

衍射微透镜阵列用于半导体激光光束匀化

刘志辉^{1,2}, 石振东^{1,2}, 杨欢¹, 李国俊¹, 方亮¹, 周崇喜¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出了一种用衍射微透镜阵列对半导体激光光束进行匀化的方法, 解决了折射型微透镜阵列难于实现高填充因子、高精度面型的难题。基于标量衍射理论, 设计了具有多阶相位结构的衍射微透镜阵列。采用菲涅耳衍射公式, 推导了半导体激光从输入面到输出面的光场计算公式。数值模拟了成像型微透镜阵列匀化系统, 并研究了微透镜口径及相位台阶数对焦斑均匀性的影响。结果表明: 当衍射微透镜的口径 $D=0.27$ mm、相位台阶数 $L=16$ 时, 可获得不均匀性约为 $\pm 5\%$ 、系统能量可利用率达 97% 的均匀焦斑。

关键词: 光束匀化; 衍射光学; 半导体激光器; 微透镜阵列

中图分类号: TN245 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2092-05

Homogenization of semiconductor laser using diffractive micro-lens array

Liu Zhihui^{1,2}, Shi Zhendong^{1,2}, Yang Huan¹, Li Guojun¹, Fang Liang¹, Zhou Chongxi¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve the problem that the high fill factor and accuracy of the refractive lens are difficult to realized, a new approach for homogenization of semiconductor laser by using diffractive micro-lens array was proposed. And diffractive micro-lens array with phase steps based on the theory of scalar diffraction was designed. The equation of intensity distribution in the focal plane was derived by the Fresnel diffraction equation. The imaging homogeneous system of diffractive micro lens array was simulated and the influences of diameter and phase steps of diffractive micro-lens on the intensity distribution were studied. The results show that the non-homogeneity about $\pm 5\%$ and energy efficiency over 97% of the focal speck can be achieved with micro-lens diameter of 0.27 mm and phase steps of 16.

Key words: beam homogenization; diffractive optic; semiconductor laser; micro-lens array

收稿日期: 2013-11-07; 修订日期: 2013-12-12

基金项目: 中国科学院开放课题 (JTJG201206)

作者简介: 刘志辉 (1988-), 男, 硕士生, 主要从事激光光束整形方面的研究。Email: lzhdear@126.com

导师简介: 周崇喜 (1970-), 男, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事微纳光学激光光束整形变换方面的研究。Email: cxzhou@ioe.ac.cn

0 引言

半导体激光器具有高效率、小体积、低成本、高可靠性等优点,在工业、军事、医疗等领域中有着广泛的应用^[1-4]。均匀照明是实现这些应用的关键手段,尤其激光泵浦、激光加工等对光束的均匀性有着严格的要求。而半导体激光光束的均匀性较差,在快轴方向的光束强度成高斯型分布,需要通过光学系统对其进行光束整形匀化。

目前,主要的光束匀化方法有光纤波导法和微透镜阵列法^[5]。光纤波导法基于光纤的全反射原理,将远场的光场耦合进光纤,通过光束在光纤中的多次反射后在近场形成平顶光束达到光束匀化的目的。光纤波导法的缺陷是光纤束很长,体积大,能量损耗严重,光亮度低。微透镜阵列法是基于微透镜阵列对激光光束的输入波前分割,被分割的每一个小波面经过后续光学系统在焦平面叠加而获得强度均匀分布的光斑,即先微分后积分的过程。微透镜阵列匀化系统因其效率高、体积小、匀化效果好而被广泛应用。常用的微透镜阵列一般由非球面的折射微透镜排列而成,但由于制作工艺的限制,非球面折射微透镜的面型不易控制,而且在工艺过程中存在过渡区,导致效率较低。而衍射型微透镜阵列具有设计简单、面型容易控制、阵列间填充比高等优点,因此文中提出采用衍射微透镜阵列对半导体激光光束进行匀化。

1 衍射微透镜阵列匀化系统设计

1.1 原理简介

衍射微透镜阵列匀化系统的原理如图 1 所示。

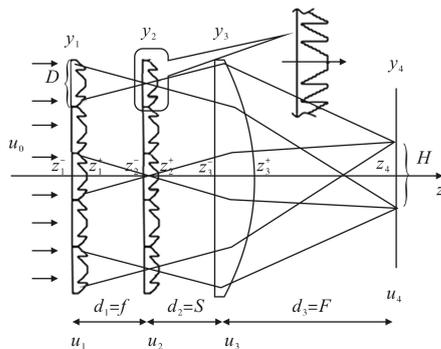


图 1 衍射微透镜阵列匀化系统原理图

Fig.1 Principle of homogeneous systems with two diffractive micro-lens arrays

匀化系统由两列参数相同的微透镜阵列及场镜构成。准直后的入射光束经过第一列微透镜阵列后被分割成许多子光束并聚焦于第二列微透镜阵列,最后通过第二列微透镜阵列及场镜将第一列微透镜阵列的每一个子口径内的光场分布成像于场镜的后焦面。设微透镜的口径为 D , 焦距为 f , 场镜的焦距为 F , 且第二列微透镜阵列到场镜的距离 $s=0$, 则焦平面上光斑的尺寸为^[6]:

$$H = D \times \frac{F}{f} \quad (1)$$

1.2 衍射微透镜阵列的理论设计

衍射微透镜是将连续面型的折射微透镜以 2π 为周期进行量化得到的多相位台阶结构,如图 1 中放大的微透镜所示。设 L 为衍射微透镜的相位台阶数, N 为微透镜的波带数, M 为相位台阶的序列号,则相邻波带的光程差为 λ 。那么依此设计出的多相位台阶衍射微透镜的透射比函数^[7]为:

$$T(y) = \sum_{M=1}^{NL} \exp\left(\frac{-i(M-1)2\pi}{L}\right) \times \text{rect}\left[\frac{|y| - \frac{\sqrt{M} + \sqrt{M-1}}{2} r_p}{(\sqrt{M} - \sqrt{M-1}) r_p}\right], r_p = \sqrt{\frac{2\lambda f}{L}} \quad (2)$$

式中: r_p 为第 1 个台阶的半径。

1.3 衍射微透镜阵列匀化系统的光路计算

如图 1 所示:一束单色平面波入射,依次经过第 1、2 列衍射微透镜阵列及场镜,最后在焦平面获得光强均匀分布的平顶光束。由于半导体激光光束在慢轴方向的均匀性比快轴好很多,仅考虑对快轴方向的光束进行一维匀化。经快轴准直器准直后的半导体激光在快轴方向的振幅呈高斯分布,故设其振幅分布为:

$$u_0 = A_0 \exp\left(\frac{-y_0^2}{\omega_0^2}\right) \quad (3)$$

式中: A_0 为振幅; ω_0 为束腰半径。由于微透镜阵列及场镜的宏观尺寸远远大于其厚度,在计算过程中将它们当作理想的薄透明屏处理。微透镜阵列及场镜的透射比函数^[8]分别为:

$$T_1(y) = T_2(y) = \sum_{m=-n}^n \delta(y - mD) \otimes \text{rect}\left(\frac{y}{D}\right) \times \sum_{M=1}^{NL} \exp\left(\frac{-i(M-1)2\pi}{L}\right) \times \text{rect}\left[\frac{|y| - \frac{\sqrt{M} + \sqrt{M-1}}{2} r_p}{(\sqrt{M} - \sqrt{M-1}) r_p}\right] \quad (4)$$

$$T_3(y) = \exp\left(-j\frac{ky^2}{2F}\right) \quad (5)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$; m 为微透镜的序列号; $T_1(y)$ 、 $T_2(y)$ 分别为第 1、第 2 列衍射微透镜阵列的透射比函数。光束经过薄透明屏时, 屏后复振幅分布为屏前复振幅分布与屏透射比函数的乘积, 即:

$$u(y, z^+) = u(y, z^-)T(y) \quad (6)$$

式中: z^- 、 z^+ 分别为屏前、屏后的轴向坐标。光束经过自由空间时的光场计算可由菲涅耳公式获得^[9]:

$$u_o(y_o, z_o) = \frac{\exp(jkd)}{jd\lambda} \exp\left(j\frac{k}{2d}y_o^2\right) \int_{-\infty}^{\infty} u_i(y_i, z_i) \times \exp\left(j\frac{k}{2d}y_i^2\right) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda d}y_i y_o\right) dy_i \quad (7)$$

式中: d 为光束在自由空间传播的距离。在系统的光路计算过程中, 光场经过 3 次相位调制及 3 次自由空间传播后, 在焦平面得到振幅分布 u_o 及强度分布 I_{out} 。

$$I_{out} \propto |u_o|^2 \quad (8)$$

焦斑的均匀性可通过光强的均方根 M_{RMS} 值及峰谷 M_{p-v} 值来评价:

$$M_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k - \bar{I})^2}{n-1}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: I_k 和 \bar{I} 为焦斑各点的光强及其平均光强; n 为光强的取样点数。

$$M_{p-v} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: I_{max} 为光强的最大值; I_{min} 为光强的最小值。

系统的能量利用率^[10]定义为焦斑的能量利用率与衍射光学元件的衍射效率之积:

$$\eta = \frac{\text{大于 } 0.9\bar{I} \text{ 部分的能量}}{\text{输出焦斑总能量}} \times \left[\text{sinc}^2\left(\frac{1}{L}\right)\right]^2 \times 100\% \quad (11)$$

2 衍射微透镜阵列匀化系统的数值模拟

2.1 参数设计

选择波长 $\lambda=808 \times 10^{-6}$ mm, 振幅 $A_0=1$, 束腰半径 $\omega_0=0.9$ mm, 宽度 $width=2.4$ mm 的半导体激光光源。衍射微透镜的口径 $D=0.16$ mm, 焦距 $f=1.25$ mm, 需要的微透镜数 $n=width/f=15$, 衍射微透镜的相位台阶数 $L=1.25$, 为了在焦平面内获得 30 mm 的均匀焦

斑, 由公式(1)可得场镜的焦距 $F=300$ mm。半导体激光光源在快轴方向的强度分布如图 2 所示。

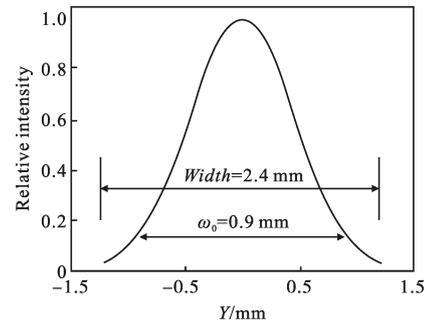


图 2 半导体激光光源在快轴方向的强度分布

Fig.2 Intensity distribution of LD source at fast axis

2.2 结果分析

按照 1.3 节所述的光路计算及 2.1 节提供的参数进行数值模拟。入射光束经过匀化系统之后在焦平面内的相对光强分布如图 3 所示。可以看出, 光斑的总体尺寸约为 30 mm, 与理论预期的大小相符。然而光斑的强度分布并不均匀, 每隔 1.516 mm 出现一个光强主极大值, 在相邻峰之间又有 13 个次极大值, 次极大值的强度较主极大值可忽略不计。因此, 焦斑呈现出明暗相间的条纹分布, 这种现象的产生是子光束经不同微透镜聚焦后在目标平面产生了多光束干涉的缘故。

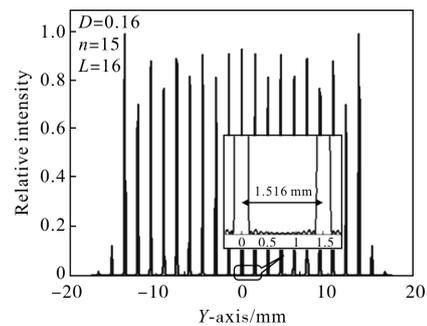


图 3 焦平面内的光强分布

Fig.3 Intensity distribution in focal plane

半导体激光具有较高的相干性, 微透镜阵列将光束分割并聚焦后相当于众多的相干光源, 相干光源之间的距离约为微透镜口径 D , 在自由空间传播的距离即为场镜的焦距 F 。对于波长为 λ 的平面波发生多光束干涉时, 设微透镜的个数为 n , 则在主极大之间有 $n-1$ 个极小值, 又在极小值之间必有一个最大值, 故在主极大值之间有 $n-2$ 个次极大值。

光强主极大值的位置由下式决定:

$$y=j\frac{F\lambda}{D} \quad (j=0,\pm 1,\pm 2,\dots) \quad (12)$$

而相邻主极大值之间的距离满足:

$$\Delta y=\frac{F\times\lambda}{D} \quad (13)$$

由公式(1)和(13)可知,焦斑内主极大值的密度为:

$$N=\frac{H}{\Delta y}=\frac{D}{f}\times\frac{D}{\lambda} \quad (14)$$

将 $F=300\text{ mm}$, $\lambda=808\times 10^{-6}\text{ mm}$, $D=0.16\text{ mm}$ 代入公式(15),可得 $\Delta y=1.515\text{ mm}$,与模拟结果相吻合。由此可知,干涉效应对光斑的强度分布进行了调制,且呈多光束干涉图样。又因为 $D\gg\lambda$,即 $\lambda/D\ll 1$,所以此时的衍射效应可忽略不计。

2.3 系统优化

2.3.1 衍射微透镜口径对焦斑均匀性的影响

为了研究衍射微透镜口径对焦斑均匀性的影响,保持微透镜的相对孔径 D/λ 及相位台阶数 L 一定,逐步增大微透镜口径。焦斑的评价数据如表 1 所示,焦面内焦斑的相对强度分布如图 4 所示。结果表明:当 $D=0.27\text{ mm}$, $n=9$ 时,焦斑整体的均匀性最好,焦斑的均方根及峰谷值分别为 $M_{\text{RMS}}=3.06\%$ 、 $M_{\text{P-V}}=10.52\%$,系统的能量利用率 $\text{Efficiency}=97.23\%$ 。由公式(13)、(14)可知,当 $n>9$ 时,虽然波前分割较为充分,但随着微透镜口径 D 的减小,主极大值之间的间距增大;同时,微透镜数的增多使次极大值的数目增多,从而导致焦斑呈明暗相间的条纹状分布,均匀性变差。反之,当 $n<9$ 时,主极大值之间的间距减小,次极大值的数目递减,使得焦斑内暗条纹减少,明条纹增多,

表 1 微透镜口径增大后焦平面内焦斑强度分布数据

Tab.1 Data of intensity distribution in focal plane after increasing diameters of diffractive micro-lens

Diameter	Number	RMS	P-V	Efficiency
0.16	15	8.37%	17.58%	95.76%
0.18	13	6.00%	16.78%	97.32%
0.22	11	3.25%	10.44%	97.32%
0.27	9	3.06%	10.52%	97.23%
0.34	7	4.85%	12.81%	94.98%
0.48	5	3.83%	12.56%	97.12%
0.80	3	2.79%	14.55%	97.35%

强度起伏较为平缓, M_{RMS} 值减小,多光束干涉效应对焦斑强度的调制减弱。但由于微透镜数目太少,波前分割不充分,使焦斑的强度分布有“塌肩”现象,当 $n=3$ 时尤为明显。因此,只有当微透镜口径及其数量取最优组合时才能获得强度均匀的焦斑。

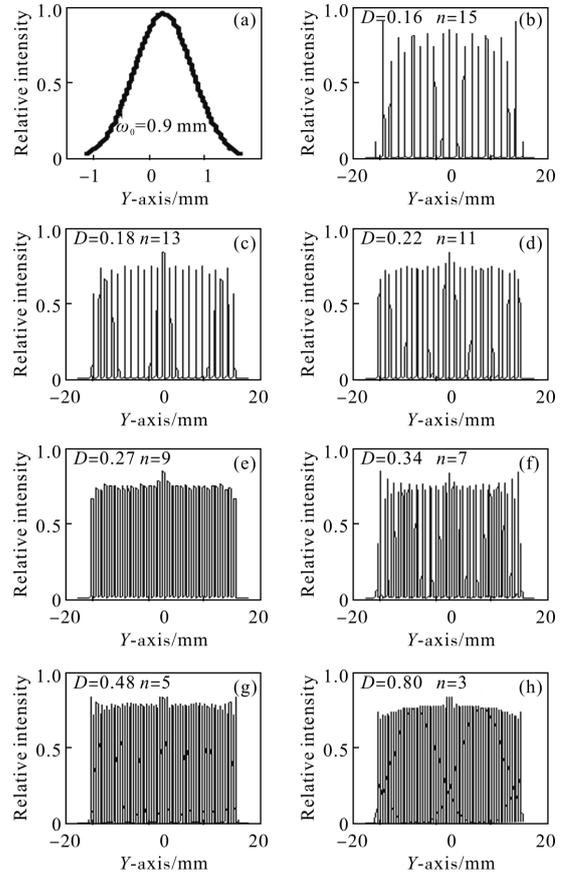


图 4 相对孔径及相位台阶数一定时不同口径的微透镜阵列在焦平面内的相对光强分布

Fig.4 Relative intensity distribution in focal plane with different diameters, the same relative diameters and phase steps of micro-lens array

2.3.2 微透镜相位台阶数对焦斑均匀性的影响

从图 4(b)~(h)可以看出,当相位台阶数 $L=16$ 时,每个光斑中心都有一小段突起的光强包络破坏了光斑整体的均匀性,使其 $M_{\text{P-V}}$ 值增大。这种现象的产生是由于衍射微透镜是折射微透镜的量化,其近似程度与量化的台阶数 L 值有关, L 值越大,近似程度越高。因此,为了减小甚至消除中心突起的包络,可以通过增加微透镜的台阶数来减少这种影响。图 5 为在衍射微透镜的口径及其数量取最优的条件下,焦斑强度分布随相位台阶数 L 的变化图。随着相位台

阶数 L 的增大, 焦斑中心的突起包络逐渐窄小平缓, 直至消失。当 L 趋于无穷大时, 衍射微透镜的面型无限接近连续面型, 在效果上等效于折射型微透镜。

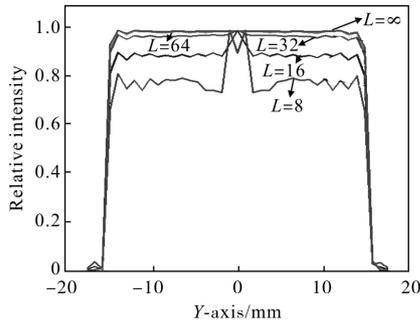


图 5 随相位台阶数 L 变化的焦斑光强分布图

Fig.5 Intensity distribution of beam with different phase steps L

表 2 示出光斑均匀性及能量利用率随相位台阶数的变化。

表 2 光斑均匀性及能量利用率随相位台阶数的变化
Tab.2 Homogeneity and energy efficiency of beam after increasing phase-steps of micro-lens

Types	L	RMS	$P-V$	Efficiency
Diffractive micro-lens array	8	6.84%	20.32%	89.78%
	16	3.06%	10.52%	97.23%
	32	1.92%	5.55%	99.18%
	64	1.72%	4.37%	99.65%
	∞	1.48%	3.66%	99.81%

由表 2 可知, 当 $L \geq 16$ 时, 光强的 RMS 值约为 5%, $P-V$ 大幅度降低, 系统的能量利用率均在 95% 以上。当 $L=64$ 时焦斑均匀性达到最佳, M_{RMS} 值及 M_{P-V} 值分别为 1.72%、4.37%。但在实际工程应用中, 当 $L \geq 32$ 时, 焦斑的均匀性及系统的能量利用率的提升幅度不是很大, 而工艺难度及加工成本迅速增加, 因此衍射微透镜的相位台阶数 L 可取 16, 此时焦斑的 M_{RMS} 值及 M_{P-V} 值分别为 3.06%、 $\pm 5\%$, 系统的能量利用率达 97.23%。

3 结论

文中从标量衍射理论及菲涅耳衍射公式出发, 建立了衍射微透镜阵列光束匀化系统模型并对其进

行了数值模拟, 着重研究了衍射微透镜的口径及相位台阶数对焦斑强度分布的影响。微透镜口径及其数量取最优组合时才能获得最优的匀化效果, 一方面抑制干涉效应对焦斑强度分布的调制, 另一方面增加波前分割的次数。衍射型微透镜是折射型微透镜的量化近似, 可适当增大相位台阶数 L , 使衍射微透镜在一定程度上逼近连续面型, 从而消除焦斑中心的突起, 有效地提高焦斑的均匀性及能量利用率。接下来将进一步研究系统的加工误差及装配误差对焦斑均匀性的影响以及怎样消除减小干涉效应, 这对利用衍射光学元件进行光束整形匀化具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Zhou Chongxi, Liu Yinhui, Xie Weiming, et al. Analysis and design of fiber coupled high-power laser diode array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11): 1296-1230. (in Chinese)
- [2] Huang Feng, Jia Wenwu, Hou Junyan, et al. Laser diode end-pumped coupling system applying multi-aperture beam integration principle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 437-441. (in Chinese)
- [3] Traub M, Hoffmann H D, Plum H D, et al. Homogenization of high power diode laser beams for pumping and direct applications [C]//SPIE, 2006, 6104: 61040Q1-61040Q10.
- [4] Frank K, Holger W, Peter B, et al. Successful diode laser material processing using application specific micro-optical beam shaping [C]//SPIE, 2007, 6824: 682403-1-682403-10.
- [5] Alexander B, Uwed Z. Wave optical analysis of light-emitting diode beam shaping using micro-lens arrays [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(10): 2393-2401.
- [6] Reinhard V, Kenneth J W. Laser beam homogenizing: Limitations and constraints [J]. *Optical Systems Design*, 2008, 7102: 71020J-1-71020J-12.
- [7] Jin Guofan, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 89-94. (in Chinese)
- [8] Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Jia Wenwu, et al. Fourier analysis of light beam uniformity based on the micro-lens array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 42(2): 119-123. (in Chinese)
- [9] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics [M]. Translated by Qin Kecheng et al. Beijing: Electronic Industry Press, 2006: 60-61. (in Chinese)