

基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析

殷智勇¹ 汪岳峰¹ 贾文武¹ 杨晓杰² 雷呈强¹ 强继平¹

(¹军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)
(²中国人民解放军 63898 部队, 河南 济源 454650)

摘要 为了提升高功率固体激光器抽运光束的均匀性,研究了成像型和非成像型光束积分系统光束匀化机理。从光斑尺寸、最大入射角及光斑均匀性三个方面,详细对比了两种积分系统的性能特点。分析表明,成像型光束积分系统不但具有更好的匀化效果,相比非成像型还降低了对半导体激光器(LD)光束准直的要求,并且可调整微透镜阵列间距实现光斑尺寸的改变,拓展了系统应用范围。经实验测试,在照明范围内 LD 阵列光束经成像型积分系统后光斑不均匀性小于 10%。

关键词 光学设计;均匀化;高斯光束;相干光

中图分类号 TN245 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0702007

Performance Analysis of Beam Integrator System Based on Microlens Array

Yin Zhiyong¹ Wang Yuefeng¹ Jia Wenwu¹ Yang Xiaojie²
Lei Chengqiang¹ Qiang Jiping¹

(¹Optics & Electrics Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)
(²The Unit 63898 of the People's Liberation Army, Jiyuan, Henan 454650, China)

Abstract In order to improve the pump beam homogeneity of high-power solid-state laser, the basic theory of beam homogenization with imaging and non-imaging beam integrator systems is analyzed. Mainly from three aspects, i. e., spot size, maximum incident angle and spot homogeneity, performances of both beam integrator systems are compared in detail. The analysis shows that imaging beam integrator system not only provides better homogenization effect and reduces the requirement of beam collimation than non-imaging beam integrator system, but also can change the distance between two microlens arrays in order to extend its applicable field. After passing through the imaging beam integrator system, the spot inhomogeneity of laser diode stacks is less than 10% in the illumination area.

Key words optical design; homogeneity; Gaussian beam; coherent light

OCIS codes 220.2945; 140.5560; 140.2020

1 引 言

大功率半导体激光器(LD)具有高功率、高转换效率及工作时间长等特点,已经成为高能固体激光器的主要抽运光源。但由于 LD 自身特性使得抽运光斑并不均匀,这将直接影响固体激光器功率水平的提高^[1~5]。为了实现均匀平顶型光场分布,需通

过光学系统对其进行激光光束整形。微透镜阵列(MLA)具有体积小、质量轻、传输损耗小等特点,构成的整形系统结构简单、使用灵活,得到了广泛的应用。Schreiber 等^[6,7]对基于微透镜阵列的整形系统进行了原理上的分析,并通过发光二极管照明微透镜阵列得到了高均匀度的光斑。在国内,黄峰等^[8]

收稿日期: 2012-03-06; **收到修改稿日期**: 2012-04-08

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 殷智勇(1984—),男,博士研究生,主要从事固体激光和激光光束整形技术等方面的研究。

E-mail: yzy8465@163.com

导师简介: 汪岳峰(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事固体激光器、光电检测技术等方面的研究。

E-mail: yfwang, OEC@163.com

通过光线追迹方法对空心导管、波导管、二元光学元件与微透镜阵列进行比较,其结论为微透镜阵列具有更好的匀化光束的能力。

为了进一步研究基于微透镜阵列的 LD 光束整形理论,本文以 LD 快轴方向上的高斯光束为入射波,运用菲涅耳衍射理论分析高斯光束经光束积分系统后所产生的干涉与衍射对光斑均匀性的影响,并比较非成像型与成像型微透镜阵列的匀束性能,从而为基于微透镜阵列的光束积分系统的研究和设计提供指导。

2 微透镜阵列匀束原理

基于微透镜阵列的光束积分系统包括非成像型与成像型两种。非成像型光束积分系统由单列 $m \times n$ 个微透镜阵列(子透镜孔径为 p , 焦距为 f_1) 和一焦距为 f_F 的傅里叶透镜(FL)组成^[9], 如图 1 所示。

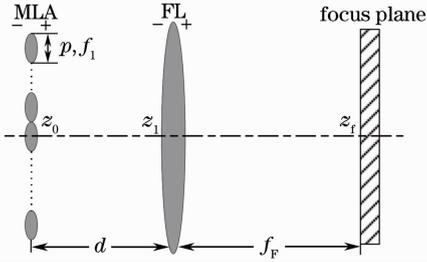


图 1 非成像型多孔径光束积分系统

Fig. 1 Non-imaging multi-aperture beam integrator system

微透镜阵列振幅透射比为 $T(x, y)$:

$$T(x, y) = \sum_{M=0}^m \sum_{N=0}^n \sigma(x - pM, y - pN) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{p}, \frac{y}{p}\right) \times \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2}{2f_1}\right), (1)$$

式中 \otimes 表示卷积。

成像型多孔径光束积分系统基于著名的 Kohler 照明系统。与非成像型不同,成像型系统由两列串联的微透镜阵列和一个傅里叶透镜组成^[10,11]。两列微透镜阵列形成多组平行的 Kohler 照明系统,其中每一子透镜都完全相同,两列之间距离为 d_1 。第二列微透镜阵列与傅里叶透镜间距为 d_2 ,系统中各光学元件参数与非成像型相同。如图 2 所示,第一列微透镜阵列将入射光束分割成大量的子光束,第二列微透镜阵列则与傅里叶积分透镜一起,将这些子光束的像重叠在焦平面处实现平顶型光强分布。

在实际中,不同应用对象及不同的菲涅耳数决

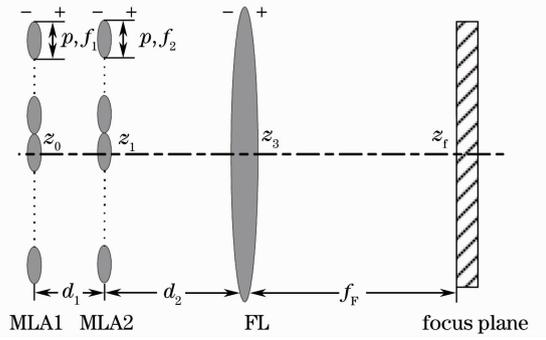


图 2 成像型多孔径光束积分系统

Fig. 2 Imaging multi-aperture beam integrator system

定着非成像型和成像型两种积分系统的使用范围。通常在菲涅耳数比较大的照明系统中,非成像型积分系统就可以很好地满足光斑均匀性要求。然而,对于高功率激光整形系统而言,菲涅耳数较小,成像型积分系统才是实现高度均匀平顶型远场分布的最佳选择。

基于微透镜阵列的光束积分系统可实现对入射光束的匀化作用,以下对非成像型与成像型两种光束积分系统进行重点分析。系统组成可分为两个部分:1) 单列或多列微透镜阵列,用来将入射光分割成子光束并改变相位;2) 光束积分或聚焦元件,实现子光束在目标平面处的积分叠加,在后焦面处进行平移叠加,使得光场分布最终趋于平顶型。

3 理论模型

选用高斯光束代替常用的理想平面波光源,对激光光束整形更具有实际意义。设入射光束为沿 z 轴方向传播的基模高斯光束

$$U(r, z) = \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \exp\left[ik \frac{r^2}{2R(z)}\right], (2)$$

非成像型多孔径光束积分系统如图 1 所示,从 z_0^- 平面到 z_0^+ 平面,

$$U(y_0, z_0^+) = U(y_0, z_0^-) T(y_0), (3)$$

从 z_0^+ 平面到 z_1^- 平面,传输距离为 d ,

$$U(y_1, z_1^+) = \frac{\exp(ikd)}{i\lambda d} \times U(y_1, z_0^+) \otimes \exp\left(ik \frac{y_1^2}{2d}\right), (4)$$

从 z_1^- 平面到 z_f 平面,

$$U(y_f, z_f) = \frac{\exp(ikf_F)}{i\lambda f_F} \times \frac{\exp(ikd)}{i\lambda d} \times \frac{\exp(iky_f^2)}{2f_F} \mathcal{F}\left[U(y_1, z_0^+) \otimes \exp\left(ik \frac{y_1^2}{2d}\right)\right]. (5)$$

经傅里叶变换后可知目标平面的光场分布为

$$U_i \propto \omega \exp\left(-\pi^2 \omega^2 \frac{y_i^2}{\lambda^2 f_F^2}\right) \otimes \sqrt{i\lambda R} \exp\left(-i\pi R \frac{y_i^2}{\lambda f_F^2}\right) \otimes p \operatorname{sinc}\left[(2n+1)p \frac{y_i}{\lambda f_F}\right] \otimes \exp\left[i\pi \left(\frac{f+f_F-d}{f_F}\right) \frac{y_i^2}{\lambda f_F}\right]. \quad (6)$$

成像型多孔径光束积分系统如图 2 所示,相对于非成像型多一列微透镜阵列,在计算中需要多一次卷积,同时引入列间距变量。当两列微透镜阵列间距为子透镜焦距时,目标平面处的光场分布为

$$U_i \propto \omega \exp\left(-\pi^2 \omega^2 \frac{y_i^2}{\lambda^2 f_F^2}\right) \otimes \sqrt{i\lambda R} \exp\left(-i\pi R \frac{y_i^2}{\lambda f_F^2}\right) \otimes p \operatorname{sinc}\left[(2n+1)p \frac{y_i}{\lambda f_F}\right] \otimes p \operatorname{sinc}\left[(2n+1)p \frac{y_i}{\lambda f_F}\right] \otimes \exp\left[i\pi \left(\frac{f+f_F-d_2}{f_F}\right) \frac{y_i^2}{\lambda f_F}\right]. \quad (7)$$

对比(6)式与(7)式可知,成像型系统相对于非成像型系统在光场分布解析式中多一项 sinc 函数,将入射光束进行两次分束积分的过程,使光斑更加趋于均匀。

4 性能比较

无论是在照明系统还是激光抽运系统中,光斑的均匀性都是最为重要的指标,尤其是在抽运高功率激光器时,直接影响着半导体抽运激光器的光束质量。下面就光斑尺寸、入射角及光斑均匀性三个方面对两种积分系统的性能进行对比分析。

4.1 光斑尺寸

入射光束经微透镜阵列及积分透镜的共同作用,在积分透镜的后焦面上子光束将成为一个扩展光斑,由这些扩展光斑叠加后形成照明光斑的图样。在理想叠加的情况下,叠加光斑具有和子光束扩展光斑相同的光斑尺寸和图样。对于非成像型光束积分系统,如图 1 所示,当系统中光学元件为理想光学元件时,子光束在积分透镜后焦面上的扩展光斑尺寸为

$$\begin{pmatrix} \theta_2 \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ f_F & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{f_F} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ d & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{f_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ p \end{pmatrix}. \quad (8)$$

当入射光为平行光时,可得

$$S = \frac{f_F}{f_1} p, \quad (9)$$

式中 θ_1, θ_2 为孔径角, S 为光斑尺寸,光斑尺寸与各光学元件间距无关。依此类推,如图 2 所示成像型多孔径光束积分系统在傅里叶积分透镜后焦平面出的光斑尺寸为

$$S = \frac{f_F}{f_1 f_2} (f_1 + f_2 - d_1) p. \quad (10)$$

从(10)式可以看出成像型多孔径积分系统目标平面处的光斑大小不但与微透镜的孔径、焦距以及积分透镜的焦距有关,还与两列微透镜阵列的间距有关。与非成像型相比,成像型系统具有光斑尺寸调节功能,适应不同尺寸光斑的需求。通过间距的调整,改变多孔径积分系统的缩束能力。

4.2 最大入射角

依据傅里叶光学的观点,可将具有发散角的光束分解为不同空间频率的平面波^[12]。同一入射角度的平面光束经微透镜阵列分割成多个子光束,其中通过子透镜中心的光线称为子光束的主光线,经过子透镜后出射光线的角度不变。那么对于具有入射角为 θ 的所有子光束的主光线,相当于角度为 θ 的平行光。

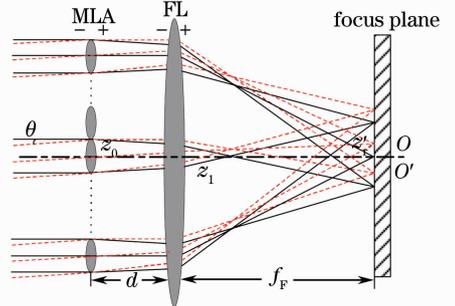


图 3 非准直光入射非成像型光束匀化系统原理框图

Fig. 3 Functional scheme of non-imaging beam integrator system with non-collimated beam

在非成像型多孔径积分系统中,子光束经傅里叶透镜积分在焦平面处得到扩展。当入射光为平行主光轴时,光斑中心位置为 O 。当入射光束发散角为 θ 时,光斑中心将产生 ΔO 平移量,这将会造成整形光斑的光斑尺寸扩展,抽运区域功率密度下降。依据表 1 中的具体参数,利用 Zemax 对非成像型光束匀化系统光束传输过程进行光线追迹。如图 4(a)所示,发散角为 4.5° 时,抽运区域光强分布均匀,随着入射光发散角增大,抽运区域光强分布越

不均匀,边缘锐度下降越快,整形效果将变差。如图 4(b)所示,抽运区域功率密度与发散角成线性负相关,抽运功率占总功率比值随发散角增大而不断下降。所以利用非成像型多孔径积分系统进行光束整形时,要求入射光束必须高度准直才能保证抽运

光斑良好的均匀性。

平移量 ΔO 的计算公式为

$$|O' - O| = \Delta O = f_F \tan \theta = \frac{pf_F}{f_1} \quad (11)$$

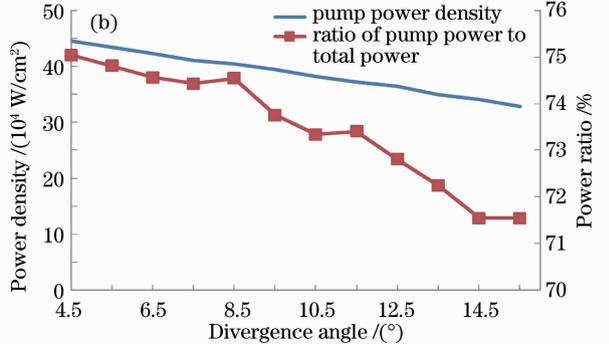
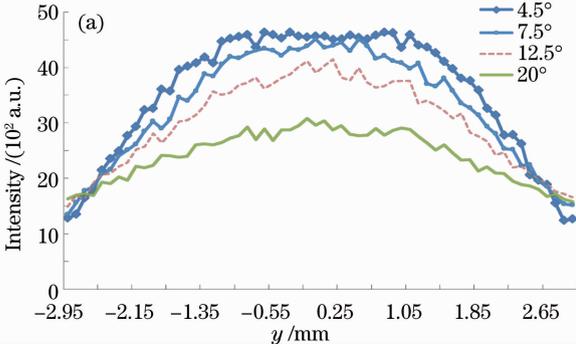


图 4 不同发散角光束入射非成像光束匀化系统。(a)光强分布(子透镜数值孔径为 0.09);(b)抽运区域功率密度及功率比

Fig. 4 Non-imaging beam integrator system with different divergence angle beams. (a) Light distribution (numerical aperture of lenslet is 0.09); (b) power density and power ratio

表 1 高斯光束及多孔径分束积分系统参数

Table 1 Physical parameters of Gaussian beam and multi-aperture integrator

Parameter	Value
Gaussian beam waist / μm	6
Divergence angle / ($^\circ$)	3
Wavelength / nm	808
Microlens aperture / μm	250
Radius of curvature / mm	0.38
Fourier lens focal length / mm	155

在成像型多孔径积分系统中,不同入射角入射的平行光束被第一组微透镜阵列分割为一系列子光束。如图 5 所示,当入射角为 $\theta = \theta_1 \leq \arctan(p/2f_1)$ 时,子光束入射到对应的第二子透镜孔径范围内。在两列间距为 $d = f_1$ 时,根据

$$y_2 = -\frac{f_F}{f_1} y_1 \quad (12)$$

可知,子光束在积分透镜的后焦面处的重合位置与入射角无关,从而使不同入射角 θ_1 的光束仍然能够在积分透镜后焦面完全重合,实现了均匀化的目的,并把 $\theta = \arctan(p/2f_1)$ 定义为微透镜阵列的接收角。

当入射角 $\arctan(p/2f_1) < \theta = \theta_2 < \arctan(3p/2f_1)$ 时(图 5 中灰色区域),光束经过第一子透镜聚焦至后组微透镜阵列的孔径平面上。其聚焦点高度 h 将大于子透镜的口径 p ,因此其聚焦点将超出第二子透镜的孔径范围而入射到其他的子透镜孔径,这样这些子光束的主光线不再是从子透镜的焦点入

射的光线,而是从其前焦面上一定高度的点入射的光线。其积分透镜焦平面处的扩展光斑相对于入射角为 θ_1 时位置发生了平移,并且不与入射到对应其他子透镜孔径范围的子光束的扩展光斑相重合。当入射光束的发散角太大时,较大角度的光束将不能在目标区域重合,会造成能量利用率的下降。但是与非成像型微透镜阵列不同,超出部分的光线与目标区域完全分开,表现为在目标区域外形成旁瓣。

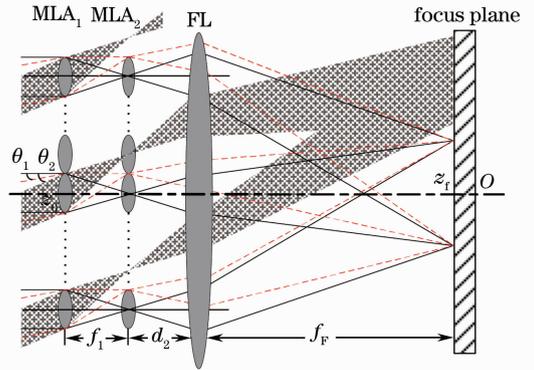


图 5 非准直光入射成像型光束积分系统原理框图
Fig. 5 Functional scheme of imaging beam integrator system with non-collimated beam

如图 6(a)所示,不同发散角的入射光束经成像型积分系统后光强分布都近似为平顶型,发散角的变化不会改变抽运区域平顶型光强分布,避免了光源中大发散角光线对光斑均匀性的影响。如图 6(b)所示,当入射角小于微透镜的最大接收角(约为 6°)时,功率密度及功率比基本保持不变,与理论分析相吻合。当发散角继续增加时,抽运区域

功率密度降低,当发散角为 15.5° 时功率密度较 4.5° 时下降了 28.1% 。成像型光束积分系统相比非成像型,对发散角的变化不敏感,但发散角过大时功率密度会受到严重影响。只有控制发散角在系统规定的最大入射角范围内才能达到最高的能量利用率,

获得高均匀性的扩展光斑。所以应用成像型光束积分系统时,应先对 LD 光源进行快轴准直,适当增大微透镜相对孔径以提高最大入射角,减小入射光束大发散角对光斑的影响。大功率抽运时,必须对 LD 慢轴方向发散角加以限制,以提高抽运功率密度。

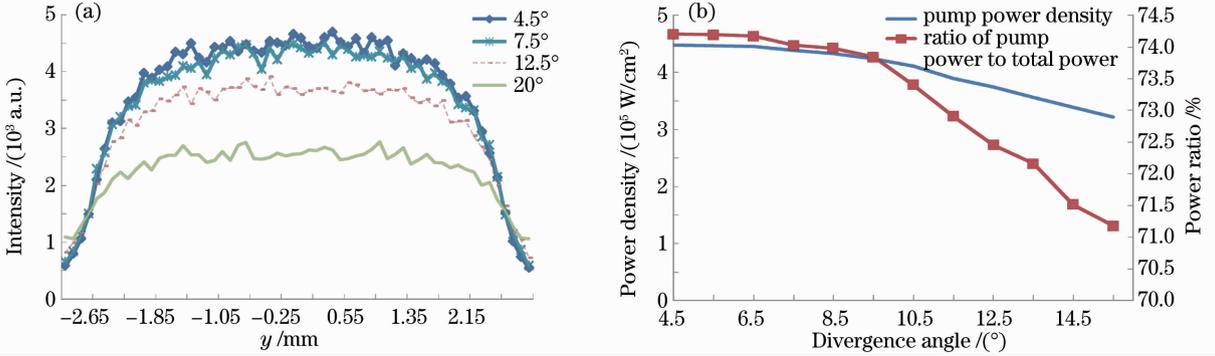


图 6 不同发散角光束入射成像光束匀化系统。(a) 光强分布;(b) 抽运区域功率密度及功率比
Fig. 6 Imaging beam integrator system with different divergence angle beams. (a) Light distribution;
(b) power density and power ratio

4.3 光斑均匀性

光斑的均匀性是评价光束积分系统最为重要的指标,通常用不均匀度(P)进行度量^[13],其定义为

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (13)$$

为了得到目标平面处更加均匀的扩展光斑,提高系统的能量利用效率,尽量选择大占空比微透镜阵列,即子孔径呈矩形。单一高斯光束经两种积分系统分束积分后,其光场分布如图 7 所示。由于是单一光源,所以在目标平面处的光场分布中存在大量的干涉条纹。在利用数值解分析光场分布时,在满足抽样定理的前提下,由于大量卷积符号的存在,抽样间隔不同,相对光强分布的图样差别很大。但在同样频率下抽样,非成像型积分系统相对于成像

型系统,光强分布出现局部高频成分,严重影响输出激光的光束质量,同时增大激光介质破裂的危险。

为了更准确地描述光束经两种积分系统的光场分布情况,对阵列的高斯光源进行光线追迹,经两种积分系统后光场分布如图 8 所示。光束经分束积分后趋于匀化,无明显干涉条纹存在,说明 LD 阵列不同的发光单元之间相干度较低,可视为非相干光,而且单一发光单元产生的干涉效应在充分重叠后已经对光斑均匀性无明显影响。相比非成像型积分系统,阵列高斯光束经成像型积分系统后远场分布更趋近于平顶型光斑。在抽运区域面积 $3.6 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$ 范围内不均匀性约为 8.0% ,明显优于非成像型积分系统。

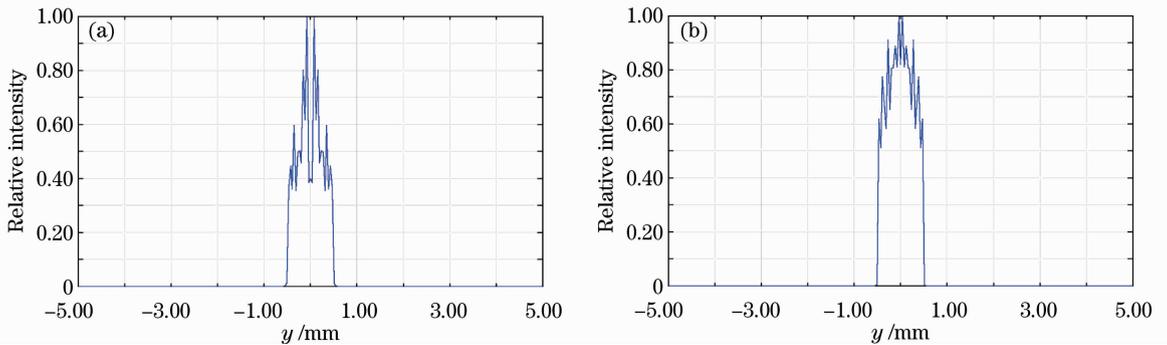


图 7 单一高斯光束经积分系统后目标平面处光场分布。(a) 非成像型;(b) 成像型
Fig. 7 Light field distribution of single Gaussian beam at objective plane. (a) Non-imaging beam integrator;
(b) imaging beam integrator

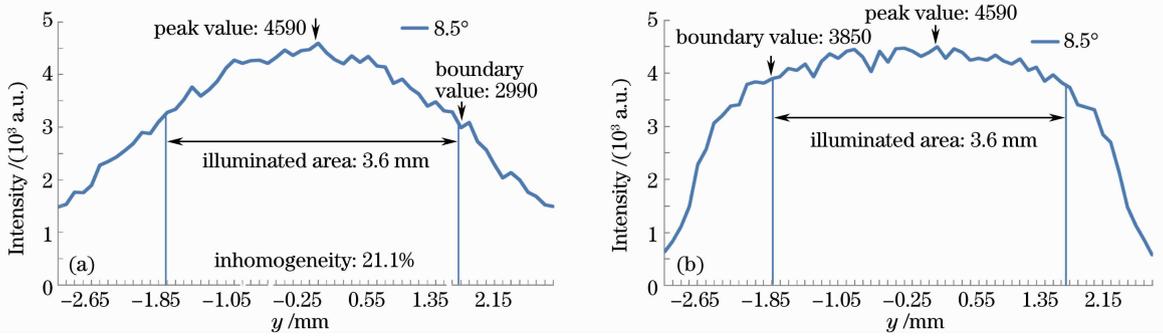


图 8 阵列高斯光束经积分系统后目标平面处光场分布。(a)非成像型;(b)成像型

Fig. 8 Light field distribution of stack array Gaussian beam at objective plane. (a) Non-imaging beam integrator; (b) imaging beam integrator

5 实验结果

经过对成像型光束积分器的分析,用 5 根 bar 条的 LD 阵列光束进行相应的验证实验,具体参数如表 2 所示。

如图 9(a) 所示,微透镜阵列尺寸 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 电流 50 A 时后焦面上的功率大小为 112.6 W。利用 CCD 观察积分透镜后焦面处的成像屏的光斑,面积约为 $3.8\text{ mm} \times 3.8\text{ mm}$,功率密度为 779.8 W/cm^2 ,照明区域不均匀性为 9.8%。实

测 LD 输出功率为 139 W,成像型积分系统的传输效率为 81%。

表 2 测量参数

Table 2 Measurement parameters

Parameter	Value
Cooling-water temperature / $^{\circ}\text{C}$	25
Hydraulic pressure /kg	5
Power supply current /A	50
Voltage /V	9

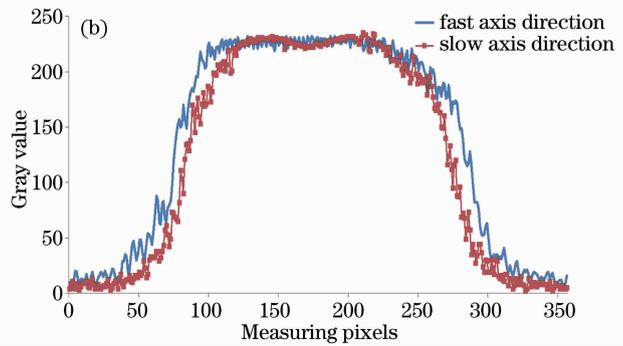
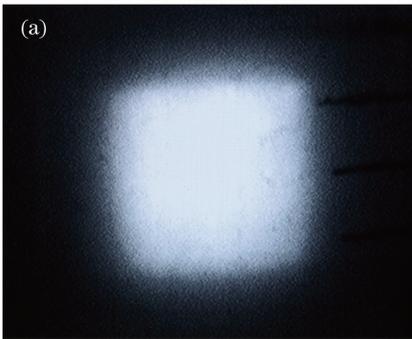


图 9 成像型光束积分系统实验结果。(a)后焦面处光斑图样;(b)沿快慢轴方向光强分布

Fig. 9 Experimental results of imaging beam integrator system. (a) Spot pattern at the back focal plane; (b) intensity distributions along fast axis and slow axis directions

根据实验结果可知,首先,光斑均匀性大于 90%,每一发光单元子光束与不同发光单元子光束叠加在一起,消除了干涉高频成分对均匀性的影响;其次,成像型光束积分系统可以很好地消除由发光单元间隙产生的对光斑均匀性的影响,在保证全部光束经过微透镜阵列的前提下,适当增加 LD 与微透镜阵列间距离,使子光束总量增加,提高抽运光斑均匀性;最后,快慢轴方向光强分布在中央处均匀性一致,但慢轴方向存在“软肩”现象,如图 9(b)所示,这是由于慢轴方向光束发散角大于成像型积分系统

所允许的最大入射角。快轴方向经微柱透镜准直后发散角为 1° ,慢轴方向利用柱透镜对 LD 阵列整体准直预准直到 5° 。但实际中不在柱透镜光轴上发光单元的光束为离轴光束,经柱透镜后会向主光轴会聚,所以多数光束发散角大于 5° ,尤其是对准柱透镜边缘的光束,其发散角远大于微透镜阵列的最大入射角,致使边缘不再锐利。

6 结 论

本文分析了非成像型和成像型光束积分系统的

匀束原理。依据菲涅耳衍射理论,以高斯光束为入射光,推导出经两种光束积分器高斯光束的光场分布,从理论上分析积分器匀化的机理并证明成像型系统匀化能力的优势。通过三个方面的对比,可知在高斯光束照射条件下,成像型光微透镜阵列匀化光束效果要优于非成像型。成像型光束积分器接收大发散角入射光束时,依然可以保持照明区域内光束的高均匀性。这就意味着在实际使用中,可降低对 LD 光源快慢轴准直的要求,如需高功率密度抽运光斑时,必须对慢轴进行精确准直。通过调整成像型光束积分器两列微透镜间距控制光斑尺寸可提高系统的应用性,同时也能降低系统对微透镜阵列位置精度的要求,更易于安装。

参 考 文 献

- 1 M. Dickey Fred, C. Holswade Scott. Laser Beam Shaping Theory and Techniques[M]. New York: Marcel Dekker, 2000
- 2 Jia Wenwu, Wang Yuefeng, Huang Feng *et al.*. Application of fly's eye lens in beam shaping laser diode array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202008
贾文武, 汪岳峰, 黄峰等. 复眼透镜在激光二极管阵列光束整形中的应用[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202008
- 3 Zhao Tianzhuo, Fan Zhongwei, Chen Yanan *et al.*. Large area laser diode stack pumping structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1951~1956
赵天卓, 樊仲维, 陈亚楠等. 大发光面积激光二极管堆栈抽运结构[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1951~1956
- 4 Han Kezhen, Liu Xiaojuan, Ge Xiaolu *et al.*. Three-dimensional simulation analysis and design by ray-tracing method for microcylinders and two kinds of lens duct[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0302003
韩克祯, 刘晓娟, 葛筱露等. 微柱阵列和两种透镜导管耦合系统的三维光线追迹与设计[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0302003
- 5 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
- 6 P. Schreiber, P. Dannberg, B. Hofer *et al.*. Chirped microlens arrays for diode laser circularization and beam expansion[C]. *SPIE*, 2005, **5876**: 58760K
- 7 F. Wippermann, U. D. Zeitner, P. Dannberg *et al.*. Beam homogenizers based on chirped microlens arrays [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 6218~6231
- 8 Huang Feng, Jia Wenwu, Wang Yuefeng *et al.*. High density pumping sources based on diffractive/reflective beam shaping systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(1): 61~66
黄峰, 贾文武, 汪岳峰等. 基于衍射/反射光束整形系统的高密度泵浦源[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(1): 61~66
- 9 A. Büttner, U. D. Zeitner. Wave optical analysis of light emitting diode beam shaping using microlens arrays[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(10): 2393~2401
- 10 R. Voelkel, K. J. Weible. Laser beam homogenizing: limitations and constraints[C]. *SPIE*, 2008, **7102**: 71020J
- 11 M. Zimmermann, N. Lindlein, R. Voelkel *et al.*. Microlens laser beam homogenizer: from theory to application[C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 666302
- 12 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. Colorado: Roberts and Company Publishers, 2005
- 13 F. M. Dickey, S. C. Holeswade, D. L. Shealy. Laser Beam Shaping Applications[M]. New York: Talyor & Francis Group, 2006

栏目编辑: 宋梅梅