

半导体激光器光束质量评价方法探讨

曹长庆, 曾晓东

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘要:针对半导体激光器的结构和光束特点,分析了 M^2 因子的概念与半导体激光器激光本质之间的关系,研究了其局限性,探讨了激光光束质量的影响因素,提出利用准直代价作为半导体激光器光束质量评价因子,该因子由激光器的结构参数和光束参数有机组合而成,此值越小光束质量越好,越容易准直.新的评价因子即完善了“光参数积”的普适性,又具有针对性.

关键词:激光技术;光束质量;准直; Q 因子

中图分类号:TN248.4 **文献标识码:**A

Evaluating the beam quality of semiconductor lasers

CAO Chang-Qing, ZENG Xiao-Dong

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the beam characteristics of semiconductor lasers, a new parameter for evaluating beam quality of high power semiconductor lasers was introduced. The shortcomings of M^2 factor used in evaluating beam quality of semiconductor lasers were discussed and its limitations were pointed out. Moreover, some important aspects of the beam quality factor are discussed. The main factors which influence collimating the beam of semiconductor lasers are analyzed. The results suggested that the smaller the value of the new parameter is, the more easily the beam is collimated.

Key words: laser technique; beam quality; collimation; Q factor

PACS: 42.60.Lh

引言

光束质量是从质的方面评价激光的特性,对激光器设计、制造、检测、应用等有重要作用. A. Siegman 基于 Lagrange 不变量提出的 M^2 因子比较客观全面的描述了激光束的质量特征^[1,2]. 但半导体激光器与固体激光器、CO₂ 激光器等相比较,其发散角太大,且在垂直和平行结平面方向的角度不同,并具有像散特性,这对光束质量的评价带来了一定的困难^[3-9]. 探讨如何完善半导体激光器光束质量因子的普适性,分析影响光束质量的因子,并进行控制,具有重要意义.

1 M^2 因子的局限性与适用条件

M^2 因子定义为实际光束的空间束宽积与理想光束的空间束宽积之比,光束的空间束宽积(space-

beam width product)是指光束在空间域中的宽度(光腰束宽)和在空间频率域中的角谱宽度(远场发散角)的乘积,亦称光束参数乘积 (beam parameter product),即

$$M^2 = \frac{\text{实际光束束腰直径} \times \text{远场发散角}}{\text{理想光束束腰直径} \times \text{远场发散角}} = \frac{\omega\theta}{\omega_0\theta_0}, \quad (1)$$

光束的束腰宽度和远场发散角的乘积也称光束参数乘积,所以 M^2 因子的物理意义为实际光束的光束参数乘积与基模高斯光束的光束参数乘积之比.

M^2 因子克服了常用光束质量评价方法的局限,作为评价标准对激光器系统进行质量监控及辅助设计等具有十分重要的意义. 正如所有光束质量评价方法一样,它要求光束截面上的光强分布必须是连续的,且不能有陡直的边缘,应用 M^2 因子评价光束质量有其局限性^[10,11].

半导体激光器由于波导结构的特点,“腰斑”尺寸在快轴及慢轴方向上相差数十至上百倍,发散角在快轴方向可超过 40° ,并且存在像散,输出光束严重不对称.对这种光束的质量进行评价,快、慢轴方向分别用两个 M^2 参数或两个所谓的“光参数积”来描述存在缺陷:

(1) 激光器的输出光波作为一个整体,不能用两个独立方向的特征去孤立的描述,这种完全不顾及内在联系的描述不是有效的光束质量评价标准.例如,无法简单的断定 $M^2_{\perp} = 0.9, M^2_{\parallel} = 2.2$ 及 $M^2_{\perp} = M^2_{\parallel} = 1.4$ 的两束激光哪个质量更好.

(2) 大角度激光束的应用必须使用高数值孔径透镜,而在参数积中“腰斑”尺寸和发散角对整形的代价贡献并不等同.例如光斑直径 $1\mu\text{m}$,发散角为 40° 的半导体激光器,其参数积仅为 $0.7\text{mrad} \cdot \text{mm}$,若要整形并 95% 的耦合得到直径 10mm,发散角 0.1mrad 的准直光束,所付出的代价绝对比“光参数积”为 $1\text{mrad} \cdot \text{mm}$ 的 He-Ne 光(光斑直径 1mm,发散角为 1mrad)大得多.

(3) 半导体激光器存在像散,这对光束准直或聚焦将产生严重影响,特别是增益波导型器件.

因此评价半导体激光器光束质量面临的核心问题是:光源尺寸、发散角、像散等参数对光束整形的影响,及相互关联.

2 光束质量评估的新方法

由于半导体激光器的输出光束的特点,大多数都要进行光束准直以后才能应用,所以评价光束质量的好坏,可以通过准直的难易程度,即准直时所付出的代价大小来衡量.半导体激光器的发散角很大,为了获得高的耦合效率必须使用大数值孔径的透镜,然而数值孔径大的准直透镜制作工艺要求高,很难制作,增加了准直所付出的代价;半导体激光器的源宽和像散对于准直透镜张开一定的角度,这个角度的增大会很大程度上影响准直光束发散角的大小,从而降低准直的效果,若将准直透镜远离半导体激光器减小这个角度,由于垂直于结平面方向的发散角太大会降低光束的耦合效率.所以,半导体激光器的准直难易程度可以从以下 3 个方面考虑:一是光源尺寸 $L(\mu\text{m})$;二是发散角的大小 θ (弧度);三是半导体激光器的像散特性,参量用 $As(\mu\text{m})$ 表示.

借鉴“光参数积”定义一个新的评价因子 Q

$$Q = \sqrt{Q_{\parallel} \times Q_{\perp}} \times f(A_s) \quad (2)$$

其中 Q_{\parallel} 和 $L_{\parallel} \times \theta_{\parallel}^{k_{\parallel}}$ 和 Q_{\perp} 和 $L_{\perp} \times \theta_{\perp}^{k_{\perp}}$ 是快、慢轴方向修正后的“光参数积”,修正因子 $k_{\parallel} = \frac{\theta_{\parallel}}{(\theta_{\parallel} + \theta_{\perp})/2}$ 和 $k_{\perp} = \frac{\theta_{\perp}}{(\theta_{\parallel} + \theta_{\perp})/2}$ 用来加强主要因素对准直整形形成圆光斑的影响, $f(A_s) = e^{As/\lambda}$ 考虑的是像散的作用.对上式分析如下:

(1) 式(2)与“光参数积” $\omega\theta$ 有连续性,对固体激光器、 CO_2 激光器而言,修正因子为 1,像散为 0,占空比为 1, $Q_{\parallel} = Q_{\perp} = \omega\theta, f(A_s) = 1$,则 $Q = \omega\theta$.

(2) 对半导体激光器,平行于结平面方向,发散角较小,其修正因子 $k_{\parallel} < 1, Q_{\parallel} = L_{\parallel} \times \theta_{\parallel}^{k_{\parallel}}$ 中 L_{\parallel} 起主要作用;垂直于结平面方向,发散角较大,其修正因子 $k_{\perp} > 1, Q_{\perp} = L_{\perp} \times \theta_{\perp}^{k_{\perp}}$ 中 θ_{\perp} 起主要作用; $As \geq 0$ 则 $f(A_s) = e^{As/\lambda} \geq 1$.

(3) 因子 Q 又可表达为

$$Q = \sqrt{(L_{\parallel} \times L_{\perp}) \times (\theta_{\parallel}^{k_{\parallel}} \times \theta_{\perp}^{k_{\perp}})} \times f(A_s) \quad ,$$

其中, $(L_{\parallel} \times L_{\perp})$ 反映的是发光单元围成的面积, $(\theta_{\parallel}^{k_{\parallel}} \times \theta_{\perp}^{k_{\perp}})$ 是修正后的空间立体角,可适用于 bar 型和 stack 型半导体激光器宏观参数.考虑到空间占空比、“Smile 效应”等因素的复杂影响,本文不再进行深入探讨.

9 款典型激光器的参量和评价因子 Q 如表 1 所示,第 1 款是 He-Ne 激光器,其它是半导体激光器,分析如下:

(1) He-Ne 激光器 DH-HN1700 的 $M^2 = 1.4, Q = 1.1$, 半导体激光器 LDS-0870 的 $M^2_{\perp} = 0.9, M^2_{\parallel} = 2.2$, 两款具有相同的 M^2 , 但快轴方向的大发散角的影响无法反映;而半导体激光器 $Q = 2.3$ (像散 $As = 0$ 时,若 $As = 1\mu\text{m}, Q = 7.3$) 大于 He-Ne 激光器的 Q ($Q = 1.1$), 比较因子 Q 可说明该半导体激光器的准直代价大于相同 M^2 的 He-Ne 激光器.可使用因子

表 1 9 款典型激光器的参量和评价因子

Table 1 The Q factor and some parameters of 9 typical types of lasers

序号	型号	参数	波长 (μm)	M^2	Q ($As=0$)	Q ($As=1\text{mm}$)
1	DH-HN1700	1.4mm, 0.8mrad	0.6328	1.4	1.1	\
2	LDS-0870	10 × 1mm, $14^\circ \times 55^\circ$	0.87	1.4	2.3	7.3
3	LDM-0808	20 × 1mm, $10^\circ \times 40^\circ$	0.808	1.5	2.4	8.2
4	LDM-0808	50 × 1mm, $10^\circ \times 40^\circ$	0.808	2.4	3.7	12.9
5	LDM-0808	100 × 1mm, $10^\circ \times 40^\circ$	0.808	3.4	5.3	18.2
6	LDM-1450	100 × 1mm, $11^\circ \times 45^\circ$	1.45	2.1	6.0	11.9
7	HPD-1005	50 × 1mm, $10^\circ \times 38^\circ$	0.808	2.3	3.5	12.2
8	HPD-1010	100 × 1mm, $10^\circ \times 38^\circ$	0.808	3.3	5.0	17.3
9	HPD-1020	200 × 1mm, $10^\circ \times 38^\circ$	0.808	4.7	7.1	24.5

Q 比较 He-Ne 激光器和半导体激光器的准直代价, 进而评价其光束质量.

(2) 比较具有相同波长和发散角的 3~5 款和 7~9 款半导体激光器, M^2 因子简单的反映了 $L_{//}$ 的影响; 比较具有相同波长和发光单元尺寸的 4、7 款和 5、8 款半导体激光器, M^2 因子简单的反映了 θ_{\perp} 的影响; 而因子 Q 则加强了 $L_{//}$ 、 θ_{\perp} 的影响, 兼顾了像散因子 A_s 的影响, 更能反映它们对准直难度的影响.

(3) 由第 2 和第 6 款可知, 因子 Q 还兼顾了波长的影响.

综上所述, 半导体激光器的 M^2 因子不能客观的反映发光尺寸、大发散角和像散的影响, 而评价因子 Q 兼顾了波长、像散的影响, 且随发光单元尺寸和发散角的变化而变化, 其中 $L_{//}$ 和 θ_{\perp} 起主要作用.

3 结论

用光束准直时所付出的代价来评价光束质量, 并利用半导体激光器的自身参量 (L , θ 和 A_s) Q 因子直观地描述准直代价, 可以较好地反映出光束准直的难易程度. Q 因子值越小, 此光束准直时所付出的代价越小, 容易准直, 这样的半导体激光器发出的光束质量越好.

REFERENCES

[1] Siegman A E. Lasers[M]. Mill Valley California, University Science Books, 1986:642—913.

- [2] Siegman A E. Defining the effective radius of curvature for a nonideal optical beam[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1991, **27**:1146—1148.
- [3] Hunziker G, Harder C. Beam quality of InGaAs ridge lasers at high output power[J]. *Appl. Opt.* 1995, **34**: 6118—6122.
- [4] Zhou G C, Zhao D M, Wang S M. Semiconductor laser with beam quality factor $M^2 < 1$ [J]. *Opt. Comm.* 2001, **187**: 395—399.
- [5] Gao X, Ohashi H, Okamoto H, et al. Beam-shaping technique for improving the beam quality of a high-power laser-diode stack[J]. *Opt. Lett.* 2006, **31**:1654—1656.
- [6] Su Z P, Lou Q H, Dong J X, et al. Beam quality improvement of laser diode array by using off-axis external cavity [J]. *Optics Express*, 2007, **15**:1776—11780.
- [7] Lin J P, Zeng X D, An Y Y. A method for evaluating beam quality of laser diode[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (蔺敬平, 曾晓东, 安毓英. 激光二极管光束质量评价方法. *量子电子学报*), 2005, **22**:550—553.
- [8] Su Z P, Lou Q H, Dong J X, et al. A novel technique for improving beam quality of high power laser diode arrays [J]. *Acta Phys. Sin.* (苏宙平, 楼祺洪, 等. 改善高功率半导体激光器阵列光束质量的一种新方法. *物理学报*), 2007, **56**:5831—5834.
- [9] Kang X P, He Zh, Lv B D. The beam quality of vectorial nonparaxial Hermite-Laguerre-Gaussian beams [J]. *Acta Phys. Sin.* (康小平, 何仲, 吕百达. 矢量非傍轴厄米-拉盖尔-高斯光束的光束质量. *物理学报*), 2006, **55**:4569—4574.
- [10] Cao C, Weber H, The problem with M^2 [J]. *Opt. Laser Tech.* 2000, **32**(4):221—224.
- [11] Gao W, Qiao G L, Wang Y P. The evaluating factor and its characteristics of laser beams[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*. (高卫, 乔广林, 王云萍. 激光光束质量的评价参数及其特性分析. *飞行器测控学报*), 2002, **21**(2):17—21.