})^2} \right\} \quad (5)$$

在实际测试中, 关心的是以 O 点为圆心, 以 z 为半径, 在 x_1Oz 上:

$$x^2 + z^2 = R^2 \quad (y = 0) \quad (6)$$

及 y_1Oz 上:

$$y^2 + z^2 = R^2 \quad (x = 0) \quad (7)$$

上的光场特性, 将(6)式、(7)式同(3)式联立的结果如下:

$$E(x, z) = -i \exp(ik \sqrt{R^2 - x^2}) \times \frac{w_{0x} w_{0y}}{\sqrt{2 \sqrt{R^2 - x^2} - ikw_{0x}^2} \sqrt{2 \sqrt{R^2 - x^2} - ikw_{0y}^2}} \times \exp\left[\frac{i2k \sqrt{R^2 - x^2} x^2}{4(R^2 - x^2) + (kw_{0x})^2} \right] \times \exp\left[-\frac{(kxw_{0x})^2}{4(R^2 - x^2) + (kw_{0x})^2} \right] \quad (x \leq R) \quad (8)$$

及

$$E(y, z) = -i \exp(ik \sqrt{R^2 - y^2}) \times \frac{w_{0x} w_{0y}}{2 \sqrt{R^2 - y^2} - ikw_{0x}^2} \sqrt{2 \sqrt{R^2 - y^2} - ikw_{0y}^2} \times \exp\left[\frac{i2k \sqrt{R^2 - y^2} y^2}{4(R^2 - y^2) + (kw_{0y})^2} \right] \times \exp\left[-\frac{(kyw_{0y})^2}{4(R^2 - y^2) + (kw_{0y})^2} \right] \quad (y \leq R) \quad (9)$$

1.3 半导体激光器发生偏移后的情况

1.2 节中的结论建立在激光器在空间中姿态端正的基础上, 实际上, 激光器的姿态相对图 1 中的原点 O 会发生平动及转动, 在此情况下, 利用坐标变换原理及相应的几何关系可知, 将(3)式右边的 x, y, z 分别用(10)式中相应的表达替换即可:

$$\begin{cases} x = (x - a) \cos \beta \cos \gamma + \\ (y - b) \sqrt{\sin^2 \beta \sin^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \gamma} + \\ (z - c) \sin \beta \cos \alpha \\ y = (x - a) \sin \gamma \cos \beta + (y - b) \cos \gamma \cos \alpha + \\ (z - c) \sqrt{\sin^2 \lambda \sin^2 \beta + \cos^2 \gamma \sin^2 \alpha} \\ z = (x - a) \sqrt{\sin^2 \alpha \sin^2 \gamma + \cos^2 \alpha \sin^2 \beta} + \\ (y - b) \sin \alpha \cos \gamma + (z - c) \cos \alpha \cos \beta \end{cases} \quad (10)$$

式中, a, b, c 是偏移后的半导体激光器端面在原坐标系下的坐标, α, β, γ 是半导体激光器绕 x, y, z 轴旋转的角度。

将用(10)式坐标变换后的(3)式同(5)式、(6)式、(7)式 3 式联立, 便得到相应的远场模场分布情况。

若要求得特定曲面或曲线上的远场模场分布, 只需将特定曲面或曲线的方程同半导体激光器远场模场表达式联立即可。

2 分析

利用 1.3 节中的结果, 以耦合中常用的 980nm

半导体激光器为例,若 $w_{Ox} = 1\mu\text{m}$, $w_{Oy} = 3\mu\text{m}$, $z = 0.2\text{m}$, $R = 0.2\text{m}$, 设半导体激光器发出的光强为 1, 取 $I(x, y, z) = (|E(x, y, z)|)^2$, 则当 a, b, c 及 α, β, γ 取不同值时, $I(x, y, z)$ 在圆弧 $x^2 + z^2 = R^2 (y = 0)$ 及 $y^2 + z^2 = R^2 (x = 0)$ 的分布如图 2 所示, 实线描

述的为 $x^2 + z^2 = R^2 (y = 0)$ 上的分布情况, 也即 $I(x, z)$; 虚线描述的是 $y^2 + z^2 = R^2 (x = 0)$ 上的分布情况, 也即 $I(y, z)$ 。需要说明的是: 为了图形的便于识别, 纵坐标方向放大了 10^{30} 倍。

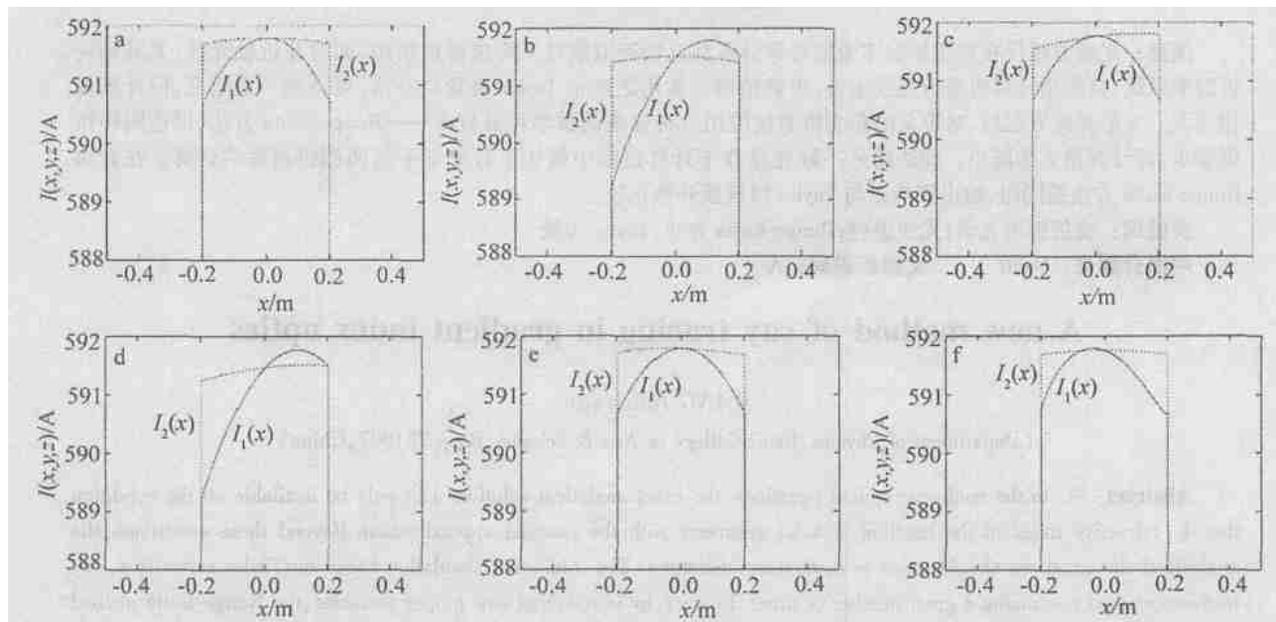


Fig. 2 The light intensity distribution on circular arc with different offset of LD

a— $a=b=c=0, \alpha=\beta=\gamma=0$ b— $a=0.1\text{m}, b=c=0, \alpha=\beta=\gamma=0$ c— $b=0.1\text{m}, a=c=0, \alpha=\beta=\gamma=0$ d— $a=b=0.1\text{m}, c=0, \alpha=\beta=\gamma=0$ e— $a=b=c=0, \beta=\gamma=0, \alpha=10^\circ$ f— $a=b=c=0, \alpha=\gamma=0, \beta=10^\circ$

从上图中可以看到: (1) 当半导体激光器没有发生位移及转动的时候, $I(x, z)$ 及 $I(y, z)$ 具有相同的最大值且两者是偶函数; (2) 当半导体激光器沿 x 平移 a , 沿 y 平移 b 时, $I(x, z)$ 的极大值不等于 $I(y, z)$ 的极大值, $I(x, z)$ 变成关于 $x = a$ 对称, $I(y, z)$ 关于 $y = b$ 对称; (3) 当半导体激光器以 Ox 为轴旋转 α 角度时, $I(x, z)$ 是偶函数, $I(y, z)$ 不是一个关于 $y = 0$ 对称的函数, 但 $I(y, z)$ 关于旋转角 α 对称, $I(x, z)$ 和 $I(y, z)$ 的极值不等; (4) 当半导体激光器以 Oy 为轴旋转 β 角时, $I(y, z)$ 为偶函数, $I(x, z)$ 关于旋转角 β 对称, $I(x, z)$ 和 $I(y, z)$ 的极值不等。限于篇幅, 其它情况下的光强分布图在本文中不再给出。

3 结 论

从理论上对半导体激光器远场模场特性进行了

分析, 建立了半导体激光器处于空间任一位置下的远场模场表达式, 并描述了远场模场在球面及圆弧上的分布情况。基于本文中的模型及结论, 在实际工作中为测试半导体激光器的具体工作状态及特性参数提供了理论基础。

参 考 文 献

- [1] 韦朝晏, 查开德, 王新宏 *et al.* 尖锥端光纤和半导体激光器的耦合 [J]. 中国激光, 1998, 25(1): 46~50.
- [2] 李宝红, 刘雪峰, 黄德修 *et al.* 锥形光纤透镜耦合特性 [J]. 半导体光电, 1996, 17(2): 121~125.
- [3] WEI Ch J, ZHAO KD. The high coupling efficiency for DFB laser-to-fiber [J]. SPIE, 1996, 2895: 340~344.
- [4] VIRENDRA S S, LYN C, RICHARD S V. Efficient power coupling from 980nm broad area laser to a single mode fiber using a wedging shaped fiber endface [J]. J Lightwave Technol, 1990, 18(9): 1313~1318.