

波前分割 DOE 阵列半导体激光器光束的品字形整形

石振东^{1,2}, 李森峰^{1,2}, 邱传凯¹, 姚 军¹, 周崇喜¹

- (1. 中国科学院光电技术研究所 微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 半导体激光器(LD)输出光束受工作电流、个体差异的影响,发散角、输出光强出现波动。常规衍射光学元件(DOE)的激光光束整形设计只针对特定的输入输出光场,使用宽容度比较小。文中在 LD 的整形中利用 DOE 阵列化的处理,输入光场被分割成许多小单元,不同强度的光重新在成像平面内预定的区域内叠加,实现对光束的整形。用均匀平面波设计阵列 DOE 每个单元,把高斯分布的球面波整形成品字形光强分布,衍射效率为 90.53%,均匀性大约为 96%;发散角在快、慢轴方向上 2°~16° 的范围内变化,均匀性为 95.8%以上、衍射效率为 90%以上;在高焦量±16 μm 内,光束质量变化不大。阵列 DOE 提高了 LD 光束整形系统的稳定性。

关键词: 阵列衍射光学元件; LD 光束整形; 变发散角; 均匀性

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0616-05

Shaping laser diode beam into three rectangles by a DOE array to divide input wavefront

Shi Zhendong^{1,2}, Li Miaofeng^{1,2}, Qiu Chuankai¹, Yao Jun¹, Zhou Chongxi¹

- (1. State Key Laboratory of Optical Technologies for Micro-fabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The intensity distribution and the divergence of the laser diode (LD) output beam are variable with the different operating current and individual differences. The design of conventional diffractive optical element(DOE) to shape LD beam depends on the intensity distribution of the LD input and output beam, so the tolerance for the input LD beam is very small. A DOE array was put forward to shape the LD beam into three rectangles. It consisted of many DOE units, and each DOE unit could shape the corresponding small segment wavefront into needed output shapes, and all light diffracted by all DOE units was super-positioned on the output plane. Using the above DOE array laser shaped method, three rectangles intensity distribution were realized from Gaussian beam with the diffraction efficiency of 90.5% and the uniformity of 96%. When the half divergence angle of the LD varied from 2° to 16° in slow and fast axis direction respectively, the diffraction efficiency maintain was approximate 90% and its uniformity was more than 95%. When the defocus of the lens to collimate LD beam varied from -16 μm to 16 μm,

收稿日期:2012-07-05; 修订日期:2012-08-03

基金项目:中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室开放课题

作者简介:石振东(1985-),男,博士生,主要从事微光学应用方面的研究。Email:likeszd@163.com

导师简介:周崇喜(1970-),男,研究员,主要从事微纳光学元件及其在激光技术中的应用方面的研究。Email:cxzhou@ioe.ac.cn

numerical experiments indicate that uniformity and the diffraction efficiency of the shaped beam by the DOE array do not vary. The stability of the LD beam shaping system is improved.

Key words: DOE array; LD beam shaping; variable divergence angle; uniformity

0 引言

半导体激光器(LD)具有超小型、高效率、长寿命、可直接调制等一系列优点,被广泛应用于医疗、材料加工、激光雷达等领域。由于其特殊的工作原理,半导体激光器输出的光束在垂直于结平面方向和平行于结平面方向是非对称的,输出光束为像散椭圆高斯光束^[1]。而在很多实际应用过程中,往往需要特殊分布的输入光束,这就需要对 LD 激光进行整形。根据光的传输特性,常用的光束整形的方法有折射整形法、反射整形法、衍射整形法等。衍射光学元件(DOE)由于其自由度多而能够实现传统光学难以完成的微小、阵列、集成及任意波面变换等功能,因此在光束整形方面有着广泛的应用前景^[2]。常规整形 DOE 是针对特定的输入、输出激光设计的,所以衍射元件的使用宽容度比较小。而半导体激光器输出激光束受驱动电流、个体差异的影响,发散角、输出光强受此影响而出现波动^[3-4],导致现有的整形 DOE 对输入 LD 激光的宽容度要求很高,无法完成大动态范围内 LD 激光的整形。因此文中提出利用一种 LD 激光整形 DOE 阵列,该 DOE 阵列首先对输入波前进行分割,每一单元均对该分割波面内的区域激光进行整形,在输出面内实现所要求的光场分布,在成像平面上不同分割单元的衍射光波重新叠加在一起,所得图形是单元元件衍射因子和阵列元件干涉因子共同作用的整形结果。针对主动激光探测等天线所需的输出激光分布,利用了阵列 DOE 器件对输入光大的宽容度特性,设计了品字形光强分布的衍射光学元件阵列,如图 2 所示,并分析了发散角变化和离焦时输出平面上光束质量的变化情况。

1 单元 DOE 设计

由奈魁斯特(Nyquist)抽样定理可知,抽样频率应大于最大衍射频率两倍,即 $\Delta x \leq 1/(2 \cdot U_{\max})$,其中, U_{\max} 为最大的衍射频率, $U_{\max} = \sin \theta_{\max} / \lambda$, θ_{\max} 为最大的衍射角, λ 为激光波长, Δx 为空域的抽样间隔,抽样关系

如图 1 所示。输入平面 XOY 内 $U_i(x_i, y_i)$ 的光场在距离输入平面距离 Z_d 的输出平面 X'O'Y' 的光场分布 $U_o(x, y)$, 当满足夫琅和费近似条件 $Z_d \gg [\pi(x^2 + y^2)]_{\max} / \lambda$ 时,其光场分布可以用夫琅和费衍射公式(1)进行计算,

$$U_o(x, y) = \frac{1}{j\lambda Z_d} \exp\left[ik\left(Z_d + \frac{x^2 + y^2}{2Z_d}\right)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_i(x_i, y_i) \exp\left\{-\frac{ik}{Z_d}[(xx_i + yy_i)]\right\} dx_i dy_i \quad (1)$$

式中: λ 为光波波长; $k = 2\pi/\lambda$ 。利用傅里叶变换,由已知的输入和输出光场分布,通过多次傅里叶变换及其逆变换的迭代来得到 DOE 面上的相位分布。常用的 G-S 迭代算法具有简单,收敛速度快的特点,但也存在着对初始值敏感、约束条件严格、易陷入局部最优解等问题。自适应加法算法(A-A)算法作为 G-S 算法的改进算法,克服了 G-S 算法的缺点。为此,采用 G-S 算法与 A-A 算法相结合的改进算法,作为 LD 光束整形 DOE 单元相位优化迭代算法。

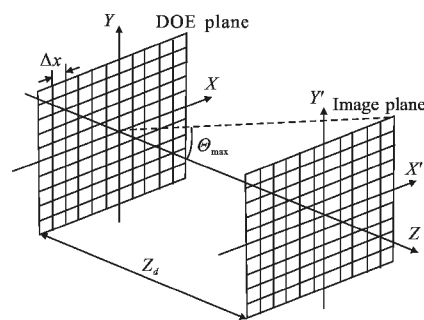


图 1 输入、输出平面内抽样关系

Fig.1 Sampling relationship of input and output plane

2 阵列 DOE 半导体激光光束整形元件设计

DOE 阵列化的想法来源于成像微透镜阵列^[5-6],阵列单元对其输入光进行相位调制,在输出靶面上生成所需光场分布。阵列单元都具有近似相同的相位及振幅分布,根据傅里叶变换位移定理,每个阵列单元在输出靶面上产生的衍射图样的位置和形状与输入 DOE 单元的位置无关,而仅与其相位有关。因此所有整形 DOE 单元的输出在靶面上进行叠加,不

会影响最终输出靶面的光场分布。

在满足抽样定理后,选取总像素为 $N_x \times N_y$ 的 DOE 阵列,其中 $N_x = n_x \times m_x$, $N_y = n_y \times m_y$, $n_x \times n_y$ 是每一单元 DOE 的抽样像素, m_x 、 m_y 是水平及垂直方向上的阵列单元数;衍射光学元件阵列化后,将入射光波的波前进行分割,当阵列数达到一定数量时,不管入射光场如何分布,对阵列单元来说,其输入均可近似看成均匀平面波,因此阵列化结构对输入变化不敏感。令 $y_0=0$ 或 $x_0=0$,阵列单元沿着 X 方向或 Y 方向复制和平移,公式(2)是阵列衍射光学元件的输出光强分布计算公式。由公式(2)可以看出,光束经过阵列型衍射光学元件整形后,由两部分组成:前半部分是阵列单元的衍射;后半部分是阵列的干涉影响^[7]。

$$I_0(x_0, y_0=0) = \left| \frac{\sin\left(\frac{m_x}{2} \delta_x\right)}{\sin\left(\frac{\delta_x}{2}\right)} \right|^2 \left| c \times F \left\{ \sqrt{I_{ia}(x_{ia}, y_{ia})} \times \exp[i\varphi_{ia}(x_{ia}, y_{ia})] \right\} \right|^2 \quad (2)$$

式中: $\delta_x = -2\pi w_{iax} x_0 / (\lambda \cdot f)$; c 为与光学系统相关的函数; $i_a(x_{ia}, y_{ia})$ 是阵列单元的输入; $\varphi_{ia}(x_{ia}, y_{ia})$ 是阵列单元 DOE 的相位分布; $I_i(x_i, y_i)$ 是衍射光学元件前的输入光强分布; w_{iax} , w_{iay} 为阵列单元的长和宽; $I_0(x_0, y_0=0)$ 为像平面上光强分布。

3 数值模拟分析

针对品字形光强分布输出的单点 LD 激光光束,进行了 DOE 阵列整形设计。图 2 为输出激光的理想光强分布。单点激光的波长为 905 nm,子午和弧矢方向的发散角分别为 $25^\circ \times 9^\circ$,发光区大小为 $1 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$,像散值为 $\Delta Z_0 = 16.8 \mu\text{m}$,即等效的两个点光源相距 $16.8 \mu\text{m}$ ^[8]。为了保证较高的能量利用率,将 DOE 置于 LD 发光区 $Z_0 = 13.7 \text{mm}$ 处,那么 LD 在该位置处的光场分布可用公式(3)表示。 w_x 、 w_y 为在 z_0 时 X、Y 方向上光斑半径。把光源近似成点光源^[9],为了获得准直 LD 光束,在 DOE 前面加上平凸镜进行相位补偿,透镜的曲率半径为 $R_1 = z_0(n_1 - n_0)$,其中 $n_0 = 1$, $n_1 = 1.45$,那么输入光场的复振幅分布即可用公式(4)表示,那么整个 LD 整形光路如图 3 所示。

$$U_0 = \exp[-(x^2/w_x^2 + y^2/w_y^2)] \times \exp[jk(x^2 + y^2) \cdot n_0 / (2 \cdot z_0)] \quad (3)$$

$$U_i = U_0 \times \exp \left\{ jk \times \frac{x^2 + y^2}{2R_1} n_0 + \left[\frac{(w_x^2 + w_y^2)}{2R_1} - \frac{(x^2 + y^2)}{2R_1} \right] n_1 \right\} \quad (4)$$

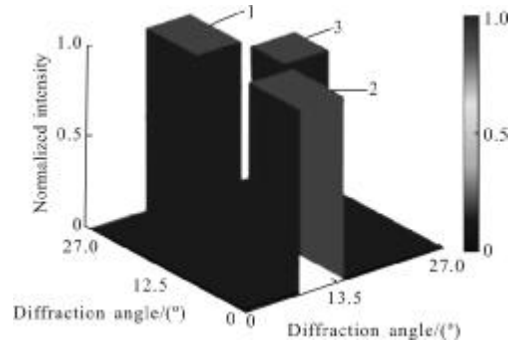


图 2 光强分布

Fig.2 Distribution of light intensity

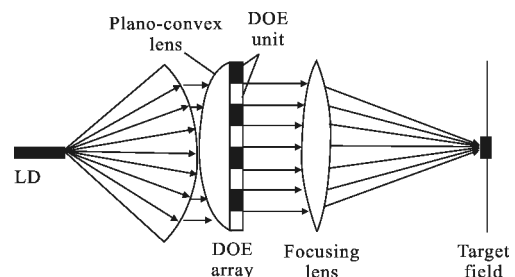


图 3 整形光路

Fig.3 Schematic diagram of LD beam shaping

衍射光学元件的整形效果主要通过以下两个性能指标来进行评价:衍射效率及光强均匀性。衍射效率定义为输出平面期望区域内的总光强与输出平面内总光强之比。均匀性定义为:

$$\beta = 1.0 - \sqrt{\sum_{k=1}^K (I_k/\bar{I} - 1)^2 / (K-1)} \quad (5)$$

式中: \bar{I} 为期望区域内的平均光强, $\bar{I} = \sum_{k=1}^K I_k / K$ 。

在阵列 DOE 整形元件的设计中,在单元 DOE 的相位优化设计时,以均匀分布的平面波作为入射光场进行相位迭代运算。这里的整形 DOE 元件由 4×4 阵列单元构成,每个单元的抽样点数为 270×270 像素,每个抽样像素的尺寸为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。为了进行比较,也同时设计了常规 DOE 整形元件,其像素为 1080×1080 ,每个抽样像素的尺寸也为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。当输入光束为高斯分布时,两种 LD 整形 DOE 均采用 G-S 算法结合 A-A 算法进行整形元件相位的优化设计。由于常规 DOE 本身就是针对高斯光束来设计的,因此衍射效率和均匀性相对都非常地好;阵列 DOE 是按均匀光束来设计,虽然衍射效率低于常规 DOE 约 3.5%,但是其均匀性和常规 DOE 结果基本相同,保持高的光束质量,具体整形效果见表 1。

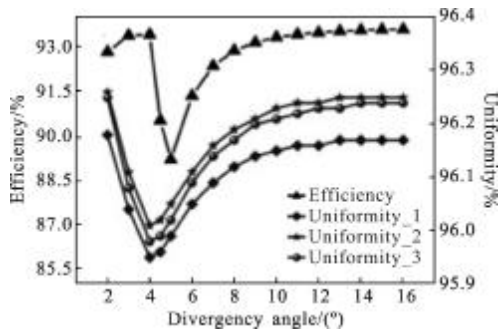
表 1 高斯光束入射常规和阵列 DOE 整形效果
 Tab.1 Shaping effect of conventional and array DOE using Gaussian beam as the input beam

Kind of DOE	efficiency/%	Uniformity_1/%	Uniformity_2/%	Uniformity_3/%
Conventional DOE	94.00	95.94	95.95	95.98
DOE array	90.53	95.96	96.12	95.99

LD 实际使用过程中,由于工作电流、个体差异等因素使得激光器的发散角发生变化,最终导致入射到 DOE 表面的光场发生改变。对于单模高斯光束来说,就是入射到 DOE 表面的光束半径发生了变化。根据激光传输公式,可以推导出光斑半径与发散角的变化见公式(6):

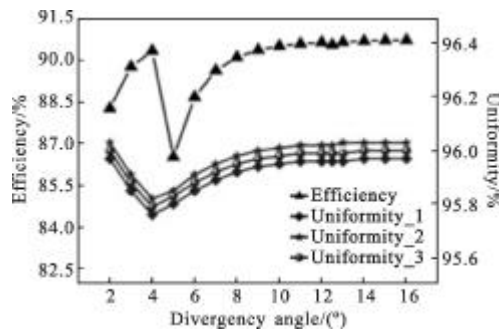
$$w^2(z) = \lambda^2 / (\pi^2 \cdot \tan^2 \theta) + \tan^2 \theta \cdot z^2 \quad (6)$$

式中: θ 为发散角; λ 为波长; z 是 LD 到 DOE 的距离; $w(z)$ 是光斑半径。分别计算了当发散角从 2°变化到 16°时,阵列化 DOE 及常规 DOE 整形元件输出光斑的均匀性及衍射效率变化情况如图 4 所示。



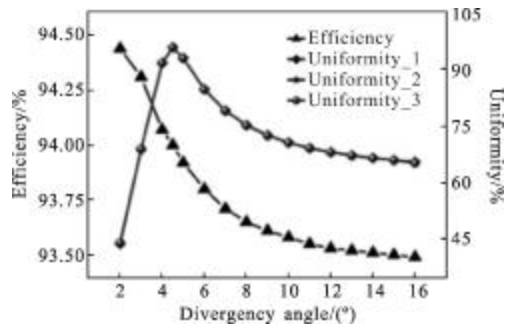
(a) 阵列 DOE 整形在快轴方向上发展散角变化引起衍射效率和均匀性变化

(a) Variation of the diffractive efficiency and the uniformity with the divergence angle in the fast direction in DOE array shaping



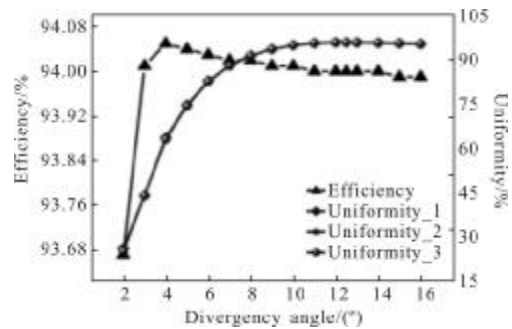
(b) 阵列 DOE 整形在慢轴方向上发散角变化引起衍射效率和均匀性变化

(b) Variation of the diffractive efficiency and the uniformity with the divergence angle in the slow direction in DOE array shaping



(c) 常规 DOE 整形在快轴方向上发散角变化引起衍射效率和均匀性变化

(c) Variation of the diffractive efficiency and the uniformity with the divergence angle in the fast direction in conventional DOE shaping



(d) 常规 DOE 整形在慢轴方向上发散角变化引起衍射效率和均匀性变化

(d) Variation of the diffractive efficiency and the uniformity with the divergence angle in the slow direction in conventional DOE shaping

图 4 阵列 DOE 和常规 DOE 整形在快轴和慢轴方向上发展散角变化与衍射效率和均匀性关系图

Fig.4 Diagram of the diffractive efficiency and the uniformity with the divergence/angle in the fast and slow direction in DOE array shaping and conventional DOE shaping respectively

从图中看出,阵列 DOE 能在很宽的范围内保持衍射效率大于 90%,均匀性大于 95.8%。而常规 DOE 虽然衍射效率在 93%~94%之间,均匀性大于 95%区域仅仅在快轴方向 10°~16°之间,而在慢轴方向上整个变化范围内的均匀性都小于 95%,常规 DOE 光束质量受发散角的变化比较明显。模拟结果表明阵列 DOE 可以解决发散角变化带来的光束质量下降的问题。实现了光束发散角大宽容度的光束整形,有效提高了光束整形系统的稳定性。

此外,实际使用过程中,由于激光器与准直单透镜之间的位置误差,如离焦及光源像散等,使输入光

场发生很大变化,导致整形输出光强的均匀性及衍射效率变差。为此,计算了准直透镜在不同离焦时输出整形光斑的均匀性及衍射效率。因为 LD 光源的像散为 $16.8 \mu\text{m}$,所以选择了在光源像散范围内变化。图 5 为阵列 DOE 和常规 DOE 在不同离焦量时的整形结果。计算结果表明:阵列 DOE 在 $\pm 16 \mu\text{m}$ 内保持衍射效率大于 90%和均匀性大于 95%;阵列 DOE 和光源之间可以存在一定的位置误差,也证明了对于阵列 DOE 来说,点光源无像差的近似是合理的。而常规 DOE 对离焦量的变化特别的敏感,均匀性变化剧烈。

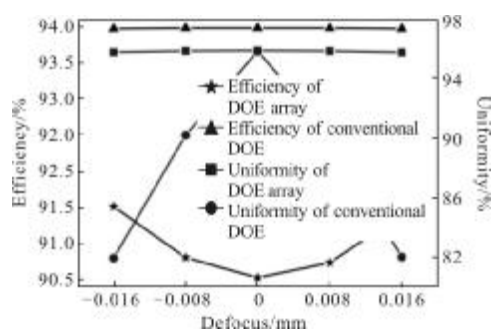


图 5 在阵列 DOE 和常规 DOE 整形中,LD 与平凸镜之间距离变化引起的效率和均匀性的改变

Fig.5 Variation of diffractive efficiency and uniformity with the distance between the plano-convex and LD in DOE array shaping and conventional DOE shaping respectively

4 结论

采用波前分割阵列衍射光学元件实现 LD 激光光束的特殊分布的整形变换,实现了在高斯球面波与均匀平面波入射时,阵列 DOE 保持了相近的衍射效率和均匀性,提高了常规衍射光学元件激光光束整形时对输入激光宽容度,解决了常规 DOE 不能解决的输入激光的发散角、光强分布变化时的整形瓶颈。通过数值模拟得到了结果分析,在保证光束的衍射效率和均匀性的前提下,允许激光器发出的光束在发散角、光强分布在一个相对较大范围内波动,从

而保证半导体激光器光束整形系统的稳定性,改善了整形衍射光学元件的宽容度。

参考文献:

- [1] Pan Chunyan, Cui Qingfeng, Tong Jingbo, et al. Optical design of laser diode beam-shaping system with variable divergence angle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1288-1292. (in Chinese)
- [2] Yu Jianjie, Tan Liying, Ma Jing, et al. Progress on beam shaping of high-power laser diode arrays [J]. *Laser Technology*, 2008, 45(4): 35-40. (in Chinese)
- [3] Zhou Zhen, Qi Zhongliang, Qin Yong. Design of driving method for low power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2689-2693. (in Chinese)
- [4] Hou Liqun, Fan Zhongwei, Wang Peifeng, et al. Thermal management configuration of laser diode end-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 424-428. (in Chinese)
- [5] Zhang Xi, Wu Zhuoliang, Zhao Shanghong, et al. Analysis on coupling efficiency of external cavity-based spectral beam combination system with microlens array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 901-905. (in Chinese)
- [6] Qiu Yue, Fan Dianyan. Using pure-phase element array to generate uniform laser focal profiles[J]. *Chinese Journal Of Laser*, 1996, B5(3): 253-258. (in Chinese)
- [7] Li Yuanyuan, Qiu Chuankai, Xin Tingwei, et al. Shaping the unstable laser beam using DOE array[C]//SPIE, 2010, 7848: 78481x.
- [8] Zhou Chongxi. Error analysis to linear laser diode astigmatism-free collimator of diffractive optical elements[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(6): 515-517. (in Chinese)
- [9] Mert Serkan, Hulya Kirkici. Optical beam-shaping design based on aspherical lenses for circularization, collimation, and expansion of elliptical laser beams[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 230-241.