

文章编号: 0253-2239(2010)08-2180-05

激光二极管远场分布的部分相干模型

梁一平^{1,2} 何华伟^{1,2} 熊玲玲³ 戴特力^{1,2} 赵东升^{1,2}

(¹重庆市高校光学工程重点实验室, 重庆 400047; ²重庆师范大学物理学与信息技术学院, 重庆 400047)
³四川大学激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064)

摘要 根据激光二极管发光的部分相干性这一客观事实, 运用部分相干光理论提出了描述激光二极管远场分布的新的理论模型。该模型体现了激光二极管本身特性参数对其远场分布的密切影响, 能够描述已观察到的各种远场分布结构, 为准确了解激光二极管输出光束的特性和对其进行光束整形提供了理论依据。

关键词 相干光学; 激光二极管; 远场分布; 发光元; 部分相干光

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2180

A Partial-Coherence Model Describing the Far-Field Distribution of Laser Diode

Liang Yiping^{1,2} He Huawei^{1,2} Xiong Lingling³ Dai Teli^{1,2} Zhao Dongsheng^{1,2}

¹ Optical Engineering Key Laboratory of Chongqing City, Chongqing 400047, China

² College of Physics and Information Technique, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

³ Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract Based on the fact that the light from laser diode is partially coherent, a novel theoretical model is proposed using partially coherent light theory. This model can describe the close relation between the parameters of diode laser and its far-field. The different experimental far-field distribution patterns of laser diodes also can be well described by this model. This work provides a theoretical basis for the studying the laser diode output beam characteristics and its beam shaping technology.

Key words coherence optics; laser diode; far-field distribution; emitter unit; partially coherent light

1 引言

激光二极管(LD)由于其显著的优点, 已被广泛应用于各个领域^[1~3], 但它的输出光束发散角大, 并且是高度像散的, 在大多数情况下都需要经过整形后才能应用^[4~13]。无论何种整形方案的设计都需要对远场光强分布的准确了解才能有效实现其整形目的, 为此已进行了大量实验研究和理论研究, 并提出了很多描述 LD 远场分布的理论模型, 典型的有椭圆像散高斯模型、波导-高斯模型、指数-高斯模型和指数-厄米高斯模型等, 但各自都有其局限性^[14~21]。

只包含一个发射单元(发光区)的大功率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^[22,23]。一个激光二极管可以认为是由很多个既相对独立又互相影响的发光元密集地排列在

一起构成的, 发出的是部分相干光, 且光场分布在不同条件下也有明显的差异, 甚至出现双峰和多峰结构^[24~29]。文献[28]和[29]提出了用两个非相干离心高斯光束描述场源处平行于结平面方向场分布的模型, 较好地解释了激光二极管远场分布的双峰结构。在上述已有的研究成果的基础上, 根据部分相干光理论, 结合实验研究结果进行了探讨, 讨论了部分相干的双光束干涉形成的远场分布。

2 双光束干涉的部分相干性理论^[30]

图 1 表示一个宽度为 L 的半导体激光器有源区(图中未画出波导)。描述激光传播空间的坐标系以垂直于结平面方向为 x 方向, 平行于结平面方向为 y 方向, 坐标系原点建立在有源区发射端面的中

收稿日期: 2009-10-19; 收到修改稿日期: 2009-11-12

基金项目: 重庆市科委科技攻关项目(8180)和重庆市教委应用基础研究项目(KJ060816)资助课题。

作者简介: 梁一平(1950—), 男, 教授, 主要从事光学教学与光学工程相关的理论和技术等方面的研究。

E-mail: liangyipinglyp@yahoo.com.cn(光学学会会员号: 50402375-9)

心 O 。假定整个有源区可以分为大小和形状都完全相同的两个部分,每部分的宽度为 $L/2$,它们发射的光束在端面上的中心 O_+ 和 O_- 相对于 O 的位移分别为 $+a$ 和 $-a$ 。

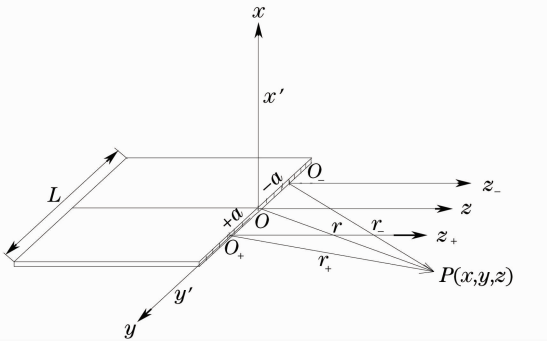


图1 二极管有源区与坐标系

Fig. 1 Active layer of a LD and the coordinate system

整个有源区在 $z=0$ 的平面上的光电场分布可认为是由这两部分产生的场的叠加,即

$$\epsilon(x', y') = \epsilon_+(x', y') + \epsilon_-(x', y'), \quad (1)$$

对于上述每一部分,假定文献[24~27]给出的对称波导异质结激光器的结果仍然适用,则可认为(1)式中的

$$\begin{aligned} \epsilon_{\pm}(x', y') = \\ \epsilon_0 \exp[-p|x'| - q(y' \mp a)^2 + i\varphi_{\pm}]. \end{aligned} \quad (2)$$

显然,与文献[28]和[29]中类似,这表示两个离轴的高斯分布,式中 ϵ_0 为常数, p 和 q 分别为 x 方向和 y 方向的衰减系数, φ_{\pm} 则是两个源场的相位的系综平均值。由于(2)式表示的两个光束各自对通过 O_+ 的 Z_+ 轴和通过 O_- 的 Z_- 轴(图1)对称,而每部分有源区两侧边界与外界的耦合情况不同,因而 O_+ 和 O_- 并不一定是两部分各自的几何中心。

由标量亥姆霍兹方程可导出非傍轴远场近似衍射积分公式(瑞利-索末菲衍射积分公式)^[24]为

$$\begin{aligned} E(x, y, z) = -\frac{iz \exp(ikr)}{\lambda r^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon(x', y') \times \\ \exp\left[-\frac{ik}{r}(xx' + yy')\right] dx' dy', \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, λ 为光波波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。将(2)式代入此式可分别计算出两个源场在观察点产生的光电场为

$$\begin{aligned} E_{\pm}(x, y, z) = -\frac{iz \exp(ikr_{\pm})}{\lambda r_{\pm}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon_{\pm}(x', y'_{\pm}) \times \\ \exp\left[-\frac{ik}{r}(xx' + yy'_{\pm})\right] dx' dy'_{\pm} = -\epsilon_0 \frac{2i}{\lambda z p} \left(\frac{\pi}{q}\right)^{1/2} \times \\ \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{bx}{z}\right)^2 + \left(\frac{y_{\pm}}{z}\right)^2\right]} \exp\left(-\frac{k^2 y_{\pm}^2}{4qr_{\pm}^2}\right) \exp(ikr_{\pm}), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $y'_{\pm} = y' \mp a$, $r_{\pm} = \sqrt{x^2 + y_{\pm}^2 + z^2}$, $y_{\pm} = y \mp a$, $b = 1 + \left(\frac{k}{p}\right)^2$ 。于是在观察点 P 的总的光电场应为两个场在此处的叠加,即

$$E(x, y, z) = E_+(x, y, z) + E_-(x, y, z). \quad (5)$$

这两个场叠加所产生的光强(辐照度),按定义可表示为时间的平均值^[30]

$$\begin{aligned} I = \langle E \cdot E^* \rangle = \langle (E_+ + E_-) \cdot (E_+^* + E_-^*) \rangle = \\ \langle |E_+|^2 + |E_-|^2 + 2\text{Re}(E_+ \cdot E_-^*) \rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

假定这个时间平均值是稳定的,同时两个场具有相同的单一偏振状态,适用于标量场近似,(6)式可进一步写为

$$\begin{aligned} I = I_+ + I_- + 2\text{Re}\langle E_+ \cdot E_-^* \rangle = \\ I_+ + I_- + 2\sqrt{I_+ I_-} \text{Re}[\gamma(\tau)], \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} I_{\pm} = \langle |E_{\pm}|^2 \rangle = \frac{I_0(z)}{\left[1 + \left(\frac{bx}{z}\right)^2 + \left(\frac{y \mp a}{z}\right)^2\right]^2} \times \\ \exp\left[-\frac{k^2 (y \mp a)^2}{2qr_{\pm}^2}\right], \end{aligned} \quad (8)$$

$$I_0(z) = \frac{4\pi\epsilon_0^2}{\lambda^2 z^2 p^2 q}, \quad (9)$$

$$\gamma(\tau) = \frac{\langle E_+ \cdot E_-^* \rangle}{\sqrt{I_+ I_-}}, \quad (10)$$

$\gamma(\tau)$ 为部分相干度,通常是 τ 的复数周期函数,而 τ 是从两个光源到观察点的光程差所引起的传播时间差。 $\gamma(\tau)$ 满足 $0 \leq |\gamma(\tau)| \leq 1$, 当 $|\gamma(\tau)| = 1$ 时,两个光场是完全相干的;当 $|\gamma(\tau)| = 0$ 时,两个光场是不相干的;当 $0 < |\gamma(\tau)| < 1$ 时,两个光场则是部分相干的。要计算 $\gamma(\tau)$ 首先必须了解光源本身的性质,包括它各部分之间的关联所确定的空间相干性和时间相干性,并以函数形式表达出来,但这实际上又难于做到。根据 $\gamma(\tau)$ 的性质,可作如下考虑。

$\text{Re}\langle E_+ \cdot E_-^* \rangle = 2\sqrt{I_+ I_-} \text{Re}\langle \cos[k(r_+ - r_-) + \varphi_+ - \varphi_-] \rangle$, 可设

$$\text{Re}\gamma_{\pm}(\tau) =$$

$$\text{Re}\langle \cos[k(r_+ - r_-) + \varphi_+ - \varphi_-] \rangle =$$

$$\gamma \cos[k(r_+ - r_-) + \varphi] \approx \gamma \cos\left(\frac{4\pi ay}{\lambda r} + \varphi\right), \quad (11)$$

式中 γ 为实相干系数,其取值范围为 $0 \leq \gamma \leq 1$; $\varphi = \langle \varphi_+ - \varphi_- \rangle$ 是 $z=0$ 平面处两光源初始相位差的系综平均值; $k(r_+ - r_-) \approx (4\pi ay)/(\lambda r)$ 则是由光程差导致的相位差。由(11)式定义的 $\text{Re}\gamma_{\pm}(\tau)$ 满足上述 $\gamma_{\pm}(\tau)$ 的性质,能够描述光场的相干性。如果两个光场是完全相干的,则 $\gamma=1, \varphi=0$; 如果两个光场是

完全不相干的,则 $\gamma=0$;如果两个光场是部分相干的,则 γ 取 $0\sim 1$ 之间的某一值, φ 取 $-\pi\sim\pi$ 之间的某一值。 γ 和 φ 的值需要由实验确定。

将(11)式代入(7)式,得到光强的远场分布为

$$I(x,y,z) = I_+ + I_- + 2\gamma \sqrt{I_+ I_-} \cos\left(\frac{4\pi ay}{\lambda r} + \varphi\right). \quad (12)$$

3 远场分布曲线

3.1 垂直于结平面方向的分布

由(12)式可以分别考察快轴(垂直于结平面)方向和慢轴(平行于结平面)方向光强的远场分布特点。将(8)式代入(12)式,再令 $y=0$,得到 xz 平面上的光强分布为

$$I(x,0,z) = \frac{2(1+\gamma\cos\varphi)I_0(z)}{\left[1+\left(\frac{bx}{z}\right)^2+\left(\frac{a}{z}\right)^2\right]^2} \times \exp\left[-\frac{k^2 a^2}{2q(z^2+x^2+a^2)}\right]. \quad (13)$$

考虑到远场条件下 $a\ll z$,可忽略 a/z , (13)式可写为

$$I(x,0,z) \approx \frac{I_{x0}(z)}{\left[1+\left(\frac{bx}{z}\right)^2\right]^2}, \quad (14)$$

式中 $I_{x0}(z) = I_0(z)(1+2\gamma\cos\varphi)$ 。(14)式所表示

的分布中只含有 b 一个参数,其取值决定了光强分布的宽度,此结果与很多文献中的一致,并为实验所证实^[28,29],在此不再深入讨论。

3.2 平行于结平面方向的分布

将(8)式代入(12)式,再令 $x=0$ 得到 yz 平面上的光强分布为

$$I(0,y,z) = I_+(0,y,z) + I_-(0,y,z) + 2\gamma \sqrt{I_+(0,y,z)I_-(0,y,z)} \cos\left(\frac{4\pi ay}{\lambda \sqrt{z^2+y^2}} + \varphi\right), \quad (15)$$

式中

$$I_{\pm}(0,y,z) = \frac{I_0(z) \exp\left\{-\frac{2\pi^2(y\mp a)^2}{q\lambda^2[z^2+(y\mp a)^2]}\right\}}{\left[1+\left(\frac{y\mp a}{z}\right)^2\right]^2},$$

γ , φ 和 a 等参数都是由激光二极管本身的特性所确定的,它们的取值决定了光强分布的结构特点。

图 2 是由(15)式中各参数取不同值时给出的各种分布曲线(波长为 $\lambda=808\text{ nm}$),它们所描述的单峰、双峰、三峰以致于更多峰结构都是实验已观察到的^[22]。

在远场情况下,当 $I_{\pm}(0,y,z)$ 中的 a/z 可以忽略时,有

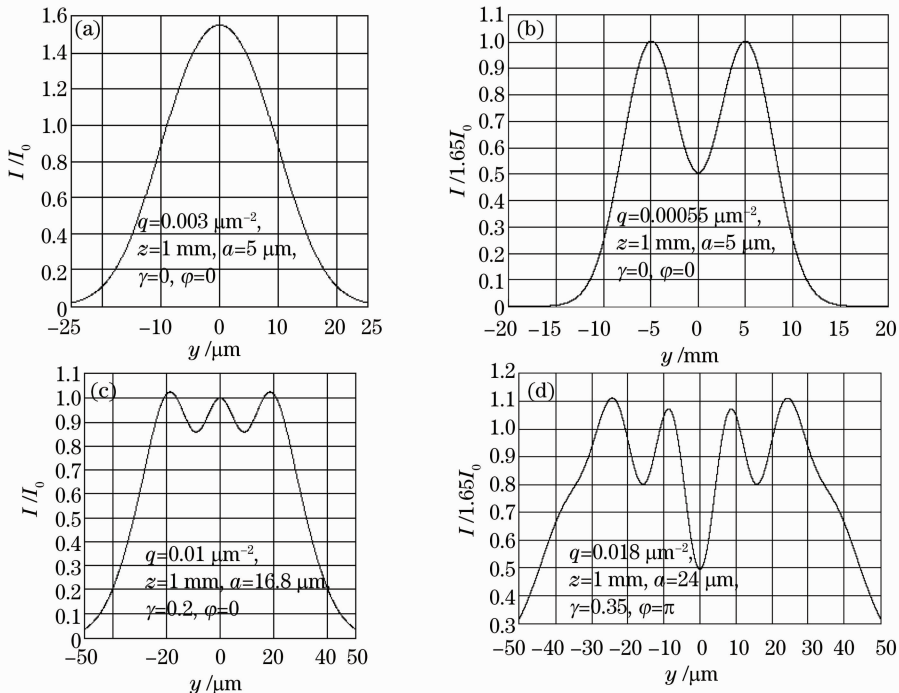


图 2 平行于结平面方向的远场分布

Fig. 2 Far-field distributions in the direction parallel to junction plane ($x=0$)

$$I_+(0, y, z) \approx$$

$$I_-(0, y, z) \approx \frac{I_0(z) \exp\left\{-\frac{2\pi^2 y^2}{q\lambda^2 [z^2 + y^2]}\right\}}{\left[1 + \left(\frac{y}{z}\right)^2\right]^2}. \quad (16)$$

但相位因子中的 a/z 不能忽略,因为它反映光束间的干涉效应,直接影响到分布的精细结构。在取(16)式后,(15)式可重新写为

$$I(0, y, z) = \frac{I_0(z) \exp\left\{-\frac{2\pi^2 y^2}{q\lambda^2 [z^2 + y^2]}\right\}}{\left[1 + \left(\frac{y}{z}\right)^2\right]^2} \times \left[1 + 2\gamma \cos\left(\frac{4\pi a y}{\lambda \sqrt{z^2 + y^2}} + \varphi\right)\right], \quad (17)$$

如果令 $y/z = \tan\theta$, (17)式可写为角分布的形式

$$I(0, \theta, z) = I_0(z) \cos^4 \theta \times$$

$$\left[1 + 2\gamma \cos\left(\frac{4\pi a}{\lambda} \sin \theta + \varphi\right)\right] \exp\left[-\frac{2\pi^2}{q\lambda^2} \sin^2 \theta\right]. \quad (18)$$

图3中(a),(c)和(e)是文献[28]的双光束非相干叠加模型的理论曲线与实验测量数据的比较,实测数据分别是对 Spectra-Physics SCT100-808-Z1-01, Sony SLD326YT-2 和 Sony SLD342YT-2 激光二极管光强的远场分布的测量获得的;图3中(b),(d)和(f)则是由(17)式分别取相应的参数得到的拟合曲线。比较(a)与(b),(c)与(d)和(e)与(f)可以看到,只要参数合适,由(17)式得到的理论曲线就能很好地与实验吻合。

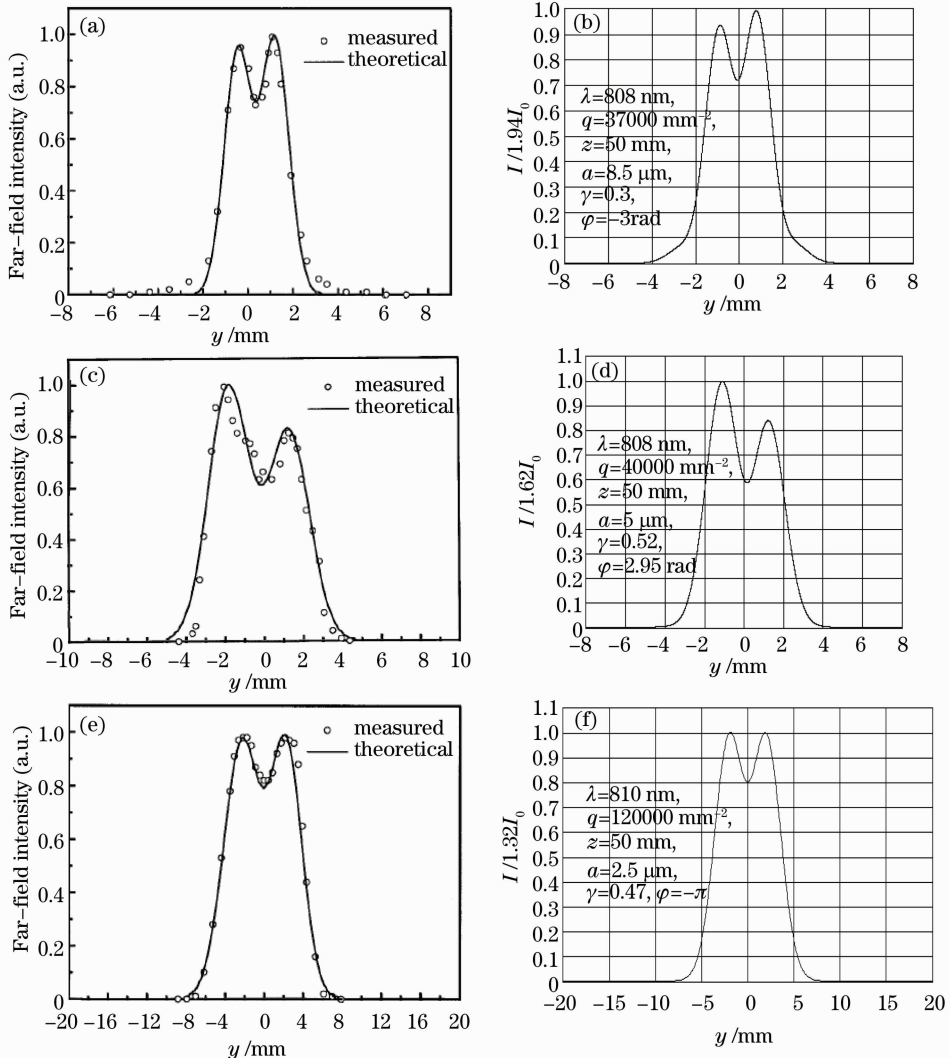


图3 平行于结平面的理论曲线与实验数据的比较

Fig. 3 Comparison of the theoretical profile in the parallel plane ($x=0$) with the measured data

4 结 论

本文所建立的理论模型能够通过调整参数来描述已观察到的激光二极管光强的各种远场分布结构,为光束变换和整形方案的设计提供了依据。同时,该模型反映了激光二极管的部分相干特性,建立了远场分布与激光器的部分特性参量的联系,为通过远场分布来了解激光二极管特性提供了理论基础,对此还需要进一步的研究。

参 考 文 献

- G. P. Agrawal, N. K. Dutta. Semiconductor Lasers [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993
- Dai Teli. Semiconductor Diode-Pumped Solid-State Laser [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1993
戴特力. 半导体激光二极管泵浦全固态激光器 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1993
- Jiang Jianping. Semiconductor Laser [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000
江剑平. 半导体激光器 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000
- Xin Cuofeng, Qu Ronghui, Chen Chen *et al.*. Characterization of a 2D array high power semiconductor laser module [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 447~450
辛国锋, 瞿荣辉, 陈晨等. 大功率半导体激光器二维阵列模块特性分析 [J]. 中国激光, 2006, **33**(4): 447~450
- Gao Xin, Bo Baoxue, Zhang Jing *et al.*. High brightness operation of fiber coupling multiplex diode lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1472~1475
高欣, 薄报学, 张晶等. 多单元半导体激光器的高亮度光纤耦合输出 [J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1472~1475
- Wang Xiaowei, Xiao Jianwei, Ma Xiaoyu *et al.*. Fiber coupling of laser diode bar to multimode fiber array [J]. *Chinese J. Semiconductor*, 2002, **23**(5): 464~467
王晓薇, 肖建伟, 马晓宇等. 激光二极管阵列与多模光纤阵列的光纤耦合 [J]. 半导体学报, 2002, **23**(5): 464~467
- Deny Xinli, Liu Yun, Yin Honghe *et al.*. Theoretical analysis and experiment of "smile" correction for diode laser bar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 505~508
邓鑫李, 刘云, 尹红贺等. 半导体激光阵列弯曲矫正方法的理论分析与实验 [J]. 中国激光, 2008, **35**(4): 505~508
- Liang Yiping, Dai Teli. Improving on the collimating performance of cylindrical lens to the beam of laser diode bar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1305~1311
梁一平, 戴特力. 圆柱透镜对半导体激光光束准直性能的改进 [J]. 中国激光, 2004, **31**(11): 1305~1311
- Yang Huajun, Hu Yu, Xie Kang. Optimization design for aspheric collimation system of high power semiconductor laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1607~1611
杨华军, 胡渝, 谢康. 大功率半导体激光束非球面准直系统的优化设计 [J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1607~1611
- Yu Jianjie, Tan Liying, Ma Jing *et al.*. Progress on beam shaping of high-power laser diode arrays [J]. *Laser Technology, Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(4): 34~42
俞建杰, 谭立英, 马晶等. 大功率半导体激光器阵列光束整形新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(4): 34~42
- Zhou Chongxi, Liu Yinhui, Xie Weimin *et al.*. Analysis and design of fiber coupled high power laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1296~1300
周崇喜, 刘银辉, 谢伟民等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究 [J]. 中国激光, 2004, **31**(11): 1296~1300
- Liang Yiping, Dai Teli, Xiong Lingling. The optical significance of the focuses of hyperbola and ellipse [J]. *Journal of Chongqing Normal University(Natural Science Edition)*, 2004, **21**(3): 26~27
梁一平, 戴特力, 熊玲玲. 双曲线和椭圆焦点的光学意义 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2004, **21**(3): 26~27
- Luo Yamei, Liang Yiping, Xiong Lingling. The error analysis of collimation of hyperboloid cylinder-plane lens [J]. *Journal of Chongqing Normal University(Natural Science Edition)*, 2006, **23**(4): 58~60
罗亚梅, 梁一平, 熊玲玲. 双曲柱面-平面透镜准直的误差分析 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2006, **23**(4): 58~60
- Xiong Lingling, He Huawei, Dai Teli *et al.*. Reconstruction of source-field distribution of a diode bar laser beam by simulated annealing [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(11): 2223~2231
- Xiong Lingling, He Huawei, Dai Teli *et al.*. Far-field characteristics of diode laser bar beam [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12): 1971~1974
熊玲玲, 何华伟, 戴特力等. 二极管激光阵列光束的远场特性 [J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(12): 1971~1974
- S. Nemoto. Experimental evaluation of a new expression for the far field of a diode laser beam [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(27): 6387~6392
- Y. J. Li, J. Katz. Nonparaxial analysis of the far-field radiation patterns of double-heterostructure laser [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(9): 1442~1451
- Z. G. Zhao, K. L. Duan, B. D. Lü. Non-equiphasse Hermite-Gaussian model of diode laser beams [J]. *Optik*, 2008, **119**(4): 167~170
- Y Li. Focusing of diode beam: a simple mathematical model: comment [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(18): 3392~3394
- Zeng Xiaodong, Mu Meili. Far field properties of diode laser beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8): 1086~1088
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
- Xiong Lingling, Lü Baida. Theoretical models describing far-field intensity distributions of laser diode [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2): 201~206
熊玲玲, 吕百达. 描述激光二极管远场光强分布的理论模型 [J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(2): 201~206
- H. C. Casey, Jr. M. B. Panish, Heterostructure Lasers [M]. Guo Changzhi translated, Beijing: Academic Press, 1985: 261
- Yang Jiong, Chen Tingting, Ding Guilin *et al.*. Focusing of diode laser beams: a partially coherent Lorentz model [C]. *SPIE*, 2007, **6824**: 68240A
- X. D. Zeng, N. Amir. Far-field distribution of double-heterostructure diode laser beams [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(24): 4491~4494
- W. Anderson. Mode confinement and gain in junction lasers [J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 1965, **1**(6): 228~236
- T. Z. Achos, J. Ripper. Resonant modes of GaAs junction lasers [J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 1969, **QE5**(1): 29~37
- T. Paoli. Waveguiding in a stripe-geometry junction laser [J]. *IEEE Quant. Elect.*, 1977, **QE13**, 662~668
- X. Zeng, Z. Feng, Y. An. Far-field expression of a high-power laser diode [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(27): 5168~5172
- Wang Qiang, Zeng Xiaodong, An Yuying. A far-field distribution model describing the double-peak beam of high-power laser diodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 619~622
王强, 曾晓东, 安毓英. 大功率激光二极管双峰结构远场分布模型 [J]. 光学学报, 2005, **25**(5): 619~622
- G. R. Fowles, Introduction to Modern Optics [M]. Chen Shisheng, Lin lihuang translated Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers. 1980: 66~68
福尔斯特. 现代光学导论 [M]. 陈时胜, 林礼煌译. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 66~68