

用透镜列阵实现大焦斑面的均匀照射

邓锡铭 梁向春 陈泽尊 余文炎 马仁勇

(中国科学院上海光机所)

提要: 用近百个相同透镜组成的列阵,插入到普通的聚光系统中,能够显著改善靶面照射均匀性,并且基本上不受激光束近场分布的影响。文中给出了透镜列阵的几何光学和物理光学的分析结果,并与实验结果作了对比。

Uniform illumination of large focal targets using a lens array

Deng Ximing, Liang Xiangchun, Chen Zezun, Yu Wenyan, Ma Renyong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: Inserting an array composed of nearly one hundred similar lenses into a common focal system, the uniformity of the illumination of a target can evidently be improved without being affected by the near field distribution of laser beams.

We report here the analyses of geometrical and physical optics of the lens array and compare them with the experimental results.

在激光核聚变研究以及诸如激光切割、焊接和激光热处理等应用技术上,往往要求靶面或被照物得到非常均匀的光强分布。在一般的情况下,即使激光器输出的近场分布是均匀的,经聚焦透镜后,不论是远场分布还是焦前、焦后的准近场分布都不可能是均匀的。近年来不少实验室对靶面均匀照射作了各种努力^[1,2]。我们在此提出了一种透镜列阵的新的聚光方法。实验表明,在入射光束近场分布均匀性很差的情况下,这种聚焦系统仍然可以在“综合”焦平面上得到大尺度范围内均匀平滑的光照效果。

这种聚焦系统的光学结构见图1所示。

从几何光学角度分析,这一聚光系统是

在主聚焦透镜 A 前面加上一组小透镜 B 构成。透镜阵把入射光束分割成多个局部光束,每一子光束在大、小透镜组合焦点列阵面 E 上聚焦后再发散,并都对靶面 O 的同一区域全部照明,即各子光束都同样迭加在靶面 O 上。只要列阵元的数目足够大,就可大大减少由于入射光束近场分布不均匀对靶面照射带来的影响,从而得到一个接近于平顶的光强分布。

透镜列阵单元的孔径 d 、焦距 f 的设计,可以根据使用要求的条件来确定。它们与主聚焦透镜孔径 D 、焦距 F 及要求的焦斑大小 δ 的关系由(1)式表示:

收稿日期:1984年5月8日。

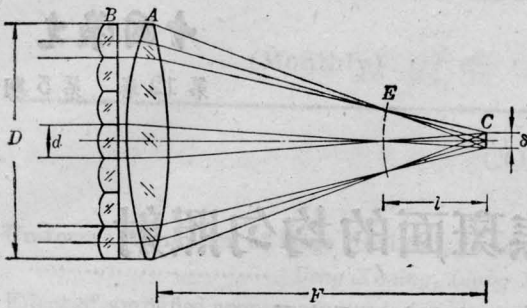


图 1

A—主聚焦透镜, B—透镜列阵, C—“综合”焦点,
E—各单元焦点所在球面

$$f = \frac{FD}{\delta M} \quad (1)$$

这里 M 为大、小透镜的孔径比, 即

$$M = D/d \quad (2)$$

列阵透镜的总数大约是 M^2 个。

从几何光学看, M 大, 小透镜数目多, 入射光束分割就细, 有利于光照的均匀。但从物理光学看, M 数并不是越大越好。在 δ 、 F 、 D 等参数已确定的情况下, M 和 f 的选择还要考虑到衍射和多光束干涉因素。

从物理光学角度分析, 一束相干、单色平行光束经过这样一个聚焦系统以后可以近似等价于下列两种图象的总合:

第一, 每个列阵单元透镜连同主透镜 A 在球面 E 造成的焦斑尺度对 C 来说, 其张角小于焦斑本身的衍射角时(实际应用的要求多半满足此条件), 则每个单元焦斑都可近似看作是一个点光源(对相互之间的干涉而言), 点光源之间是等位相的, 即在球面 E 上形成约 M^2 个相干点光源, 它们对 C 面同时照射, 造成二维多光束干涉, 图 2(a) 列出在 C 面上这种斑纹花样的一维强度分布。

第二, 在球面 E 上的每个单元焦斑, 又区别于一个真正的点光源。这是由于列阵单元透镜的边界衍射效应, 使得单个列阵元光束在 C 面的光强分布不同于点光源的均匀照射, 而是一个典型的费涅耳衍射花样, 见图 2(b)。

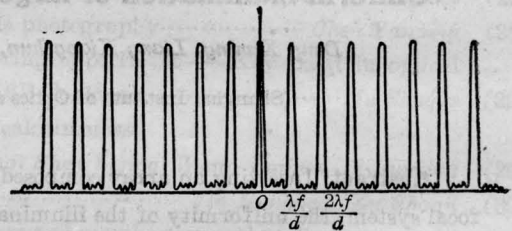
实际情况是上述两种图象的卷积, 如图

2(c) 所示。当中斑纹结构很细密, 这种小尺度强度起伏引起靶面加热的不均匀可依靠靶的横向热传导效应自然消除。但图 2(b) (或者说图 2(c) 的包络线) 所显示的大尺度照射不均匀则不符合使用要求。解决的途径是: 设法使各个列阵单元光束在 C 面上的费涅耳衍射花样不完全重迭, 而故意使它们在一定尺度内无规地错开, 以实现统计意义上的平滑化。有两种安排可达到这种目的:

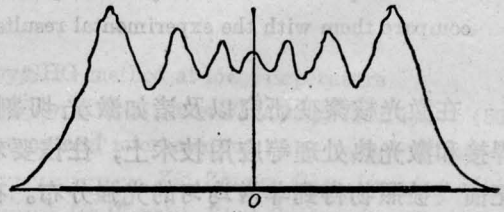
第一, 令各个列阵透镜的同心度误差在一定范围内按无规分布, 这等效于每个列阵透镜附加一个各不相等的小劈角。

第二, 将靶面从几何光学“综合”焦点略往外移, 也可得到同样效果。

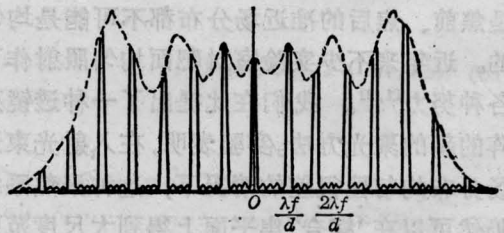
实验中透镜的参数如下:



(a)



(b)



(c)

图 2 靶面光强分布示意图

(a) 多光束干涉光强分布 (b) 费涅耳衍射光强分布
(c) 迭加后实际光强分布

非球面主聚焦透镜: 口径 $D=200\text{ mm}$
 焦距 $F=400\text{ mm}$
 透镜列阵每个单元: 口径 $d=20\text{ mm}$
 ($M=10$)
 焦距 $f=20\text{ m}$
 同心度偏差角 $\theta \leq 5''$ (弧秒)
 焦距一致性 $\Delta f/f \leq 1.5 \times 10^{-3}$

靶面几何光斑直径: $\delta=400\text{ }\mu\text{m}$
 靶面离开组合焦点
 距离: $l \approx 8\text{ mm}$

下面的几个实验验证了以上的分析结果:

(1) 为了显示出图 2 所示干涉和衍射所组成的花样, 我们专门开发了一种精密测量透镜同心度的方法, 使每个单元透镜的“附加”劈角均小于 5 弧秒。这样对于 400 mm 的主焦距来说, 衍射花样相互错开的距离已小于 $10\text{ }\mu\text{m}$, 即远小于相邻两个衍射环的间隔, 保证了所有单元产生的衍射环全部重迭。从图 3 可看出斑纹状的干涉图样受到这种费涅耳衍射环所调制。

(2) 为了消除由于各子光束费涅耳衍射图完全重迭所造成的大尺度强度起伏, 我们将靶面位置从综合焦点 O 略为后移到 O' 处 (见图 4), 这样便可得到一个强度分布相当均匀的光斑。从图 5 可以看出, 在这种情况下费涅耳衍射所形成的大尺度强度调制大为减少, 但是多光束干涉所造成的斑纹结构依然存在。

(3) 为了证明这种“透镜列阵”的聚光方法不受近场分布的影响, 我们在光路中插入一个阻挡栅。此时在组合透镜靶面上依然得到一个均匀的光斑, 只不过由于部分光能被阻挡而使整个光斑的照度相应下降, 见图 6。但如果不使用透镜列阵, 在相同尺寸的准近场处将只能得到这个阻挡栅的投影图象, 见图 7。

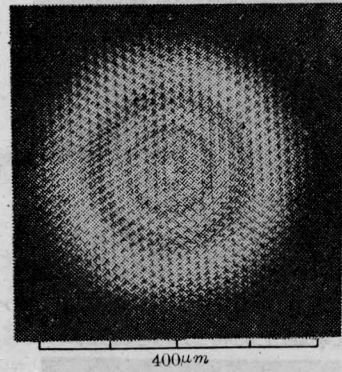


图 3 靶面 C 上 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的光斑照片 (单横模氦-氖激光)

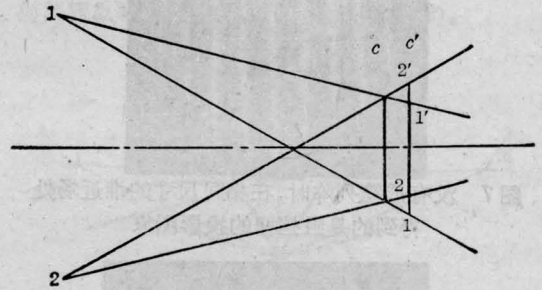


图 4 偏离到 O' 后, 各子光束照亮的靶面存在不同程度的横向偏移

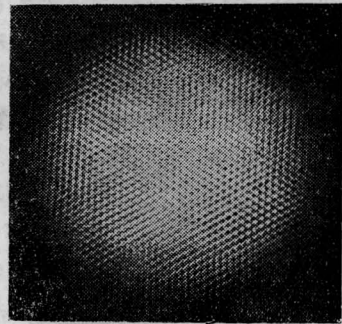


图 5 在 C' 处得到的单横模氦-氖激光光斑照片

(4) 为了直接显示光斑的强度分布, 我们采用了硅靶管二维图象显示系统进行测量。图 8(a) 是不用列阵透镜时的光斑图象。图 9(a) 和图 10(a) 分别为在 C 面和 C' 面上所测得的光斑强度分布。图 8(b) 至图 10(b) 分别对应其光斑直径处强度分布的一维图象。这样就可以不经黑度定标而直接给出靶面的相对光强分布图。

关于靶面均匀照射, 国外目前均采用“无

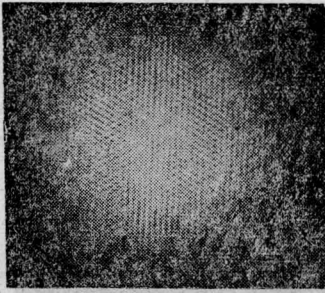


图6 使用透镜列阵时,虽有阻挡栅,靶面上仍得到一均匀光斑

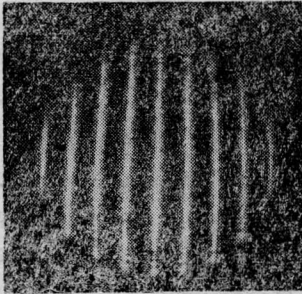
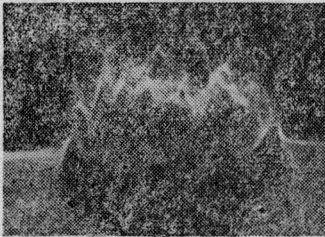


图7 没有透镜列阵时,在相同尺寸的准近场处得到的是阻挡栅的投影图象



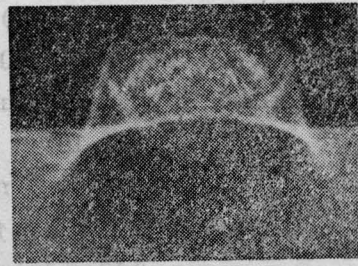
(a) 不用透镜列阵时,靶面光照的二维图象



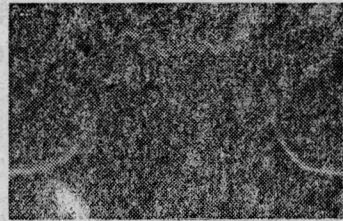
(b) 直径处的一维光强分布

图 8

规位相法^[2],将光束分割为许多小块束,每小块束在焦面上的中心衍射斑等于所要求的照射尺寸,并设法使各块波面之间的位相差是无规的。这样形成的调制焦斑是远场焦斑。在主焦斑之外,还有强度较弱的衍射分布。而我们方法的优点是获得均匀准近场焦斑,在主焦斑之外光强按指数迅速衰减为零,这一特性对激光等离子体研究以及激光加工技术

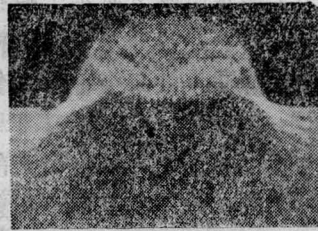


(a) 经过透镜列阵后 C 面上的二维光强分布



(b) 直径处的一维光强分布

图 9



(a) 经过透镜列阵后 C' 面上均匀的二维光强分布



(b) 直径处的一维光强分布

图 10

都是重要的。

参加本实验工作的还有蒋玉柱同志。实验中使用的二维电视测试器是由金洪厚、许绍基等同志提供的,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. H. Lehmborg *et al.*; *Opt. Commun.*, 1983, **46**, No. 1, 27.
- [2] Y. Kato *et al.*; *Appl. Phys.*, 1982, **E29**, No. 3, 186.