

多孔径光束积分激光匀束器理论与设计

黄峰, 贾文武, 汪岳峰, 尚浩, 郭双飞
(解放军军械工程学院光学与电子工程系, 河北石家庄 050003)

摘要:分析了多孔径光束积分匀束器的基本原理和设计理论,分别设计了衍射型和成像型微透镜阵列激光匀束器,将高斯光束整形为平顶光束。光线追迹的结果表明,当微透镜阵列的菲涅尔数较大时,两种匀束器都能获得良好的匀束效果,而成像型能比前者提供更好的光束均匀性和边缘坡度。此外,入射光的准直性能会影响匀束效果,当入射光发散角较大,超过微透镜数值孔径时会导致像面光斑出现明显旁瓣,无法实现正常的匀化。

关键词:激光光束整形;激光匀束器;多孔径光束积分器;微透镜阵列

中图分类号: TN245 **文献标识码:** B

Theory and design of laser beam homogenizer based on multi-aperture beam integrator

HUANG Feng, JIA Wen-wu, WANG Yue-feng, SHANG Hao, GUO Shuang-fei

(Optics & Electrics Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The principle and design theory of multi-aperture beam integration homogenizer are analyzed. Diffracting and imaging microlens array laser beam homogenizers are designed to convert Gaussian beams into top-hat beams. The ray-tracing simulations show that both of them have good uniformity when the Fresnel-Number of microlens array is big, and imaging types give better uniformity and edge steepness than former. The collimation of incident beam has influence on beam uniformity. The big divergence of incident beam which exceeds the NA of microlens results in the side-lobe on the image plane, then the beam uniformity can't be realized.

Key words: laser beam shaping; laser beam homogenizer; multi-aperture beam integrator; microlens arrays

1 引言

激光器直接产生光束的空间强度通常呈高斯分布或类高斯分布。然而在许多激光应用领域中,如材料加工、光信息处理、激光医疗以及用于惯性约束核聚变(ICF)的高功率激光辐射源等都需要光强均匀分布的激光束,因此以实现均匀平顶光束分布为目的的激光光束空域整形技术应运而生,并取得了快速发展和应用。迄今已发展了多种此类的激光光束空域整形方法,如可使用液晶空间光调制器^[1]、二元光学元件^[2]、光楔列阵(SWA)聚焦光学系统^[3]、随机位相板^[4]、微透镜阵列^[5]和波导管^[6]等器件实现激光光束的均匀化。其中,一种基于多孔径光束积分原理的激光匀束器可实现均匀性优良的平顶光束,并具有结构简单、使用灵活的优点。应用

这一原理的匀束器主要是复眼(蝇眼)透镜,又称为微透镜阵列。本文分析了基于多孔径光束积分原理的激光匀束器的工作原理和设计理论,并以高斯光束整形为平顶光束为例进行了激光匀束器的设计与模拟。

2 多孔径光束积分匀束器理论

2.1 多孔径光束积分系统原理

多孔径光束积分系统由两个基本部分组成,由一个或多个将光束的入瞳或横截面分解成子波束阵

基金项目:国家自然科学基金(No. 10376044);国家863计划项目资助。

作者简介:黄峰(1979-)男,讲师,博士研究生,从事固体激光和激光光束整形技术研究。E-mail: huangfeng239@126.com

收稿日期:2009-04-28; **修订日期:**2009-08-26

列并对各个波束产生相位弯曲的透镜阵列组成的亚口径阵列组件,和使各个亚口径的波束在目标面上叠加的光束积分或聚焦组件。目标安放在主聚焦元件的焦点上,这样目标上的辐照强度分布就是轴上无穷远物点(假设准直的入射波前)的散焦衍射斑(点扩散函数)的叠加^[7]。

多孔径光束积分器分为衍射型(非成像型)和成像型两类。衍射型光束积分器的结构如图1所示,它由一个微透镜阵列和一个主凸透镜组成。 D 为入射光束孔径, d 和 f 分别为微透镜阵列各亚口径的孔径和焦距, F 为主凸透镜焦距, S 为靶面上像尺寸。图2是一个成像多孔径光束积分器。第一个透镜阵列如衍射积分器一样将光束分段,然后将其分别聚焦到第二个透镜阵列,即在第一个阵列中的每一个透镜用来将光辐射限定在第二阵列的相应的亚口径内。第二个透镜阵列与主透镜一起在目标面上产生第一个透镜阵列中各个亚口径的实像。主透镜使这些亚口径的像在目标处重合形成它们的积分。两个透镜阵列间的距离 a_{12} 通常满足 $f_1 < a_{12} < f_1 + f_2$,以保证光束在透镜阵列之内并且改变这些光束的发散角,即通过改变 a_{12} 来控制成像尺寸 S 。这种对透镜口径进行重新成像的方法可以减轻非成像积分器的衍射效应^[7]。

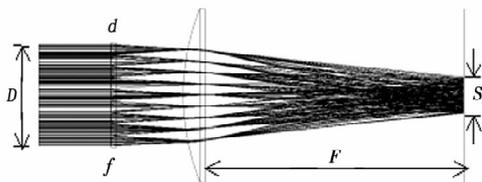


图1 衍射型多孔径光束积分器原理

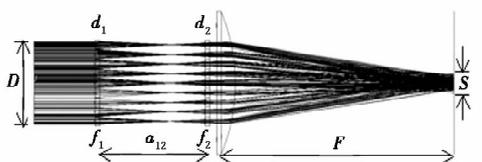


图2 成像型多孔径光束积分器原理

2.2 基于多孔径光束积分原理的激光匀束器设计

根据图1所示衍射微透镜阵列的基本结构,均匀光束尺寸 S 由匀束器的结构参数得到:

$$S \approx 2 \cdot F \cdot \tan\theta \approx \frac{dF}{f} \quad (1)$$

如图2所示的由两组微透镜阵列构成的成像多孔径光束积分器,均匀光束尺寸 S 为:

$$S = d_1 \frac{F}{f_1 f_2} [(f_1 + f_2) - a_{12}] \quad (2)$$

由于单个亚口径的衍射图样决定了目标上的点的形状,衍射效应可能产生不希望的强度分布起伏,

从而对光束积分效果有着重要影响。菲涅尔数是评估衍射效应的重要指标,菲涅尔数越小,则衍射效应越明显,菲涅尔数可由子透镜参数表示为^[7]:

$$\text{Fresnel} = \frac{d}{4\lambda(f/d)} \quad (3)$$

另外,将公式(1)带入公式(3),菲涅尔数可以写成目标点尺寸和主透镜焦距的形式:

$$\text{Fresnel} = \frac{dS}{4\lambda F} \quad (4)$$

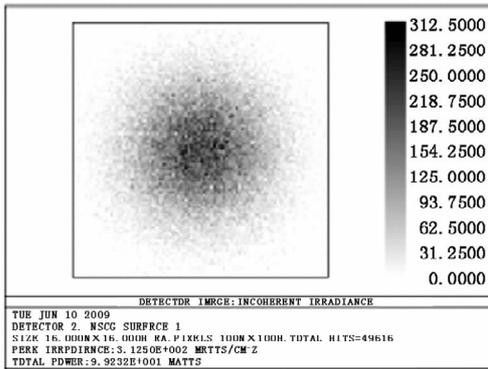
根据多孔径光束积分的匀化原理,在入射光束孔径一定的情况下,子透镜的孔径尺寸越小,就能分出越多细子光束在目标面上实现叠加,匀束效果也就越好。但减小子透镜的口径 d (菲涅尔数相应减小)会加重衍射效应的影响,从而减弱匀化效果。因此多孔径光束积分系统的匀化特性包含了对子透镜的孔径尺寸和菲涅尔数之间的均衡,在设计中应尽量减少子透镜口径 d 并保留适当的菲涅尔数值。

对非成像光束积分器而言,入射光束的角度改变将会引起目标面上辐射点的移动^[7]。若微透镜阵列设计参数给定,就要求入射光束具有大口径和小发散角才能保证匀束效果。成像积分器则可容许入射光的发散角较大但仍保持目标面上子光束的包络。使用非成像光束积分器的另一个主要缺点是衍射效应对光束均匀化的影响。成像光束积分器可大大减轻衍射效应的影响,并提供更好的光束均匀性和边缘坡度。根据文献[8]提供的设计经验,如果使用非成像匀束系统,菲涅尔数应远高于10,从而得到不被衍射效应影响的均匀光强分布;如果菲涅尔数是近似等于或小于10,就必须使用成像积分器以获得理想的匀束效果。

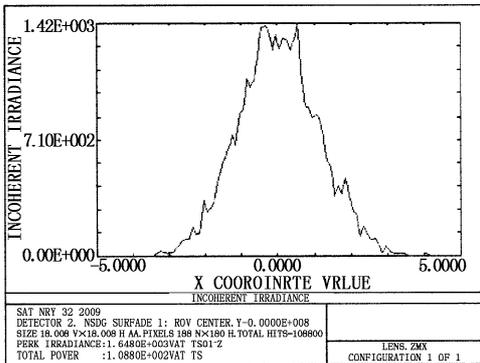
3 设计实例与分析

3.1 设计实例

运用 ZEMAXTM 光学设计软件对基于多孔径光束积分原理的激光匀束器进行设计与模拟。以图3所示高斯光源来模拟常见的 Nd:YAG 激光作为入射光源。使用非序列性光线追迹模式设计的微透镜阵列如图4所示。微透镜阵列由一系列方形子透镜组成,每个子透镜尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,前表面曲率半径 3 mm ,后表面为平面,透镜中心厚度 0.5 mm ,有效焦距约 5.92 mm 。分别设计非成像型(如图5所示)和成像型(如图6所示)匀束器来对高斯光束进行均匀化处理。为便于比较,两组匀束器使用相同的微透镜阵列和会聚透镜,且成像型微透镜阵列的前后距离 $a_{12} = f_1 = f_2$,以确保获得相同尺寸的匀化光斑。



(a) 高斯激光光源的光强分布



(b) 高斯光源沿 x 轴方向的光强分布

图3 高斯光源的光强分布

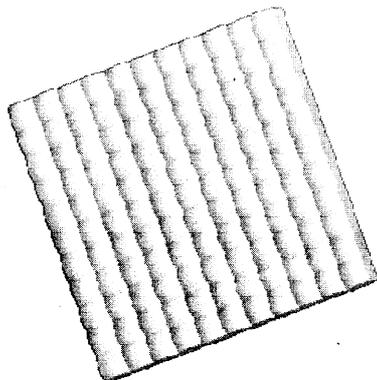


图4 用 ZEMAX 的 NSC 设计的微透镜阵列

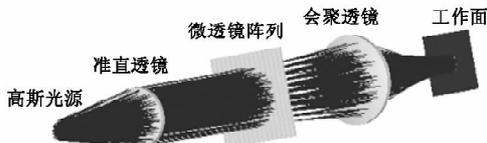


图5 基于衍射型多孔径光束积分系统的激光匀束器

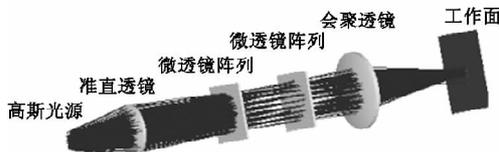
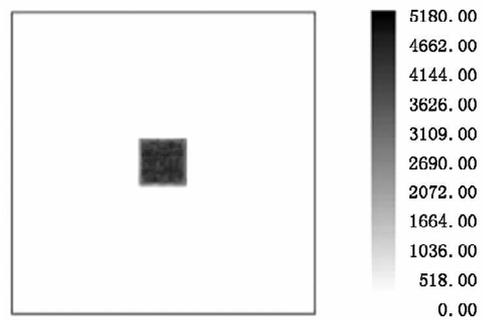
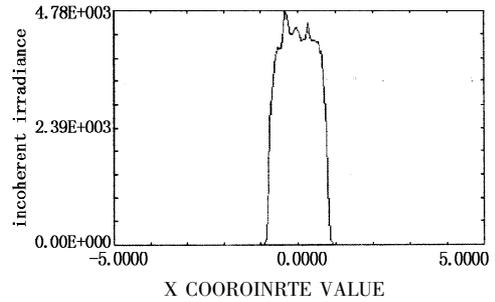


图6 基于成像型多孔径光束积分系统的激光匀束器

利用 ZEMAX™ 以提高像面辐照均匀性为目的进行系统优化和光路模拟, 光线追迹的结果分别如图7和图8所示。

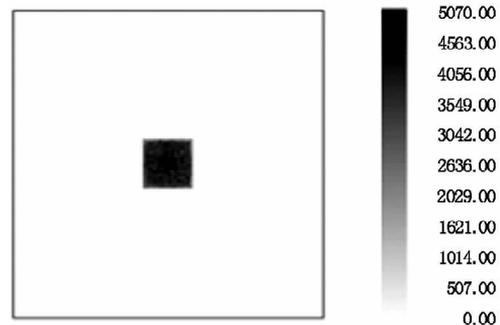


(a) 衍射型匀束器匀化后的光强分布

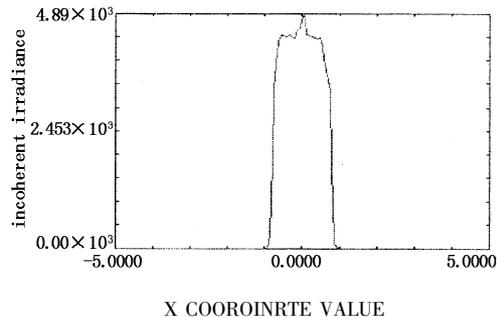


(b) 匀化后沿 x 轴方向的光强分布

图7 衍射型匀束器匀化后的光强分布及 X 轴方向光强分布



(a) 成像型匀束器匀化后的光强分布



(b) 匀化后沿 x 轴方向的光强分布

图8 成像型匀束器匀化后的光强分布及 X 轴方向的光强分布

考虑到非序列光线追迹计算结果本身的随机误差, 由图7、图8可知利用基于多孔径光束积分原理的激光匀束器对高斯光束进行空间整形, 都能得到较理想的呈平顶分布的方形均匀光斑, 同时成像型匀束器所获得的光束均匀性要优于衍射匀束器。两种匀束器使用的会聚透镜有效焦距约为 9.86 mm, 将相关参数代入公式(1)~式(3), 可得到匀化光斑

$S \approx 1.67 \text{ mm}$, 菲涅尔数 $F \approx 39.7$ 。由于所设计微透镜阵列的菲涅尔数接近 40, 从理论上说两种匀束器都可适用, 但对于相同的初始光源, 成像型匀束器能减轻衍射效应的影响, 因而能够提供更好的光束均匀性和边缘坡度。但是, 以成像型微透镜阵列为基本结构的匀束系统的组成和装调都更加复杂, 成本也更高, 所以在工程实践中可根据具体应用要求加以选择。

此外, 两种匀束器系统的入射光在进入微透镜阵列之前都进行了光束准直。根据多孔径光束积分器的匀化原理, 理想的平行入射光会获得最好的匀化效果, 未经准直的入射光其发散角则会对光束均匀效果产生影响。即便是对入射光的准直性能要求不是很高的成像型积分器, 当入射到第一列微透镜阵列的光束发散角较大时, 从第一列微透镜阵列出射的光线将会偏离第二列微透镜的对应透镜单元, 无法如图 2 所示那样令子光束一一对应地透射过两组透镜阵列中的相应子透镜。此时偏离第二列微透镜阵列对应子透镜出射的光线, 其会聚光斑将偏离中央位置的主光斑, 最终导致像面上的匀化光斑出现旁瓣, 甚至出现完全分开的光斑, 极大地降低匀化效果。成像型积分器对大发散角入射光束进行积分匀化的光路原理如图 9 所示。由图中可知, 为使具有较大发散角的入射光线成像在匀化光斑内而不产生渐晕甚至旁瓣, 子透镜的数值孔径应满足:

$$\text{NA}_{\text{MA}} = \arctan\left(\frac{d}{2f}\right) \geq \theta_{\text{div}} \quad (5)$$

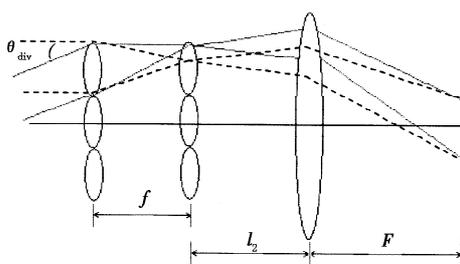


图9 成像型积分器对大发散角入射光束进行分束积分的光路原理

能达到高数值孔径的非球面微透镜制作难度大, 同时大数值孔径的微透镜阵列会产生大的像差, 从而降低像面上的均匀性和系统耦合效率^[9], 因此在实际应用中通常根据系统要求作具体选择, 在选定微透镜阵列器件后, 就应使入射光束发散角尽可能小于数值孔径, 以保证匀化效果。

图 10 是在图 6 成像型匀束系统基础上去除准直透镜, 令初始高斯光束直接入射到透镜阵列所得到的匀化效果, 由于入射光发散角明显超过子透镜数值孔径导致在中央光斑四周出现了明显旁瓣, 无

法实现正常的光束匀化。

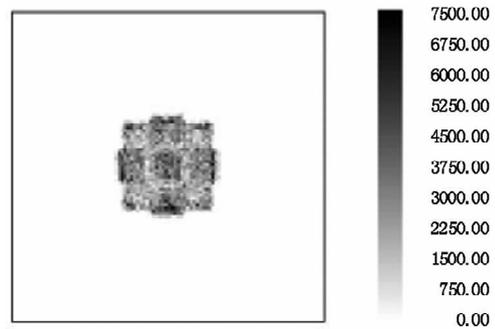


图 10 未加准直透镜的成像型匀束器匀化后的光强分布

4 结论

本文系统分析了多孔径光束积分匀束器的基本原理和设计理论, 并以高斯光束整形为平顶光束为例进行了衍射型和成像型激光匀束器的设计。光线追迹的结果表明, 当微透镜阵列的菲涅尔数较大时两种匀束器都能获得良好的匀化效果, 而成像型匀束器的光束均匀性和边缘坡度优于前者。此外, 入射光束的准直性能对光束的均匀效果有直接影响, 即便是对入射光准直性能要求不是很高的成像型匀束器, 如果入射光发散角超过微透镜数值孔径可能导致像面中央光斑四周出现明显旁瓣, 从而影响匀化效果。

参考文献:

- [1] 陈怀新, 隋展, 陈祯培. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1101-1111.
- [2] 毛文炜, 傅振海. 实现灵活光束转换的二元光学器件及其应用[J]. 中国激光, 1997, 24(4): 289-292.
- [3] 吕百达, 蔡邦维, 张彬. 强激光的空间整形和靶面均匀辐照技术[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 25-28.
- [4] 龚华平, 吕志伟, 林殿阳. 激光束空间整形的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(9): 2-5.
- [5] 郑建洲, 于清旭, 卢永军. 焦斑可调的透镜阵列均匀辐照光学系统[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 331-336.
- [6] 刘云山, 刘院省. 矩形波导管均匀高斯光束的初步理论研究[J]. 河北大学学报, 2006, 26(6): 595-596.
- [7] Fred M Dickey, Scott C Holswade. Laser beam shaping: Theory and technology [M]. New York: Marcel Dekker Press, 2000: 273-283.
- [8] Bernd K hler, Axel Noeske, Tobias Kindervater, et al. 11 kW direct diode laser system with homogenized 55 x 20 mm Top-Hat intensity distribution [J]. SPIE, 2007, 6456: 64560-1-64560-12.
- [9] Peter Schreiber, Serge Kudaev, Peter Dannberg, et al. Homogeneous LED-illumination using microlens arrays [J]. SPIE, 2005, 5942: 5942-020-1-9.