

激光表面改性3 kW 半导体激光器矩形光斑聚焦系统研究

许成文 钟理京 秦应雄 郭海平 唐霞辉

华中科技大学光学与电子信息学院激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 针对3 kW 半导体激光器应用于机器人表面改性系统, 聚焦光斑不均匀问题, 提出了一种采用菲涅耳透镜对面阵高功率半导体激光器输出光斑进行聚焦匀化的方法, 设计出尺寸为10 mm×2 mm的均匀矩形光斑。利用Zemax和Matlab软件进行仿真分析, 研究了菲涅耳透镜楞距和入射光发散角对聚焦系统焦斑均匀性的影响。结果表明, 当菲涅耳透镜楞距在1 mm以内时, 焦斑均匀性最佳约为94.90%。随着楞距的继续增大, 输出光斑均匀性会逐渐降低。当楞距增大到2.5 mm后, 光斑的均匀性不再随楞距的增大而变化, 基本稳定在93.85%左右。焦斑的均匀性会随着发散角的增大有所提高, 但是发散角太大会使聚焦难度增加, 而且光斑均匀性也随之劣化。当菲涅耳透镜楞距为1 mm, 入射光发散角在12.5~20 mrad范围内时, 焦斑均匀性最好约为95.22%。

关键词 激光器; 半导体激光器; 菲涅耳透镜; 表面改性; 矩形光斑

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0102001

Research on Focusing System of Rectangular Spot for 3 kW Diode Laser Used in Surface Modification

Xu Chengwen Zhong Lijing Qin Yingxiong Guo Haiping Tang Xiahui

National Engineering Research for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract For 3 kW diode laser used in robot surface modification system, the focal spot is uneven. A kind of focus and homogenization method by using the Fresnel lens for the focusing system of high power diode laser has been put forward, and a uniform rectangular spot of 10 mm×2 mm has been designed. Through the simulation analysis of Zemax and Matlab, the influences of the pitch of Fresnel lens and the divergence angle of incident rays on the homogeneity of the focal spot have been studied. The results show that the best uniformity of the focal spot is about 94.90% when the pitch of Fresnel lens is less than 1mm and the uniformity gets worse and worse with the increase of the pitch of Fresnel lens. As the pitch increases to 2.5 mm, it has less influence on the uniformity of the focal spot, and the uniformity basically stables at around 93.85%. Meanwhile, the uniformity will be improved with the increase of divergence angle, but large divergence angle will increase the difficulty of focusing and make the uniformity get worse and worse. When the pitch of Fresnel lens is 1mm and the divergent angle is from 12.5 mrad to 20 mrad, the best uniformity of the focal spot is 95.22%.

Key words lasers; diode laser; Fresnel lens; surface modification; rectangular spot

OCIS codes 140.2010; 140.3295; 140.3300; 140.3390

1 引 言

相比于传统的气体与固体激光器, 半导体激光器(DL)具有电光转换效率高、寿命长、体积小^[1]的特点, 人

收稿日期: 2015-05-27; 收到修改稿日期: 2015-08-03

作者简介: 许成文(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光光束整形等方面的研究。E-mail: forever-wen@163.com

导师简介: 唐霞辉(1963—), 男, 博士, 教授生导师, 主要从事激光器和激光加工等方面的研究。

E-mail: txh1116@hust.edu.cn(通信联系人)

们对它的应用前景充满期待。但是大光腔半导体激光器所固有的缺陷是快慢轴光束参量乘积(BPP)严重不对称,促使早些时候的研究者断言其BPP不可能优于灯泵Nd:YAG激光器^[2],即其应用只能局限于抽运源、材料表面处理、薄板切割和热传导焊接方面。

应用非相干合束技术(包括空间合束、波长合束和偏振合束),能使半导体激光器的输出功率密度成倍增加^[3]。在光束整形系统中,采用 N 种非相干合束技术,须增加 $2N$ 个光学元件,输出功率密度也对应增加 $2N$ 倍,例如Dilas的直接输出半导体激光系统,输出功率最高可达3 kW,效率在40%以上;Laserline的直接输出二极管激光器,其输出功率为500~6000 W,其为特殊客户量身定制的双激光系统中,可以使输出功率达到8 kW,并叠加不同波长的激光。然而,较多的光学元件降低了系统的稳定性,增加了光束整形的成本。真正使光束质量或功率密度有本质性的提高,是在光谱合束技术^[4-8]提出之后。原理上,经光谱合束的半导体激光器叠阵,其光束质量可以与单个DL单元相比拟。最成功的光谱合束结构是由MIT林肯实验室及其建立的Teradiode公司提出的基于衍射光栅光谱合束结构^[9],其高功率激光系统的输出可达5~8 kW,采用光纤耦合输出,芯径为100 μm ,光束参量乘积 $f_{\text{BPP}} < 6\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

高功率半导体激光器根据输出方式分类,可分为直接输出和光纤耦合输出^[10]。直接输出能任意调控输出光斑形状与尺寸,适用于对功率密度要求不高的场合。光纤耦合输出能获得更好的光束质量和光束均匀性,但是耦合难度大,对耦合前光束整形要求高^[11]。

半导体激光器的光斑形状与尺寸可任意调控是其另一大优势,Bachmann在其学术专著《High Power Diode Lasers: Technology and Applications》的引言部分说到“除了高效率外,半导体激光器可调控其光斑外形以匹配加工面的几何外形,为激光材料加工打开了全新的视野”。

本文旨在设计一种用于DL直接输出的聚焦光学系统,要求输出不同长宽比的均匀矩形光斑。文中分析了球面透镜组、柱面透镜组及球-柱混合透镜组存在的问题,提出一种基于菲涅耳透镜的聚焦系统设计思路,设计并实现了尺寸为10 mm×2 mm的均匀矩形光斑。菲涅耳透镜具有较高的设计自由度,通过改变菲涅耳透镜参数,理论上此方法可推广到获得任意长宽比的均匀矩形光斑的设计。

2 3 kW 半导体激光器直接光束整形系统

2.1 直接光束整形系统结构

半导体激光器直接光束整形系统一般包含:DL阵列、快轴准直(FAC)微柱面镜阵列、慢轴准直(SAC)透镜、聚焦系统^[12],结构如图1所示。本文的研究重点是高功率半导体激光器聚焦透镜组的设计,针对目前半导体激光器非球面聚焦系统无法输出任意形状光斑,以及柱透镜组无法输出均匀光斑的不足。提出了一种菲涅耳透镜聚焦系统,它能同时兼顾光斑形状和光斑均匀性,满足高功率半导体激光器应用于表面改性的要求。

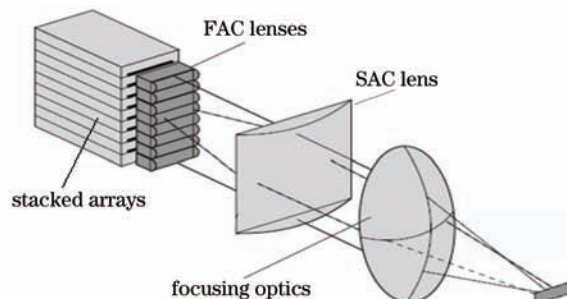


图1 半导体激光器直接光束整形系统结构图

Fig.1 Straight beam shaping system for diode laser

2.2 不同聚焦系统性能分析

目前,高功率半导体激光器直接光束整形聚焦系统设计方案主要有球面镜组、柱面镜组、球柱面镜组。采用球面镜组,如三分离物镜,能够很好地消除系统的球差和慧差,但由于进入聚焦系统前光束在慢轴方向上的非均匀分布导致聚焦光斑在快轴方向上始终是非均匀的。另外,球面镜组的一个显著缺陷就是无法灵活的控制输出光斑的形状。柱面镜组可以通过两片相互正交的柱面镜分别对快慢轴进行聚焦,可以实现任

意长宽比的矩形光斑输出。但是柱面镜仅仅是对沿快慢轴方向上的光斑分别进行简单的聚焦,而无法使得输出光斑均匀一致。若采用球柱面镜组,虽可以在一定范围内调整输出光斑形状,但其输出光斑的均匀性无法得到实质性的提高。因此,综合考虑以上聚焦系统的优缺点,针对特殊材料的表面淬火等对输出光束质量要求较高的场合,本文提出了一种运用菲涅耳透镜的聚焦系统,能够在控制输出光斑形状的同时,有效提高光斑的均匀性。

2.3 菲涅耳聚焦系统原理分析

由于聚焦系统的初始入射光场在快慢轴方向上的发散角仍然存在着差异^[13],为了得到均匀的矩形光斑,必须对快慢轴分别进行聚焦。如图2所示,经过准直的快慢轴光束进入菲涅耳聚焦系统,慢轴(X轴)方向上的光束被菲涅耳透镜分割重排进行聚焦,而快轴(Y轴)方向上的光束由于准直后发散角较小,仅通过一个柱面镜就能很好的聚焦,并且菲涅耳透镜与柱面镜相距 20 mm。通过设计菲涅耳透镜各楞高度角和柱面镜,就能根据需要灵活地控制输出光斑的形状和大小,并且输出均匀光斑。

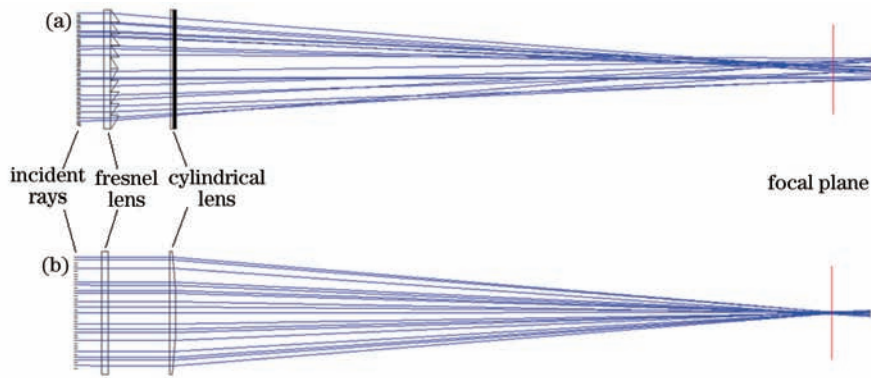


图2 菲涅耳聚焦系统原理示意图。(a)慢轴;(b)快轴

Fig.2 Schematic diagram of Fresnel focusing system. (a) Slow axis; (b) fast axis

3 菲涅耳聚焦系统设计

3.1 菲涅耳透镜理论设计

吴贺利等^[14]推导了菲涅耳透镜的统一设计公式,图3(a)为弧形基面菲涅耳透镜原理示意图,设一点光源处在光轴 F 点,它的光束从 F 点出发,经过透镜后到达另一侧 F' 点,则楞高度角 θ_i :

$$\theta_i = \omega'_i + \arctan \left[\frac{\sin \omega'_i \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2(u_i + \omega'_i)} - \cos \omega'_i \sin(u_i + \omega'_i) - \sin u'_i}{\cos u'_i - \cos \omega'_i \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2(u_i + \omega'_i)} - \sin \omega'_i \sin(u_i + \omega'_i)} \right]. \quad (1)$$

式中 $n = \frac{n_1}{n_2}$ ($n_1 = 1$ 为标准大气压下的空气折射率, n_2 为透镜材料的折射率), u_i 为第 i 楞入射光与光轴 FF' 的夹角, u'_i 为第 i 楞出射光与光轴 FF' 的夹角, f 和 f' 分别为 F 和 F' 到光轴 O' 点的距离, R 为菲涅耳透镜的圆弧曲率半径, r 为球冠的外廓半径, ω'_i 为第 i 楞透镜入射面的法线与光轴的夹角, θ_i 为第 i 楞的棱高度角。

根据上述统一的设计公式,给定相应的初始条件,可设计四种不同结构的菲涅耳透镜。其中,平板楞朝

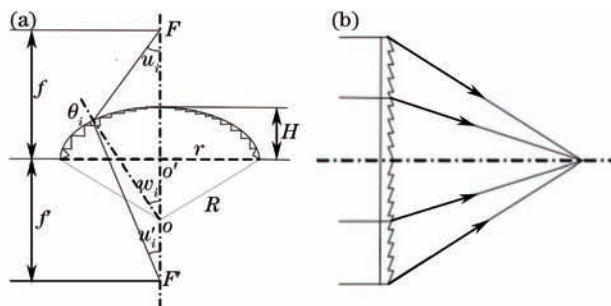


图3 菲涅耳透镜设计原理图。(a)一般菲涅耳透镜;(b)平板楞朝内菲涅耳透镜

Fig.3 Design principle diagram of Fresnel lens. (a) General Fresnel lens; (b) simple Fresnel lens with grooves facing inward

内的菲涅耳透镜的光学效率最高,因此本文主要研究平板楞朝内的菲涅耳透镜,原理如图3(b)所示。平板型楞朝内,那么, $f = \infty, u_i = 0, \omega_i = 0$, 则此时楞高度角为

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{\sin u_i'}{n - \cos u_i'}\right). \quad (2)$$

3.2 参数设计

本文的研究重点是经快慢轴准直后的光束的聚焦透镜组设计,如图4所示,DL阵列经快慢轴准直后,在距慢轴准直镜100 mm处设置聚焦透镜组。聚焦透镜组的入射光场尺寸为40 mm×36 mm的矩形,该矩形的最小外界圆半径 $r_{\min} \approx 26.907$ mm,光斑的有效尺寸为30 mm×36 mm,如图5所示。光束在快轴的发散角 $\theta_{\text{fast}} \leq 2.5$ mrad,光束在慢轴的发散角 $\theta_{\text{slow}} \leq 15$ mrad。

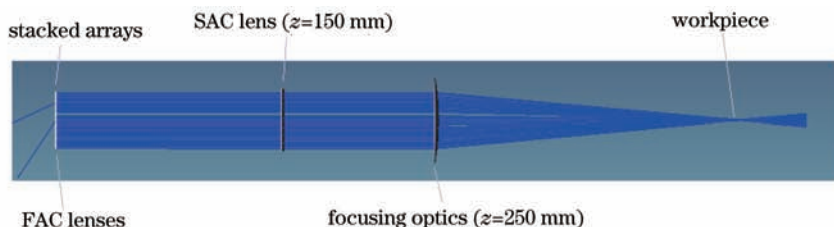


图4 直接光束整形仿真结构图

Fig.4 Simulation structure of straight beam shaping system

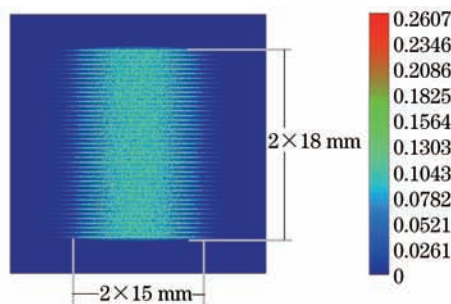


图5 聚焦系统入射光场图

Fig.5 Incident field of focusing system

设计的菲涅耳透镜尺寸为40 mm×40 mm,采用的材料为LAFN21,焦距 $f=400$ mm,入射光波长为980 nm,设计的聚焦系统输出光斑尺寸为10 mm×2 mm。

表1 聚焦系统设计初始参数

Table 1 Initial parameters of focusing system

Elements	Parameter	Value
Source	Wavelength /nm	980
	Super-gauss factor	$G_{\text{fast}}=1, G_{\text{slow}}=2$
	Width of single bar /mm	$W_{\text{fast}}=0.9, W_{\text{slow}}=0.5$
	Half divergence angle /mrad	$\theta_{\text{fast}}=2.5, \theta_{\text{slow}}=15$
Fresnel lens	Number of bars	41×76
	Material	LAFN21
Speck in focal plane	Length×Width×Thickness /(mm×mm×mm)	40×40×2
	Size /(mm×mm)	10×2

3.3 菲涅耳聚焦透镜系统的评价方法

光束聚焦匀化系统的优劣一般通过焦斑的均匀性来评价^[15]。焦斑均匀性可通过对焦斑强度的所有取样点取均方根 M_{RMS} 来表示:

$$M_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^n (I_p - \bar{I})^2}{n-1}} \times 100\%, I_p \geq 0.8I_{\text{max}}, \quad (3)$$

式中 I_{\max} 为最大输出光强值, I_p 为不小于 $0.8I_{\max}$ 的取样点光强值, n 为总取样点数, \bar{I} 为取样点光强的平均值。从定义式可以看出, 焦斑的均方根表征的是所有取样值对平均光强的偏离程度, M_{RMS} 值越大, 偏离程度越大, 光斑均匀性越差, 则光斑均匀性 M 可表示为

$$M = 1 - M_{\text{RMS}} \quad (4)$$

4 菲涅耳聚焦透镜组性能分析

4.1 透镜楞距对光斑均匀性的影响

当入射光快轴发散角 $\theta_{\text{fast}} = 2.5 \text{ mrad}$, 慢轴发散角 $\theta_{\text{slow}} = 15 \text{ mrad}$, 在菲涅耳透镜聚焦系统的焦距 $f = 380 \text{ mm}$ (距柱面镜后表面距离) 处, 输出光斑尺寸为 $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 时, 研究不同菲涅耳透镜楞间距对聚焦光斑均匀性的影响, 其结果如表 2 所示。

表 2 不同楞距菲涅耳透镜对聚焦系统输出光斑均匀性的影响

Table 2 Influence of pitch of Fresnel lens on the uniformity of focal spot

Pitch of Fresnel lens /mm	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Uniformity of focal spot /%	94.88	94.94	94.63	94.18	93.86	93.84

通过分析图 6 菲涅耳透镜楞距对光斑均匀性的影响图发现, 菲涅耳透镜楞距由 0.5 mm 增大到 1 mm 过程中, 其光斑均匀性变化不大, 均维持在 94.90% 左右。而随着楞距的继续增大, 输出光斑均匀性会逐渐降低。当楞距增大到 2.5 mm 后, 光斑的均匀性不再随楞距的增大而变化, 基本稳定在 93.85% 左右。分析其原因: 当 DL 单元光束入射到菲涅耳透镜后, 菲涅耳透镜楞距较小时, 每一个楞可以单独聚焦一个 DL 单元发出的

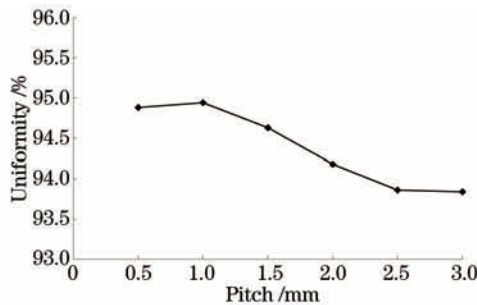


图 6 菲涅耳透镜楞距对光斑均匀性的影响图

Fig.6 Influence of pitch on uniformity of focal spot

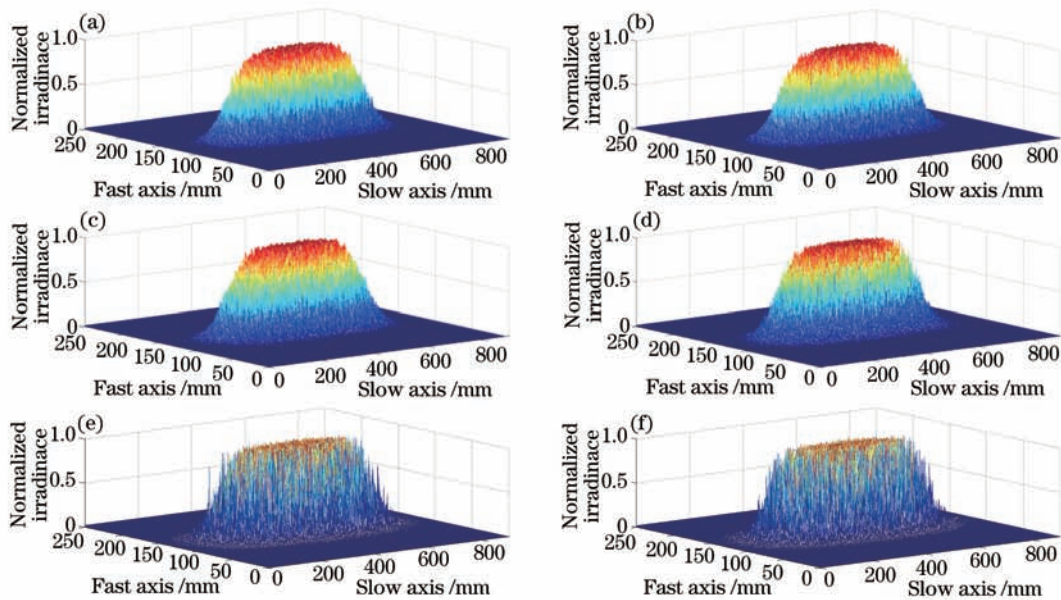


图 7 不同楞间距下焦斑三维图。(a) 0.5 mm ; (b) 1 mm ; (c) 1.5 mm ; (d) 2 mm ; (e) 2.5 mm ; (f) 3 mm

Fig.7 3D diagram of focal spot at different pitches. (a) 0.5 mm ; (b) 1 mm ; (c) 1.5 mm ; (d) 2 mm ; (e) 2.5 mm ; (f) 3 mm

光束,并将这些 DL 单元光束均匀有序的在焦平面处进行叠加,这样得到的光斑均匀性较好。但是当楞距继续增大后,每一个楞需要同时聚焦多个 DL 单元光束,这样 DL 单元光束间的暗区无法得到有效的填充,光斑的均匀性也会因此而降低。当楞距增加到 2.5 mm 以后,楞距对光斑均匀性的影响甚微。不同楞间距菲涅耳透镜聚焦系统输出光斑三维图如图 7 所示,光斑均匀性随着楞距的增大逐渐变差。

4.2 入射光发散角对光斑均匀性的影响

根据上节分析,选择楞距为 1 mm 的菲涅耳聚焦系统,分析入射光发散角对聚焦光斑均匀性的影响。由于快轴方向上经准直后发散角较小, $\theta_{\text{fast}} \leq 2.5 \text{ mrad}$, 仅通过一个柱面镜就能很好的聚焦。因此只需分析不同入射光在慢轴方向上发散角对菲涅耳聚焦系统的聚焦效果的影响,其结果如表 3 所示。

表 3 不同发散角对聚焦均匀性的影响

Table 3 Influence of divergence angle on uniformity of focal spot

Half divergence angle /mrad	0	2.5	5	7.5	10	12.5
Uniformity of focal spot /%	93.94	94.02	94.34	94.37	94.61	95.22
Half divergence angle /mrad	15	17.5	20	22.5	25	
Uniformity of focal spot /%	95.32	95.20	95.21	94.78	94.61	

通过分析图 8 入射光发散角对输出光斑均匀性的影响图发现,起初随着入射光慢轴发散角的增大,菲涅耳聚焦系统输出光斑的均匀性会逐渐提高。当发散角增加到 12.5 mrad 后,会出现一个 12.5~20 mrad 的平坦区,在此区域内光斑的均匀性较高,基本在 95.22% 附近波动。随着发散角的进一步增加,输出光斑均匀性逐渐降低。分析其原因,当入射光慢轴发散角较小时,被菲涅耳透镜聚焦后,每个 DL 单元光束在焦平面上不发生交叠,或者交叠区域有限,起不到匀化光斑的作用。只有当发散角增大到一定范围内(12.5~20 mrad),各 DL 单元光束才能在焦平面上较好的叠加,消除暗区,使输出光斑得到匀化。但是,当发散角超过 20 mrad 后,DL 单元光束在到达菲涅耳透镜前,已经交叠得很厉害,而菲涅耳聚焦系统对这种杂乱无章的光束起不到很好的聚焦匀化作用,所以光斑均匀性在下降。

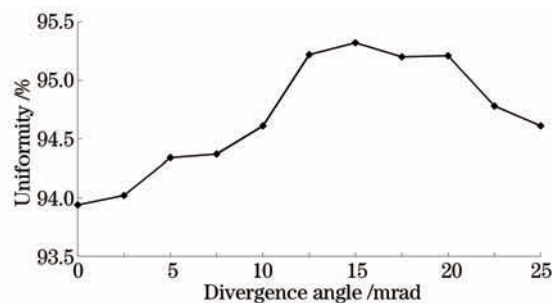


图 8 入射光发散角对聚焦均匀性的影响图

Fig.8 Influence of divergence angle on the uniformity of focal spot

如图 9 所示,随着慢轴(X 轴)方向上发散角的增大,聚焦光斑在慢轴方向上的展宽也迅速增大。因此,可以利用这些特性根据需要设计出所需尺寸的均匀矩形光斑。但是发散角增大后,聚焦光斑的下降沿也随之增大,严重降低了光斑的均匀性。因此,在设计均匀的矩形光斑输出时,要综合考虑入射光发散角。

5 实验结果与分析

5.1 输出光斑分析

通过上述分析,设计制作了楞间距为 1 mm 的菲涅耳透镜聚焦系统,通过菲涅耳透镜对慢轴方向的光束进行分割聚焦,柱面镜对快轴方向上光束进行聚焦,如图 10 所示,柱面镜与菲涅耳透镜相距 20 mm,系统的焦距 $f=380 \text{ mm}$,焦点处光斑大小为 $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。在此聚焦系统中,运用 Zemax 分别模拟仿真了焦点及离焦处的输出光斑,如图 11(a)所示。慢轴方向上光束经过菲涅耳透镜分割聚焦后,光斑在慢轴方向上,尺寸变化较小,而且光斑均匀。而在快轴方向上,光斑随着离焦量的减少,光斑尺寸迅速减小,并在焦点处达到最小值。分析可知,此聚焦系统的焦深在 20 mm 左右。

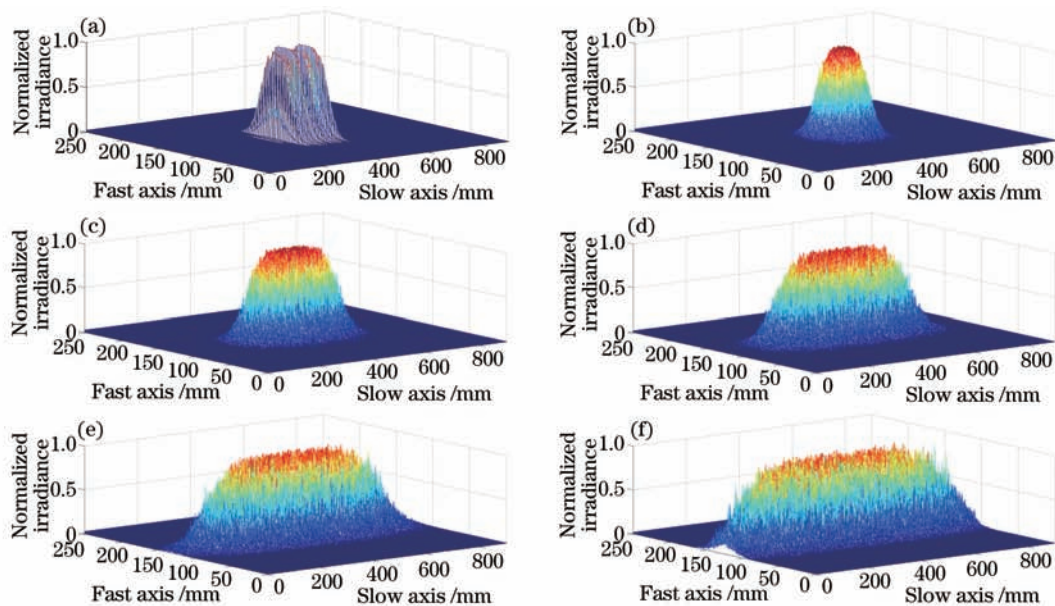


图9 不同入射光发散角(慢轴)下焦斑三维图。(a) 0 mrad; (b) 5 mrad; (c) 10 mrad; (d) 15 mrad; (e) 20 mrad; (f) 25 mrad
 Fig.9 3D diagram of focal spot at different divergence angles (slow axis). (a) 0 mrad; (b) 5 mrad; (c) 10 mrad; (d) 15 mrad; (e) 20 mrad; (f) 25 mrad

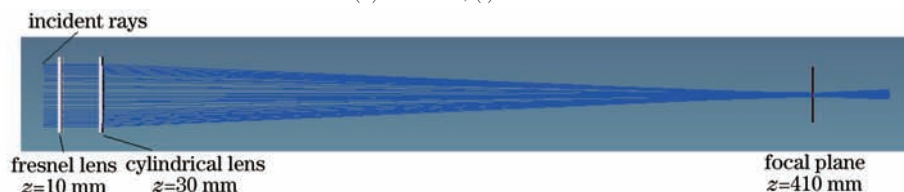


图10 菲涅耳聚焦系统图

Fig.10 Diagram of Fresnel focusing system

如图 11(b)所示,是实际测得的菲涅耳聚焦系统的输出光斑图,所用激光功率为 800 W,在钢块上作用时间为 1 s,可见不同位置处的实测光斑图与系统的模拟仿真图具有高度的一致性。离焦量越大,光斑在快轴方向上发散越大,光斑均匀性越差,光斑的功率密度越低,甚至出现两个峰值光斑。而在焦点附近,光斑形状均匀一致,功率密度较高,能够很好的满足表面改性处理。

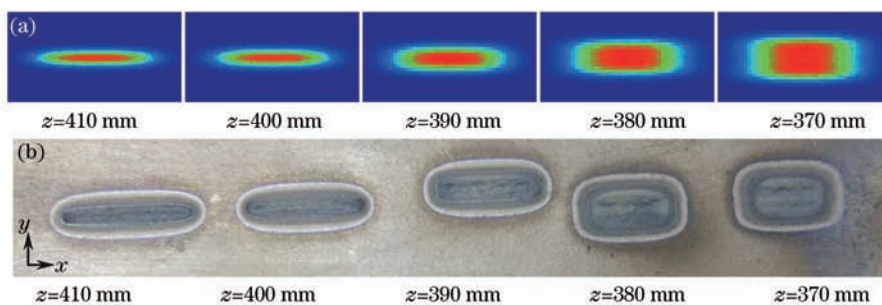


图11 离焦处输出光斑对比图。(a) 输出光斑Zemax 仿真图; (b) 输出光斑实验结果图

Fig.11 Output spot at different positions. (a) Zemax simulation diagram of output spot; (b) experimental diagram of output spot

5.2 表面淬火处理实验结果分析

运用设计的菲涅耳聚焦系统,分别利用上节分析的各点处的光斑进行了表面淬火实验,其结果如图 12 所示,所用半导体激光功率为 800 W,处理速度为 2.5 mm/s。不同位置处的输出光斑其形状和光斑均匀性存在较大差异,其淬火结果也各不一样。在焦点附近的均匀矩形光斑的淬火结果较为理想,处理表面均匀一致,纹路致密。而随着离焦量的增加,光斑均匀性严重降低,导致淬火表面疏松粗糙,不同位置处的处理效果相差甚远。

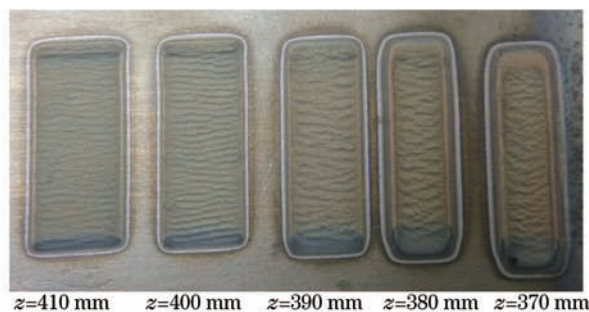


图12 不同位置输出光斑淬火实验结果图

Fig.12 Quenching diagram at different output spots

6 结 论

仿真和实验结果表明,菲涅耳透镜聚焦系统能够同时有效解决高功率半导体激光器输出光斑形状和均匀性问题,大大提高了高功率半导体激光器运用于表面改性时的效率和质量,其结论如下:

1) 菲涅耳透镜楞距由 0.5 mm 增大到 1 mm 过程中,其光斑均匀性变化不大,均维持在 94.90% 左右。而随着楞距的继续增大,输出光斑均匀性会逐渐降低。当楞距增大到 2.5 mm 后,光斑的均匀性不再随楞距的增大而变化,基本稳定在 93.85% 左右。因此,为了获得较高的光斑均匀性,菲涅耳透镜的楞距最好不超过 1 mm。

2) 随着入射光发散角(慢轴)的增大,菲涅耳聚焦系统输出光斑的均匀性会逐渐提高。当发散角增加到 12.5 mrad 后,会出现一个 12.5~20.0 mrad 的平坦区,在此区域内光斑的均匀性较高,基本维持在 95.22% 附近。随着发散角的进一步增加,输出光斑均匀性又逐渐降低。

3) 菲涅耳透镜具有更多的设计自由度,通过控制菲涅耳透镜的楞高度角可以灵活的设计其聚焦光斑的形状。但是,当入射光发散角增大时,其光斑展宽也迅速增大。因此,在设计均匀矩形光斑输出时,要综合考虑聚焦系统的入射光发散角以及菲涅耳透镜楞高度角的设计。

参 考 文 献

- 1 Wang Lijun, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.*. Development of high power diode laser[J]. *Chin J Lumin*, 2015, 36(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
- 2 Bachmann F G. Chances and limitations of high-power diode lasers[C]. *SPIE*, 2004, 5336: 95-106.
- 3 Zhu Hongbo, Hao Mingming, Peng Hangyu, *et al.*. Module of fiber coupled diode laser based on 808 nm single emitters combination[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0502001.
朱洪波, 郝明明, 彭航宇, 等. 基于 808 nm 半导体激光器单管合束技术的光纤耦合模块[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0502001.
- 4 Chann B, Goyal A K, Fan T Y, *et al.*. Efficient, high-brightness wavelength-beam-combined commercial off-the-shelf diode stacks achieved by use of a wavelength-chirped volume Bragg grating[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(9): 1253-1255.
- 5 Huang R K, Chann B, Missaggia L J, *et al.*. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2007, 19(4): 209-211.
- 6 Huang R K, Chann B, Glenn J D. Ultra-high brightness wavelength-stabilized kW-class fiber coupled diode laser[C]. *SPIE* 2011, 7918: 791810.
- 7 Hao Mingming, Zhong Hongbo, Qin Li, *et al.*. Research on transform lens in spectral beam combination for laser diode array[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0302006.
郝明明, 朱洪波, 秦莉, 等. 半导体激光阵列光谱合束技术中变换透镜的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0302006.
- 8 Meng Huicheng, Wu Deyong, Tan Hao, *et al.*. Experimental study on high brightness and narrow band of diode laser by spectral beam combining of grating-external cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0302003.
孟慧成, 武德勇, 谭昊, 等. 窄光谱高亮度半导体激光器光栅-外腔光谱合束实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0302003.
- 9 Liu Zhihui, Yang Huan, Shi Zhendong, *et al.*. Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive micro-lens array [J]. *Chinese J Lasers*, 2014(1): 0102005.
刘志辉, 杨欢, 石振东, 等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102005.
- 10 Ouyang Deqin, Ruan Shuangchen, Guo Chunyu, *et al.*. Research on all-fiber coupling between a diode laser and single-mode fibers[J].

- Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1205004.
- 欧阳德钦, 阮双琛, 郭春雨, 等. 半导体激光器与单模光纤的全光纤耦合技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1205004.
- 11 Behringer M. High Power Diode Lasers Technology and Applications[M]. 2007, New York: Springer, 2007: S-74.
- 12 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202010.
- 彭航宇, 顾媛媛, 单肖楠, 等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202010.
- 13 Wu Heli. The Research of Fresnel Concentrator for HCPV[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- 吴贺利. 菲涅耳太阳能聚光器研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- 14 Liu Zhihui, Shi Zhendong, Yang Huan, *et al.*. Homogenization of semiconductor laser using diffractive micro-lens array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2092-2096.
- 刘志辉, 石振东, 杨 欢, 等. 衍射微透镜阵列用于半导体激光光束匀化[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2092-2096.

栏目编辑: 宋梅梅