

文章编号: 0253-2239(2005)05-619-4

大功率激光二极管双峰结构远场分布模型*

王 强 曾晓东 安毓英

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

摘要: 为了合理地设计光学系统以整形激光二极管出射光束, 必须准确了解激光二极管的远场分布, 然而对于大功率激光二极管仍没有形式简单并且较好反映实际器件特性的光束模型。基于亥姆霍兹方程的严格远场解, 提出使用两个离心高斯光束描述场源处平行结平面方向的模式场分布, 将其代入严格远场解中得到一种描述大功率激光二极管远场光分布模型, 用于描述其双峰远场结构。理论模型与三种实际器件的测量数据进行了比较, 曲线主要部分都能很好吻合, 并且偏差部分的能量仅占总能量的 1%~2%。该模型数学表达形式简单, 可以方便地用于研究光束经光学系统后的变换, 以及计算光学系统的耦合效率, 而且对于定量设计光学整形系统十分有用。

关键词: 激光器; 大功率激光二极管; 双峰结构; 远场分布

中图分类号: TN241 文献标识码: A

A Far-Field Distribution Model Describing the Double-Peak Beam of High-Power Laser Diodes

Wang Qiang Zeng Xiaodong An Yuying

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

Abstract: In order to design optical system to collimate laser beam, its far-field distribution should be acquired exactly. Based on the Helmholtz equation, two decentered Gauss beams are used to represent the distribution of the source in the direction of paralleling the chip plane, then a new model describing the double-peak beam of high-power laser diodes is presented. A comparison with several practical devices is also made, satisfying result has been obtained, the rate of the error power to the total is only 1%~2%. Because of its simple structure, this model can be used to design shaping system or analyze the propagation properties when the laser beam passes through a optic system, and helpful for calculating coupling efficiency.

Key words: lasers; high-power laser diodes; double-peak beam; far-field distribution

1 引 言

近年来激光二极管(LD)制造技术飞速发展, 多种高性能器件已广泛应用于科学研究及工程领域, 如: 抽运固体激光器、制导、引信、材料处理、医疗等。但由于其波导结构的特点, 激光二极管输出光波发散角大, 光斑呈椭圆状, 特别是大功率激光二极管, 在平行于结平面方向上源尺寸较大, 属于扩展光源。因此, 绝大多数情况下, 激光二极管的波束都需要整形才能应用。为了合理地设计光学系统, 必须准确地了解激光二极管的远场分布。本文内容仅限于讨论包含一个发射单元的大功率激光二极管。这种激

光二极管由多个相互耦合的条形有源区构成, 模式结构十分复杂, 一般用耦合模理论^[1]处理, 获得的远场表达式虽在一定假设下可以近似说明双峰结构, 但表达式复杂, 不易进一步研究光场经光学系统的变换, 而且定量上几乎给不出合理的结果。因此, 建立一种数学表达简单并且较好反映实际器件特性的光束模型有重要实际意义。国内外学者都已经对光束模型的近似表达式作了很多研究^[2~7], 如直角坐标系下常用的厄米高斯模型, 柱坐标系下描述部分相干光束的贝塞尔高斯模型及高斯-谢尔模型(GSM), 还有拉盖尔高斯模型等, 最近又提出了厄米正弦高斯模型(HSiG)和厄米双曲正弦高斯模型

* 国家自然科学基金(60277004)资助课题。

作者简介: 王强(1980~), 男, 西安人, 硕士生, 主要从事半导体激光器出射光场的研究。E-mail: sknewworld@163.com

收稿日期: 2004-06-04; 收到修改稿日期: 2004-09-27

(HChG), 这些模型的主要缺点仍是结构过于复杂。

本文由亥姆霍兹方程的远场解出发, 给出了一种新的光束模型, 用于描述大功率激光二极管器件远场双峰特性, 并与实际器件的测量数据进行了对比, 结果表明本文提出的模型结构简单, 具有较高精度, 对于研究光束经光学系统变换十分有用。

2 理论分析

将激光二极管输出端面的场分布看作源, 利用亥姆霍兹方程可以严格求出其远场渐近解为^[8,9]

$$u(x, y, z) = -\frac{iz}{\lambda r} \frac{\exp(ikr)}{r} \times \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int u(x', y') \exp\left[-\frac{ik}{r}(xx' + yy')\right] dx' dy', \quad (1)$$

其中 $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ 为观测点至坐标原点的距离(见图 1), $k = 2\pi/\lambda$ 是真空中波数, $u(x, y, z)$ 为远场分布, $u(x', y')$ 表示源场分布。

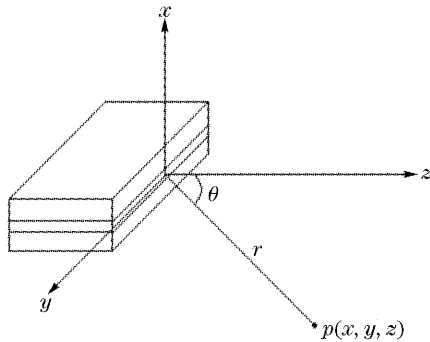


图 1 激光二极管芯片表面及坐标系

Fig. 1 Facet of a laser diode chip and related coordinate system

对于小功率激光二极管, 由于其发光面尺寸小, 一般是 $1 \mu\text{m} \times$ 几 μm , 因此一般工作在基横模状态下。然而对于大功率激光二极管, 其发光面尺寸较大, 在垂直于结平面方向约为 $1 \mu\text{m}$, 但在平行结平面方向上根据输出功率不同而在 $100 \sim 500 \mu\text{m}$ 之间变化。此处所说的远场指观测点至源的距离远大于源尺寸及光波长, 对于绝大多数应用远场条件是满足的, 比如光束整形及其他光束变换元件一般是在距离输出端面毫米量级以上, 所以仍可使用(1)式研究其远场分布。对于大功率激光二极管, 由于在平行于结平面方向发光区尺寸很大, 此方向激光器不再会是处于基横模工作状态, 因此我们提出用两个离心高斯函数来描述此方向模式场分布; 在垂直于结平面方向, 发光区尺寸与小功率激光二极管相当, 模式场分布仍为基模分布。因此大功率激光二

极管输出端面附近的场分布可表示为

$$u_{\pm}(x', y') = u_{\pm} \exp(-p|x'|) \exp(-q_{\pm}y^2 - ia_{\pm}y'), \quad (2)$$

由(2)式可以看出, 在 y 方向这是两个传播方向偏离 z 轴的高斯分布。其中 $p, q_{+}, q_{-}, a_{+}, a_{-}$ 为常量, 与波导结构有关, a_{+}, a_{-} 定义为偏心参量。将源场分布带入(1)式中。由此可分别算出两束光的远场分布为

$$u_{\pm}(x, y, z) = A_{\pm} \frac{z}{r} \frac{\exp(ikr)}{r} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + x^2} \times \exp\left(-\frac{a_{\pm}^2}{4q_{\pm}}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{\Omega_{\pm}^2} - \frac{a_{\pm}ky}{2q_{\pm}r}\right), \quad (3)$$

其中

$$A_{\pm} = u_{\pm} \frac{2i}{\lambda p} \sqrt{\frac{\pi}{q_{\pm}}}, \quad (4)$$

$$\Omega_{\pm}^2 = \frac{4q_{\pm}}{k^2} r^2, \quad (5)$$

$$\Gamma^2 = \frac{p^2}{k^2} r^2, \quad (6)$$

由(3)式可以看出远场分布前一部分类似洛伦兹分布, 但 Γ 中却含有 r , 所以不是洛伦兹分布; 后一部分类似高斯分布, 但 Ω 中却含有 r , 并且中心已不在原点, 成为偏心光束。两个高斯模场的时间相位差一般是随机的, 所以远场应为两者的光强叠加。从而远场光强分布为

$$I = A'^2 \frac{z^2}{r^4} \frac{\Gamma^4}{(\Gamma^2 + x^2)^2} \times \left[c \exp\left(-\frac{2y^2}{\Omega_{+}^2}\right) \exp\left(-\frac{a_{+}^2 r + 2a_{+}ky}{2q_{+}r}\right) + \exp\left(-\frac{2y^2}{\Omega_{-}^2}\right) \exp\left(-\frac{a_{-}^2 r + 2a_{-}ky}{2q_{-}r}\right) \right], \quad (7)$$

其中

$$A' = u_{\pm}^2 \frac{4\pi}{\lambda^2 p^2 q_{\pm}}, \quad (8)$$

$$c = \frac{u_{+}^2 q_{-}}{u_{-}^2 q_{+}}. \quad (9)$$

由于本模型是基于亥姆霍兹方程远场渐近解得到的, 故模型应用须满足远场条件, 即观测点与场源距离远大于源尺寸及波长。一般波长都在微米量级, 源尺寸最大几百微米, 而测量通常在数毫米甚至数厘米以上, 因此远场条件容易满足; 另外, 本文基于标量场理论, 对于 TE 模, 结论是精确的, 对于 TM 模工作的激光二极管在大角度区域将产生一定误差^[10]。

3 实验验证

为了验证模型的有效性, 我们随机选取了三个半导体激光器, 测量其光强远场分布, 进行验证, 分别是: Spectra Physics 公司的 SCT100-808-Z1-01, LD1

Hamamatsu 公司的 L8763, LD2 和 Sony 公司的 SLD323XT, LD3。三个激光器皆室温工作在 808 nm, 辐射区尺寸分别为 $100\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$, 前二者工作的连续输出功率为 1 W, SLD323XT 的连续输出功率为 400 mW。测量时是分别在 $y-z$ 平面和 $x-z$ 平面中, 以激光二极管为原点, 半径为 50 mm 的圆上, 使用光电二极管测量其光强分布, 装置如图 2 示。

两个方向上的光强分布可以由(7)式分别写出, 因为是在半径为 50 mm 的圆上进行的测量, 所以定义 θ 为测量点到结平面的连线与轴线的夹角(如

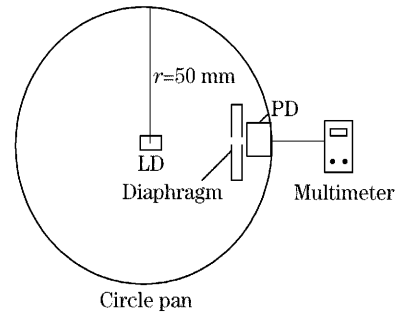


图 2 实验装置及摆放

Fig. 2 Placement of the devices

图 1 所示), 则光强可以表示成 θ 的函数

$$I_{yz}(\theta) = A' \frac{\cos^2 \theta}{r^2} \left\{ c \exp\left[-\frac{a_+ + k \sin^2 \theta}{2q_+}\right] + \exp\left[-\frac{(a_- + k \sin^2 \theta)^2}{2q_-}\right] \right\}, \quad (10)$$

$$I_{xz}(\theta) = B \frac{p^4 \cos^2 \theta}{(p^2 + k^2 \sin^2 \theta)^2 r^2}, \quad (11)$$

$$B = A' \left[c \exp\left(-\frac{a_+^2}{2q_+}\right) + \exp\left(-a \frac{a_-^2}{2q_-}\right) \right], \quad (12)$$

其中 $r=50\ \text{mm}$ 。

采用最小二乘法进行曲线拟合, 分别确定(10)式、(11)式中参量。实验数据和理论计算曲线的比较如图 3~图 5 所示。

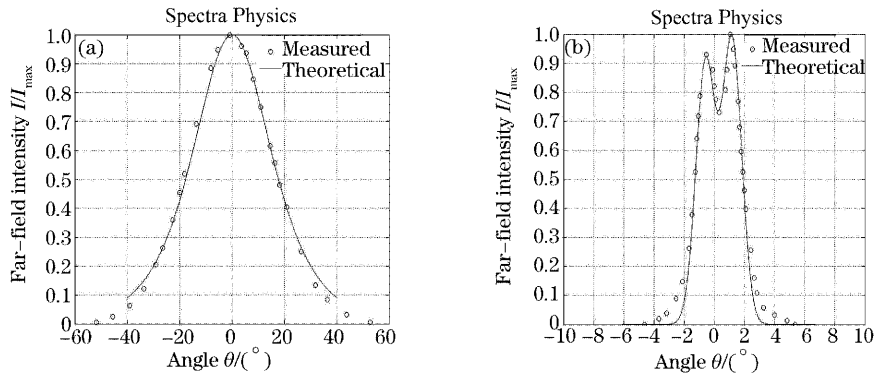


图 3 理论模型与实验数据比较。(a) 垂直结平面方向, (b) 平行结平面方向

Fig. 3 Comparison of the theoretical profile with measured data for LD1. (a) Perpendicular plane, (b) parallel plane

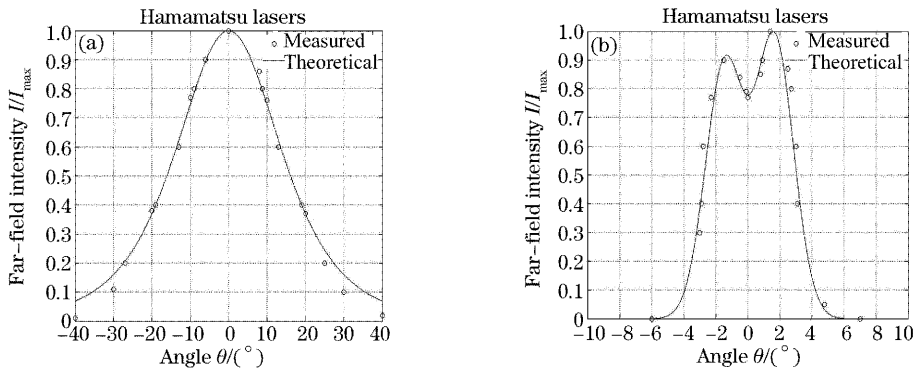


图 4 理论模型与实验数据比较。(a)垂直结平面方向, (b)平行结平面方向

Fig. 4 Comparison of the theoretical profile with measured data for LD2. (a) Perpendicular plane, (b) parallel plane

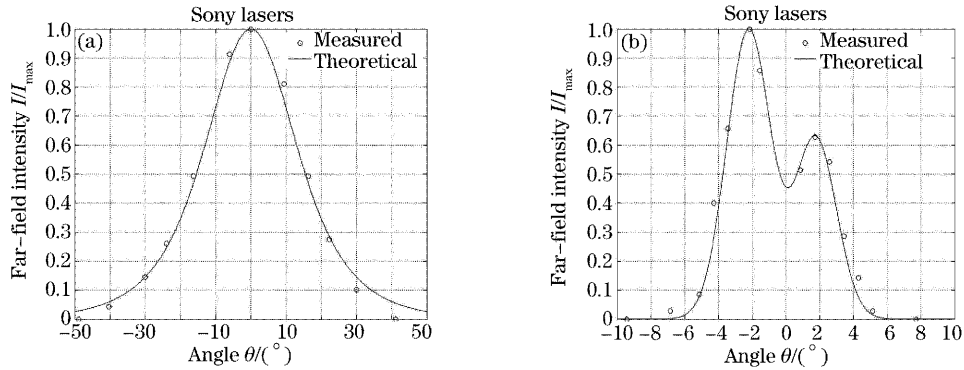


图5 理论模型与实验数据比较。(a)垂直结平面方向,(b)平行结平面方向

Fig. 5 Comparison of the theoretical profile with measured data for LD3. (a) Perpendicular plane, (b) parallel plane

由图3~图5可以看出,在曲线上最大幅值的0.1以上部分都符合得相当好,只在最大幅值的0.1以下发生较明显偏差,但偏差部分的能量仅占总能量的1%~2%(理论和实验曲线下面积之差与总面积的比率)。

4 结 论

本文提出了一种描述大功率激光二极管双峰结构的新模型,并借助计算机分析与实际激光器件的实验数据进行了比较,结果表明这种新模型能较好的描述大功率激光二极管的双峰特性,产生偏差的能量仅占总能量的1%~2%。这为研究光束通过光学系统的变换带来了方便,对设计光学系统有重要意义。对于实际激光二极管,先分别测量平行与垂直于结平面方向远场光强分布,然后使用曲线拟合技术,确定出模型中的参量后,即可用于研究光束变换或设计光学系统。

参 考 文 献

- 1 Kathrine A. Forrest, James B. Abshire. Time evolution of pulsed far-field patterns of GaAlAs phase-locked laser-diode arrays[J]. *IEEE Quant. Electron.*, 1987, **23**(8): 1287~1290
- 2 Lu Yaxiong, Yang Yapei, Chen Shufen. *Laser Transmission and Transform Technology* [M]. Chengdu: UESTC Publishing House, 1999. 208~216 (in Chinese)

- 卢亚雄,杨亚培,陈淑芬. 激光束的传输与变换技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999. 208~216
- 3 Lee W. Casperson, Anthony A. Tovar. Hermite-sinusoidal-Gaussian beams in complex optical system[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1998, **15**(4): 954~963
- 4 Baida Lü, Hong Ma, Bin Zhang. Propagation properties of cosh-Gaussian beams[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **166**(4): 165~171
- 5 Zhang Bin, Lü Baida, Cai Bangwei. Transformation properties of Gaussian schell-model beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 378~381 (in Chinese)
- 张 彬,吕百达,蔡邦维. 高斯-谢尔模型光束的变换特性[J]. 光学学报, 1996, **16**(3): 378~381
- 6 Luo Shirong, Lü Baida, Zhang Bin. Propagation characteristics of flattened Gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1213~1217 (in Chinese)
- 罗时荣,吕百达,张 彬. 平顶高斯光束的传输特性[J]. 光学学报, 2000, **20**(9): 1213~1217
- 7 Luo Shirong, Lü Baida. Pointing stability of Hermit-cosh-Gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 692~696 (in Chinese)
- 罗时荣,吕百达. 厄米双曲余弦高斯光束的瞄准稳定性[J]. 光学学报, 2002, **22**(6): 692~696
- 8 Xiaodong Zeng, Amir A. Naqwi. Far-field distribution of double-heterostructure diode laser beams[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(24): 4491~4494
- 9 Zeng Xiaodong, Mu Meili. Far-field properties of diode laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8): 1086~1088 (in Chinese)
- 曾晓东,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
- 10 Zeng Xiaodong, Liang Changhong, An Yuying. Vector theory of off-axial Gaussian wave[J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(7): 1254~1260 (in Chinese)
- 曾晓东,梁昌洪,安毓樱. 远轴高斯波的矢量场理论[J]. 物理学报, 1999, **48**(7): 1254~1260