文章编号:1001-5078(2012)02-0119-05

· 激光应用技术 ·

基于微透镜阵列光束均匀化的傅里叶分析

殷智勇¹,汪岳峰¹,贾文武¹,黄 峰¹,强继平¹,雷呈强¹,张琳琳² (1. 军械工程学院光学与电子工程系,河北石家庄 050003;2.73151部队,福建 厦门 361100)

摘 要:为了提高高功率固体激光器泵浦光束的均匀性,分析了成像型和衍射型微透镜阵列匀 化光束的基本原理,基于菲涅尔衍射和傅里叶变换公式,推导出了微透镜阵列焦平面上光强分 布的解析表达式,比较了两种光束微透镜阵列对光束匀化的效果。同时,研究了成像型微透镜 阵列子透镜的相对孔径及微透镜阵列间距对光强分布的影响。结果表明,成像型微透镜阵列 具有更好地匀化效果,且子透镜孔径是影响光束均匀性最主要的因素。

关键词:微透镜阵列;光束均匀化;傅里叶变换;相对孔径

中图分类号:TN245 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2012.02.001

Fourier analysis of light beam uniformity based on the microlens array

YIN Zhi-yong¹, WANG Yue-feng¹, JIA Wen-wu¹, HUANG Feng¹ QIANG Ji-ping¹, LEI Cheng-qiang¹, ZHANG Lin-lin² (1. Optics & Electrics Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. The Unit 73151 of PLA, Xiamen 361100, China)

Abstract: In order to improve the uniformity of high-power solid-state laser pump light beam, the basic theory of beam smoothing with imaging microlens array and diffracting microlens array is analyzed. Based on the Fresnel diffraction theory and Fourier transform formula, intensity distribution stochastic solution of microlens array on focal plane has been derived and the homogeneous effects of two kinds of microlens arrays are compared. Meanwhile, the influences of relative aperture of one lenslet and the distance between two microlens arrays on the intensity distribution are researched. The results show that imaging microlens array is of better homogeneous effect and the relative aperture of one lenslet is a key factor to affect the uniformity of light beam.

Key words: microlens array; beam uniformity; Fourier transform; relative aperture

1 引 言

当前,固体激光器总的发展趋势是激光二极管 泵浦固体激光器(DPSSL)。泵浦光的不均匀性成为 制约高功率固体激光器进一步提高光束质量的因 素^[1-2]。为了实现泵浦光的高度均匀性,目前常用 的方法有两种:二元衍射元件和空心导管。二元衍 射元件缺点是只适用于很短的光谱范围^[3]。而采 用空心导管缺点是系统体积较大,同时经过空心导 管耦合后的光束发散角将增大,影响激光介质对泵 浦激光的吸收^[4]。微透镜阵列现已经广泛用于照 明系统和成像系统中,其具有体积小、质量轻、传输 损耗小等特点^[5-6]。本文对比衍射型光束微透镜阵 列和成像型微透镜阵列,分析了微透镜阵列匀化光 束的原理,同时讨论了微透镜阵列不同参数对光束 均匀性的影响。

基金项目:国家"863"计划项目资助。

作者简介: 股智勇(1984 -), 男, 博士, 主要从事固体激光和激 光光束整形技术的研究工作。E-mail: yzy8465@163.com 收稿日期: 2011-08-29; 修订日期: 2011-09-25

2 微透镜阵列匀束原理

2.1 衍射型微透镜阵列原理

衍射型微透镜阵列包含两个部分,由一个纵列 串联的微透镜阵列和一个傅里叶透镜组成,微透镜 阵列位于傅里叶透镜的焦平面上^[7],如图1所示。 均匀化效果是用焦平面上串联的微透镜阵列的每一 子透镜将入射光分束会聚,再经过傅里叶透镜进行 积分叠加产生的。



从波动光学角度分析,傅里叶透镜焦平面上的 远场分布是由微透镜阵列的传输函数经傅里叶变换 得到的。由于输入光束的场分布会对远场分布均匀 性产生一定影响,为了更清晰地讨论微透镜阵列匀 束过程中衍射和干涉对远场分布均匀性的影响,将 入射光设为波长为 λ 单色平面波。微透镜阵列由 (2n+1)个子透镜组成,子透镜孔径为p,焦距为 f_L , 傅里叶透镜焦距为 f_F ,进行一维计算。

入射光经过微透镜阵列的光场分布为:

$$U(y_1, z_1^+) = U(y_1, z_1^-) T(y_1)$$
(1)
其中,微透镜阵列传输函数为 $T(y_1)$:

$$T(y_1) = \sum_{N=-n}^{n} \delta(y_1 - pN) \otimes \operatorname{rect}\left(\frac{y_1}{p}\right) \times \exp\left(-\mathrm{i}k \frac{y_1^2}{2f_L}\right)$$
(2)

 $从 y_1$ "+"平面到 y_f 平面, 满足傅里叶变换 公式:

$$U(y_{f}, z_{f}) = \int \sum_{N=-n}^{n} \delta(y_{1} - pN) \otimes \operatorname{rect}\left(\frac{y_{1}}{p}\right) \times \exp\left(-\mathrm{i}k\frac{y_{1}^{2}}{2f_{L}}\right) \times \exp\left(-\mathrm{i}2\pi y_{1}f'\right) \mathrm{d}y_{1} \quad \left(f' = \frac{y_{f}}{\lambda f_{F}}\right)(3)$$
$$U(y_{f}, z_{f}) = U_{1} \times U_{2} \otimes U_{3} \tag{4}$$

其中:

$$U_{1} = F\{\sum_{N=-n}^{\infty} \delta(y_{1} - pN)\}$$

= $\frac{\exp(-i2\pi npf')[1 - \exp(i2\pi pf')^{2n+1}]}{1 - \exp(i2\pi pf')}$
= $\frac{\sin(\pi(2n+1)pf')}{\sin(\pi pf')}$ (5)

$$U_{2} = F\left\{\operatorname{rect}\left(\frac{y_{1}}{p}\right)\right\} = p\operatorname{Sinc}\left(pf'\right)$$

$$U_{3} = F\left\{\exp\left(-\mathrm{i}k\,\frac{y_{1}^{2}}{2f_{L}}\right)\right\} = \mathrm{i}\sqrt{\lambda f_{L}}\exp\left(\mathrm{i}\pi\lambda f_{L}f'^{2}\right)$$

$$(7)$$

$$U(y_f, z_f) = (2n + 1) p \operatorname{Sinc} ((2n + 1) p f') \otimes i \sqrt{\lambda f_L} \exp(i\pi \lambda f_L f'^2)$$
(8)

当两个周期函数卷积,根据卷积存在条件,如果 它们的周期存在,且不存在除1外的公约数,则卷积 存在,从而得到傅里叶透镜后焦面上的光场分布。

2.2 成像型微透镜阵列原理

成像型微透镜阵列与衍射型不同,是由两列串 联微透镜阵列和一个傅里叶透镜组成^[8]。两列微 透镜阵列每一子透镜都完全相同,两列之间距离为 子透镜的焦距 *d*。第二列微透镜阵列位于傅里叶透 镜的焦平面上,如图 2 所示。系统中各光学元件参 数与衍射型相同,同样以单色平面波照射。



Fig. 2 schematic diagram of microlens array

当 $d = f_L$ 时,从 y_1 + "平面到 y_2 - "平面,根 据菲涅耳衍射公式:

$$U(y_2, z_2^-) = \frac{\exp(ikf_L)}{i\lambda f_L} \int U(y_1, z_1^+) \times$$

$$\exp \frac{ik(y_2 - y_1)^2}{2f_L} dy_1 = \frac{\exp(ikf_L)}{i\lambda f_L} \times \exp\left(\frac{iky_2^2}{2f_L}\right) \times \frac{\sin(\pi(2n+1)pf')}{\pi f'}$$
(9)

其中, $f' = \frac{y_2}{\lambda f_L}$, $f'' = \frac{y_f}{\lambda f_F}$,第一项为常数项可以忽略, 可得:

$$U(y_{2}, z_{2}^{+}) = U(y_{2}, z_{2}^{-}) T(y_{2}) = \frac{\sin(\pi(2n+1)pf')}{\pi f'} \times \sum_{N=-n}^{n} \delta(y_{2} - pN) \otimes \operatorname{rect}\left(\frac{y_{2}}{p}\right)$$
(10)
$$U(y_{f}, z_{f}) = F \left\{ \frac{\sin(\pi(2n+1)pf')}{\pi f'} \times \right\}$$

$$(2n + 1) p \times \sum_{N=-n}^{\infty} \delta(y_2 - pN) \otimes \operatorname{rect}\left(\frac{-1}{p}\right) \times \exp(-i2\pi y_2 f'') dy_2 = (2n + 1) p\operatorname{Sinc}\left((2n + 1) p f''\right) \otimes \lambda f_L \operatorname{rect}\left(\frac{\lambda f_L f''}{(2n + 1)}\right)$$
(11)

$$A f_L \operatorname{rect}\left(\frac{1}{(2n+1)p}\right) \tag{6}$$

2.3 光场分布均匀性比较

对比公式(8)和式(11)可知,衍射型和成像型 微透镜阵列的光场分布的解析式中,卷积符号前都 为 Sinc 函数,卷积符号后面衍射型为指数函数,而 成像型为 rect 函数。这里将不均匀度进行定义:不 均匀度 = ((相对强度最大值 - 相对强度最小值)/ 相对强度最大值)%。

在衍射型系统中,微透镜阵列的每一子透镜传 递函数以微透镜的孔径的傅里叶变换给出。以几何 光学角度分析,越多的子透镜均匀化效果应该更好, 但由于多孔径平行的存在,在相干光照明时多光束 在空间中将会产生干涉。运用 Matlab 对公式(8)和 式(11)进行数值模拟,可知衍射型焦平面处相对强 度如图 3(a)所示。整个平顶的顶部出现了强烈的 干涉条纹减,根据不均匀性定义可知,由于干涉产生 的大量高频成分弱了均匀化效果。

在成像型系统中,第二列微透镜阵列每一子透 镜位于第一列对应的子透镜的焦平面处。由公式 (8)中指数函数到公式(11)中的 rect 函数可知,第 二列微透镜作用是将等相位面由球面变成了平面。 因此,在 Sinc 分布和平面等相位面共同作用下,实 现了远场分布为平顶型的光强分布。但由于成像型 微透镜阵列中还存在像差所以远场分布具有不锐利 的边缘,如图 3(b)所示。



殷智勇等 基于微透镜阵列光束均匀化的傅里叶分析

3 影响光束均匀性因素的分析

通过上述比较可知,成像型微透镜阵列的光场 分布具有更好地均匀性。对成像型微透镜阵列做进 一步的研究,改变两列微透镜阵列各项参数,分析不 同参数的变化对光强均匀性的影响。本文以单色平 面波做为光源进行一维的计算分析,忽略二维中由 于子透镜的各种形状造成的不同占空比对衍射效率 的影响。以 Thorlabs 公司的 MLA150 – 7AR 微透镜 阵列为实例进行参数设定,子透镜孔径 $p = 150 \mu m$, 焦距f = 6.7 mm,选定入射光波长 $\lambda = 808 nm$ 。对于 抽样点的选取,由于光强分布采用相对强度,所以不 同数量的抽样点对于均匀性不会产生影响。而不同 位置的抽样点则会对均匀性产生精度上的影响,但 各因素影响均匀性的趋势不会产生变化。因此可利 用离散数值计算,对远场分布的均匀性进行分析。

3.1 子透镜相对孔径对均匀性的影响

在焦距一定的条件下,选定不同子透镜孔径 p 来改变相对孔径,从而得到不同光斑的相对强度变 化如图4所示。从图4(a)、图4(b)和图4(c)中可



知,当子透镜孔径变大时,在像平面处的光场分布变 宽。同时从图4(d)中可知,随着子透镜孔径的增大 不均匀度降低,使均匀性得到一定的改善。

在子透镜孔径不变的条件下,随着子透镜焦距 的减小,像平面处的光场分布也随之展宽,光强减 弱,如图5所示。但在不同焦距条件下,均匀性并未 得到明显改善。



由上述可知,相对孔径的改变会影响成像型光 束的匀化效果。微透镜阵列可近似为光栅,每一子 透镜的孔径 p 看作光栅的等间距 d 的狭缝。一方 面,当子透镜孔径变化时,根据光栅方程 dsinθ = mλ 可知,各衍射级位置会发生改变,不同衍射级主极大 与次极大之间重叠程度的不同,从而影响光束的均 匀性。又因为正弦函数的存在,各级次的重叠也呈 现周期性变化。但当微透镜阵列中子透镜孔径变大 时衍射效应也相对会减弱,光强分布趋于平均,不均 匀度降低,如图 4(d)所示。另一方面,当焦距改变 时,并不影响衍射级位置的变化,所以光束匀化效果 未有明显变化,如图 5(d)所示。综上所述,相对孔 径改变大时,光场分布变宽,边缘的峰值减小,像平 面上光场分布趋于平顶型。

3.2 两列微透镜阵列间距对均匀性的影响

当两列串联的微透镜位列的间距 d 不再为子透 镜焦距时,根据菲涅耳衍射,其光场分布如式(12), 较式(11)卷积符号右边多了一指数项。

 $U(y_f, z_f) = ((2n + 1)pSinc((2n + 1)pf'')) \otimes$



当微透镜阵列间距改变时,光场分布边缘峰值 减小,但其余部分与等于焦距时相比出现了微小抖 动,这是由于指数函数卷积后产生的影响。随着 *d* 在 0 到 2*f* 之间改变,除 0 附近外,光束均匀化效果 整体呈现稳定的趋势。当 *d* 变化时,第二列微透镜 入射的光线不再是焦平面上的一点,而是会聚或发 散的光线,最终影响了积分叠加过程,导致像平面光 场分布的均匀性。

123

4 总 结

本文系统地分析了两种光束微透镜阵列的匀束 基本原理。以单色平面波为例,进行了衍射型和成 像型微透镜阵列菲涅尔衍射的傅里叶变换推导。结 果表明,在单色平面波照射条件下,成像型光微透镜 阵列匀化光束效果要优于衍射型,可实现更均匀的 光强分布。为进一步提高光束均匀性,可以适当增 大子透镜口径,减弱衍射效应对光束均匀性的影响。 此外,在成像型微透镜阵列中,两列微透镜阵列间距 对光束匀化效果影响小,可降低系统中对微透镜阵 列位置精度的要求,更便于系统的安装。

参考文献:

- [1] Huang Feng, Jia Wenwu, Wang Yuefeng, et al. Theory and design of laser beam homogenizer based on multi-aperture beam integrator [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(1): 44-47. (in Chinese)
 黄峰, 贾文武, 汪岳峰, 等. 多孔径光束积分激光匀束器理论与设计[J].激光与红外,2010,40(1):44-47.
- Huang Feng, Jia Wenwu, Wang Yuefeng, et al. High density pumping sources based on diffractive/reflective beam shaping sysytems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010,39(1):61-66. (in Chinese)

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.

- [3] Jin Guofan, Tan Qiaofeng. Binary Optic in China [C].SPIE, 2002, 4900:832 840.
- [4] Gao Hongyun, Fu Rulian, Chen Desheng, et al. Design of hollow duct as coupling system in solid-state laser endpumped by LDA[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005,16(5):541-544. (in Chinese)
 部洪云,傅汝廉,陈德胜,等. LDA 端泵浦固体激光器 的耦合系统空心导管的设计[J]. 光电子 · 激光, 2005,16(5):541-544.
- [5] Homburg O, Bayer A, Mitra T, et al. Beam shaping of high power diode lasers benefits from asymmetrical refractive micro-lens arrays [C]. SPIE, 2008, 6876:68760B - 1 -68760B - 7.
- [6] Schreiber P, Bannberg P, Hoefer B. Chirped microlens arrays for diode laser circularization and beam expansion [C]//SPIE,2005,5786:58760k - 1 - 58760k - 8.
- [7] Buttner A, Zeitner U. Wave optical analysis of light-emitting diode beam shaping using microlens arrays[J]. Optical Engineering, 2002, 41(10):2393 - 2401.
- [8] Wippemann F, Zeitner U, Dannberg P. Beam homogenizers based on chirped microlens arrays [J]. Optics Express, 2007,15(10):6218-6231.