

文章编号: 0253-2239(2008)10-1959-08

二元振幅型面板用于光束空间整形

谢 杰 范 薇 李学春 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要 为了提高高功率激光系统的整体效率和充分利用光能, 需要对前端注入的高斯光束进行空间整形, 实现驱动器终端激光的均匀化输出。采用振幅型二元面板对激光光束进行空间强度整形, 利用误差扩散法进行了理论设计, 数值模拟了整形效果, 同时讨论了面板加工误差以及空间滤波器的小孔大小等因素带来的影响。根据理论设计, 分别加工了反高斯透射率分布和抛物线透射率分布的二元面板, 并进行了整形实验, 实现了各自的整形功能, 并做了误差分析。实验证明二元面板能对激光光束的空间强度分布实现了精确的整形。

关键词 激光系统; 空间整形; 二元面板; 增益预补偿; 填充因子

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082810.1959

Spatial Laser Beam Shaping Using Binary Panels

Xie Jie Fan Wei Li Xuechun Lin Zunqi

(Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In order to improve the energy efficiency of the inertial confined fusion (ICF) high-power laser system and use the optical energy sufficiently, it is necessary to convert Gaussian laser beam into uniform beam, or into parabolic-like beam to precompensate the spatially dependent gain of the Nd:glass amplifiers, for the sake of uniform output distribution at the target. The intensity control is obtained with panels composed of binary pixelated arrays of metal pixels, which was designed by error diffusion method. The shaping effect is numerically simulated. The factors, which will influence the shaping effect, such as mismachining of the panel and size of the pinhole of the spatial filter are discussed. An anti-gaussian distribution and a parabolic distribution binary panels are fabricated. The experimental shaping result is given and the error is analyzed. Binary panels are proved to be excellent shaping elements in modeling the intensity of laser.

Key words laser system; spatial shaping; binary panels; gain precompensation; filling factor

1 引 言

在高功率激光系统中, 为了提高激光光束的近场填充因子, 得到较高的能量提取效率, 需要对前端系统注入的高斯分布的激光光束进行空间整形, 使整形后的激光光束经过预放系统和主放大器系统放大后, 在驱动器终端得到空间均匀分布的激光光束^[1]。

空间整形主要包括两方面的内容: 一是在钕玻璃放大器的空间增益分布比较均匀的情况下, 把前端输出的光强为高斯分布的光束整形为平顶分布的均匀光束; 在拍瓦前端系统中, 为了得到高稳定的啁

啉放大脉冲输出, 也要求输入激光束的空间强度分布为平顶分布^[2]。二是在主放大器中, 由于片状大口径钕玻璃长的增益距离可能带来严重的自发辐射效应(ASE), 对介质的增益均匀性产生严重影响, 使钕玻璃放大器在横向和纵向上具有不同的增益分布: 在横向上由于激光的传输距离较长, 边缘自发辐射效应明显, 造成中心部位的增益高, 边缘部位的增益低; 而在纵向增益分布基本一致^[3~5]。为此必须在空间上进行一维的增益预补偿, 使放大器的高增益区对应于输入光束的低强度区, 最后在高功率激光驱动

收稿日期: 2008-01-28; 收到修改稿日期: 2008-04-21

基金项目: 中日韩激光聚变高能密度物理合作研究项目资助课题。

作者简介: 谢 杰(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光空间整形方面的研究。E-mail: rkeson@gmail.com

导师简介: 范 薇(1975—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事光纤激光器与放大器、光开关及光束空间整形等方面的研究。

E-mail: fanweil@siom.ac.cn

器的终端得到空间强度分布均匀的激光光束。

目前,国内外用于惯性约束聚变(ICF)高功率激光系统的空间整形技术主要有三种,包括 LLNL 实验室在子束 (beamlet) 中使用的双折射透镜组结合中性可变灰度滤波器的技术^[6,7],和目前神光 III 原型使用的液晶空间光调制器技术^[8]。这些空间整形技术以不同的方式实现了光束整形,但同时也存在各种问题,比如中性灰度滤波器由于加工工艺的难度较大,难以精确地调节激光光束的空间分布,而液晶空间光调制器可能会引起相位畸变等。此外,LLNL 在国家点火装置(NIF)中使用类似二元光学技术制成的镀铬玻璃面板对光束进行空间整形^[9]。二元光学技术能够根据不同的整形要求,控制单个像素的位置和大小,实现对任意目标透射率分布的精确重现^[10,11],而且制作加工成本低廉。

本文分析了二元振幅型面板空间整形的原理,并进行了理论设计、实验验证以及误差分析。

2 原 理

2.1 相干光的整形原理

如图 1,设二元面板之前入射的光束是强度均匀分布的平顶光束 ($I_0 = |E_0|^2$),光束平行入射,面板放置在空间滤波器的第一块透镜的前焦面上,设面板的透射率函数为 $s(x,y)$ (1 或者 0),已知在空间滤波器的小孔处的复振幅分布为 $E' = F\{E_0 \times s(x,y)\} = E_0 \times s'(u,v)$,其中 $s'(u,v)$ 为 $s(x,y)$ 的傅里叶变换。设小孔透射率为 $p(x,y)$,经过小孔滤波后,在像平面上的复振幅分布则为 $E(x,y) = E_0 \times s(x,y) \otimes p'$,其中 p' 为小孔透射率函数的傅里叶变换,即像面上某点的复振幅等于面板对应点的透射率与 p' 的卷积。由于卷积的作用是在局部范围内对 $s(x,y)$ 平均化,不难得出,像面上某点的实际振幅透射率 t 与面板上对应点的透射率成正比:

$$t(x,y) = E(x,y)/E_0 = s(x,y) \otimes p' \propto s(x,y); \quad (1)$$

而光强透射率 T 则与面板对应点的振幅透射率的平

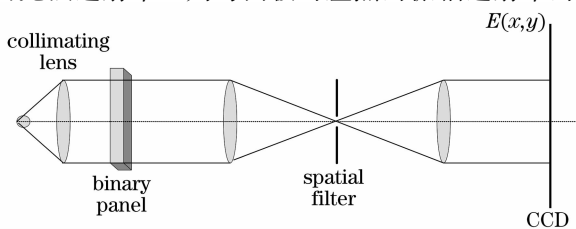


图 1 整形光路图

Fig. 1 Optical layout of the beam shaping module

方成正比:

$$T(x,y) = t(x,y)^2 \propto s(x,y)^2. \quad (2)$$

这为设计面板透射率分布函数提供了一个可行的途径,当面板各点透射率 $s(x,y)$ 等于要求得到的目标振幅透射率 $t(x,y)$,或强度透射率 $T(x,y)$ 的平方根时,令

$$s(x,y) = t(x,y) = \sqrt{T(x,y)}, \quad (3)$$

便能实现目标的强度整形。

根据以上分析,要把高斯光束整形成为平顶光束,只需要使目标振幅透射率函数等于与入射高斯分布相对应的“反高斯函数”;而对于钹玻璃的增益预补偿,如果能得到准确的钹玻璃在水平方向上的增益曲线,便可以设计目标强度透射率等于相应的“反增益函数”,用以设计二元面板各点的透射率分布。

2.2 误差扩散法的原理

在计算机图形学中,有一种数字半色调技术 (digital half-toning),用于灰度图象的阶调重现。原理是用 0 和 255 的二元灰度来重现 0~255 之间的任意灰度分布。该技术经过发展,包括最初的有序抖动法,到后来的误差扩散法、点扩散法、蓝噪声半色调法、DBS 半色调法、LUT/TLUT 半色调法和调频/调幅半色调法等。图像灰阶重现和目标透射率的模拟有很大的相似性,即在单色平面波入射的情况下,目标透射率可等效看成面板的“灰度”:前者是从 0 到 1,后者从 0 到 255。因此联想到可以用数字半色调技术来设计二元面板。

数字半色调技术里面应用最为广泛的是误差扩散算法 (Error diffusion algorithm),最早由 Floyd 和 Steinberg 提出^[12,13],先阈值量化图像像素,然后将量化的误差扩散到相邻的未处理的像素上。计算表明,误差扩散法已经可以准确地重现图像灰度,而后的各种半色调法只是着眼于改善图像细节质量和视觉效果。

按照误差扩散算法,首先把二元面板等分成 $N \times N$ 个像素,每个像素的透射率取值要么为 0,要么为 1;而目标透射率 T_{target} 取值在区间 $[0,1]$ 之间。Floyd & Steinberg 误差扩散算法采用从左到右,从上到下的顺序对二元面板的像素进行扫描。初始时,设置目标透射率 $t(m,n) = T_{\text{target}}$, T_{target} 即目标振幅透射率。若 $t(m,n) > 0.5$,则对应像素取值 $s(m,n) = 1$;否则 $s(m,n) = 0$ 。赋值产生的误差被“扩散”到邻近未处理的像素,用以补偿二值化产生的偏差。设 $e(m,n) = s(m,n) - t(m,n)$,在扫描邻近的像素时,目标透射率 $t(m+a, n+b)$ 用

$t(m+a, n+b)+c(a, b) \times e(m, n)$ 代替, $c(a, b)$ 为误差加权系数。在 Floyd & Steinberg 的算法中, 仅对邻近的四个像素 $(m+1, n-1)$, $(m+1, n)$, $(m+1, n+1)$ 和 $(m, n+1)$ 进行上述加权的误差补偿。对应的加权系数为 $c(1, -1) = -3/16$, $c(1, 0) = -5/16$, $c(1, 1) = -1/16$, $c(0, 1) = -7/16$ 。然后继续按原有路径对剩下的象像进行同样的处理。

除了误差扩散算法之外, 随机抖动算法(Random dither algorithm) 能够实现灰阶重现, 且算法更为简单。对每个像素, 令其透射率随机在 0 到 1 之间取一个值, 如果该值比该点目标透射率小, 则设其透射率为 1, 反之则设为 0。该算法虽然计算简单, 但是利用该算法得到远场强度分布为白噪声分布, 将会影响到光束远场光束质量^[14], 本文不予采用。

3 数值模拟及工程设计参量

在实验中, 使用的激光工作波长为 1053 nm, 经准直后入射到面板上的口径为 16 mm, 空间滤波器的小孔直径为 1 mm。考虑到采样点所带来的高频成分要被空间滤波器滤除, 结合理论设计算法的快慢并根据实验要求, 设计了两块面板, 分别是: 1) 把基模高斯光束整形成为口径为 8 mm × 8 mm 的空间强度均匀分布的方形平顶光束的反高斯面板 A (Anti-Gaussian binary panel); 2) 把空间强度均匀分布的平顶光束整形成为口径为 8 mm × 8 mm 的中心与边缘强度比为 1:5 的一维抛物线状光束的一维抛物线型面板 P (Parabolic binary panel)。由于

预补偿钹玻璃增益曲线的函数与抛物线函数类似, 在尚未得知钹玻璃介质的增益曲线的情况下, 用抛物线函数代替, 用以初步验证面板的整形能力。两个面板的设计参数为: 面板大小为 8.192 mm × 8.192 mm, 共包含 512 pixel × 512 pixel, 像素大小为 16 μm × 16 μm。

设计出的面板图形如图 2 所示, 整形前后的光强分布如图 3 和图 4 (二维)。高斯光束经过反高斯面板整形后, 填充因子提高到 98.9%, 光场调制度降为 0.4%, 面板的能量利用率为 27.2%; 平顶光束经过抛物线面板整形后, 在 x 方向上边缘与中心的强度比变成 4.59:1, 面板能量利用率为 46.8%; 抛物线面板整形效果与理论的 5:1 存在 8.2% 的偏差, 是由选取像素的线宽以及空间滤波器的小孔引起。这些误差可以通过改变像素的线宽取值和滤波小孔口径来消除, 在本文第五部分会详细说明。

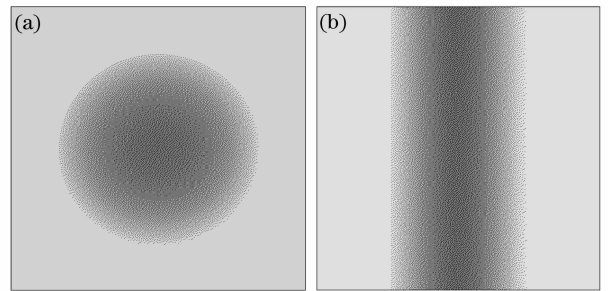


图 2 面板外观。(a)反高斯面板,(b)抛物线面板

Fig. 2 Mask profile. (a) Anti-Gaussian panel, (b) parabolic panel

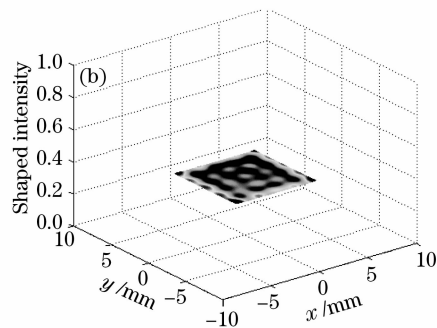
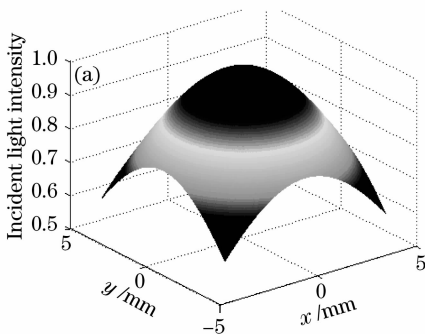


图 3 反高斯面板整形前(a)和后(b)的二维光强分布

Fig. 3 Two-dimensional (2D) distribution of the laser intensity before (a) and after (b) the anti-Gaussian panel

抛物线面板和反高斯面板在 x 方向上的一维实际透射率曲线以及与理论的偏差如图 5 所示。可以看出, 误差扩散法产生的误差很小(反高斯面板的 <2%, 抛物线面板的 <5%), 另外由于算法本身是按从左到右从上到下的顺序进行误差扩散, 因而实际透射率函数不完全对称(不对称量 <3%)。总体

而言, 误差扩散法能比较精确的重现目标透射率。

面板在远场的谱密度如图 6。可以看到误差扩散法在远场产生的噪声分布主要集中在高频部分, 具有蓝噪声分布特征。而理论计算表明, 随机抖动法则具有白噪声分布特征, 在各个频段噪声均匀分布。由于空间滤波器的小孔为一低通滤波器, 能抑

制高频噪声,因而相对随机抖动法,误差扩散法产生

的噪声经过空间滤波后能更加有效的消除。

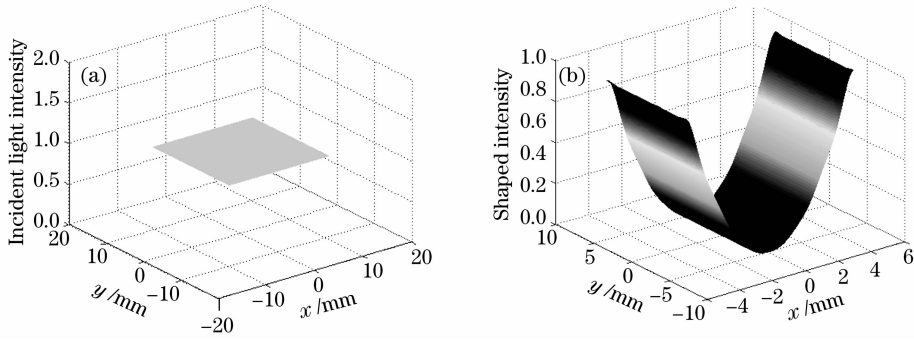


图 4 抛物线面板前(a)和后(b)的二维光强分布

Fig. 4 Two-dimensional distribution of the laser intensity before (a) and after (b) the parabolic panel

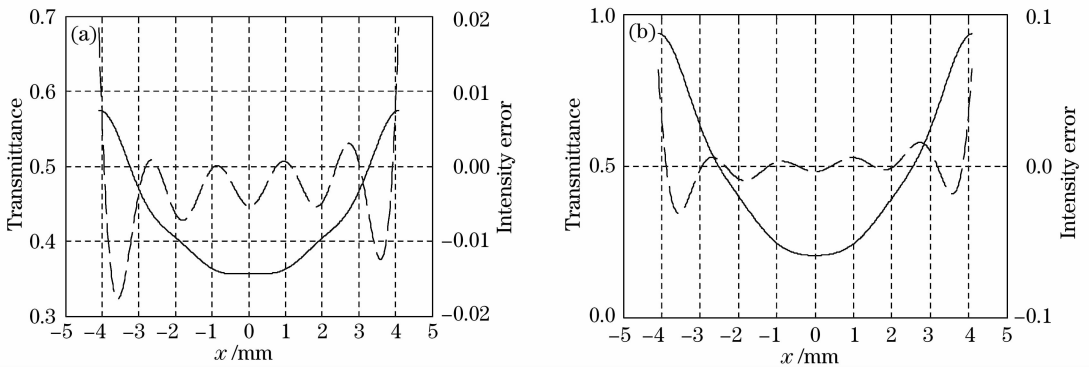


图 5 面板一维实际透射率曲线(实线)和与目标透射率的绝对偏差(虚线)。(a) 反高斯面板,(b)抛物线面板

Fig. 5 Curves of the obtained transmittance along the x direction (solid line) and the difference between the filtered intensity and the target (dashed line). (a) Panel A, (b) panel P

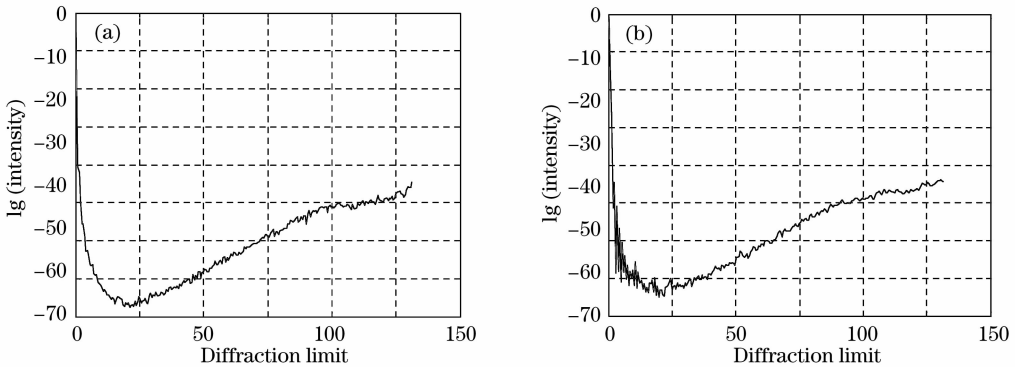


图 6 反高斯面板(a)和抛物线面板(b)在远场的功率谱密度

Fig. 6 Power spectral density (PSD) of anti-Gaussian panel (a) and parabolic panel (b) in the far field

4 实验结果

实验中采用 1053 nm 的光纤激光器作为连续光源,光路如图 7 所示。光纤直接输出的光经扩束准直到光束口径为 16 mm 的高斯光束,垂直入射到二元面板,经过软边光阑抑制菲涅尔衍射调制和空间滤波器滤波后,成像在二元面板的像面上(由于方形软边光阑尚未设计好,因此在实验中暂无

使用)。

不加任何面板时,入射高斯光束通过空间滤波器后,用 CCD 测得光强分布如图 8 所示。

入射高斯光束经过反高斯面板整形后,光强分布如图 9 所示。

整形前后,光束的填充因子由之前的 73% 提高到 85%。用 LP-3A 功率计在 CCD 探测面上测量有

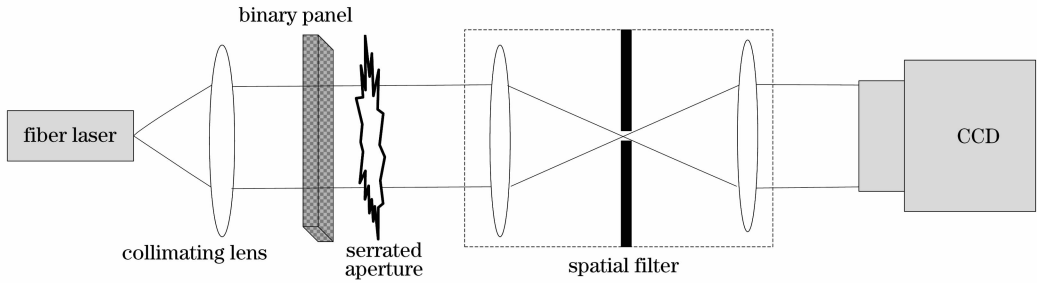


图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental setup

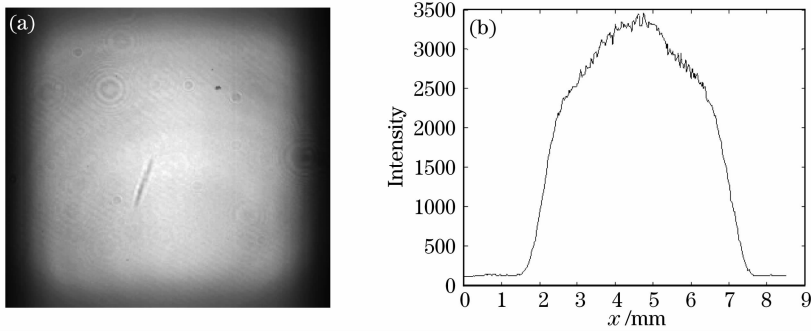


图 8 入射高斯光束不经过整形面板,在空间滤波器之后的光斑(a)和一维强度分布(b)

Fig. 8 (a) Light spot and (b) one-dimensional distribution of incident light beam after the filter (no binary panel)

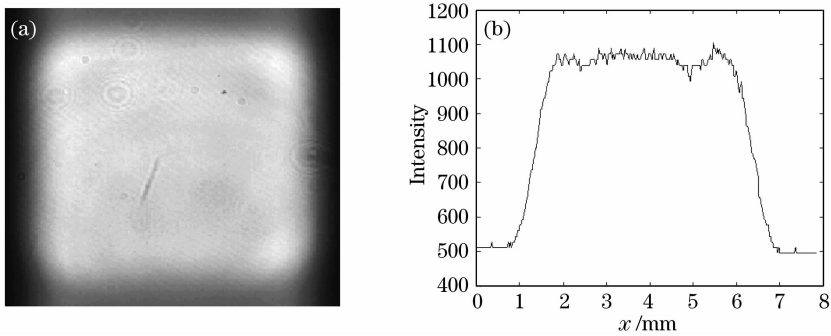


图 9 入射高斯光束经过二维反高斯整形面板,在空间滤波器之后的光斑(a)和一维强度分布(b)

Fig. 9 (a) Light spot and (b) one-dimensional distribution of incident laser intensity after the spatial filter when shaped by the anti-Gaussian binary panel

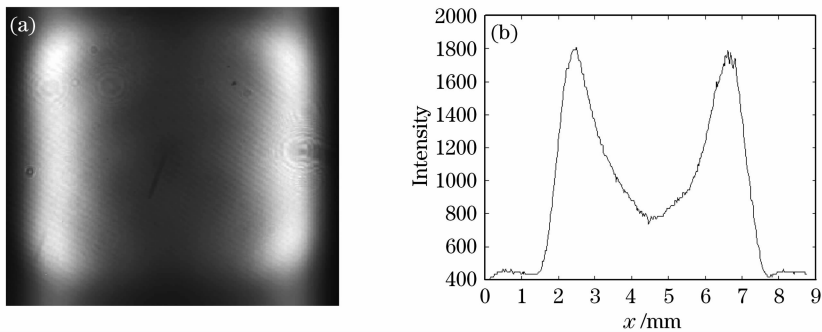


图 10 入射高斯光束经过反高斯整形面板和一维抛物线面板,在空间滤波器之后的光斑(a)和一维强度分布(b)

Fig. 10 (a) Light spot and (b) one-dimensional distribution of incident laser intensity after the spatial filter when shaped by the anti-Gaussian binary panel and further by the parabolic panel

面板时功率 P_1 以及不加面板时的功率 P_2 , 计算 P_1/P_2 , 得到面板的能量利用率为 24.1%, 与理论偏差 9.4%。

在反高斯面板后加上抛物线面板, 高斯光束入射后, 在 CCD 探测面上测得的光强分布如图 10 所示。

高斯光束经整形后, 变成光强中心和边缘比约为 1:5.18 的类抛物线光束, 相对误差约 3.6%。测得抛物线面板的能量透射率为 28.7%, 相对误差约 12%。

实验后, 对面板的破坏阈值和透射波前进行了测量。

随机抽取两块面板, 测量其对应前端 3 ns 的激光脉宽的损伤阈值, 分别为 1.26 mJ/mm^2 和 1.64 mJ/mm^2 , 可以在神光系统中使用。

用 ZYGO 干涉仪分别测量 4 块面板, 得到透射光的波前最大峰谷(PV)值 $< 0.1\lambda$ 。

5 误差分析

两块面板在实验中的整形能力与理论均存在一定偏差。面板的误差主要有两个来源: 一是面板加工过程中, 成品的透射率与 1/0 的偏差。二是光刻的各个环节引起的加工线宽误差。另外实验过程中空间滤波器的小孔的口径不同, 也将会影响整形效果。

5.1 面板实际透光率与 1/0 的偏差

面板采用光刻技术加工而成, 使用 SODA 玻璃作为光刻图形的基底, 其透光率经检测为 80% 左右, 铬层的透光率经过测量约为 1%, 这与理论设计的透射率为 1 或 0 存在偏差。经过分析计算, 铬层透射率与 0 的偏差会对整形效果产生较大误差。

图 11 和图 12 表明了这种偏差会带来的影响。图 11 中, 虚线代表抛物线面板像素透射率为 1/0 的理想情况下, 一维中心透射率曲线; 实线代表像素透射率为 0.8/0.01 时, 面板的透射率曲线。可以看到由于透射率偏差, 使得整形能力明显降低, 中心和边缘强度之比变为 3.84:1, 比理论计算值偏差了约 22.7%。点划线则代表实验测得的透射率曲线, 与代表 0.8/0.01 透射率的实线相差较小。图 12 则对应的是反高斯面板的情形: 透射率因素使得中心边缘强度比降为 1.92:1, 相对误差达 11.6%。可以看出, 像素实际透射率与 1/0 的偏差是面板整形误差的主要来源。

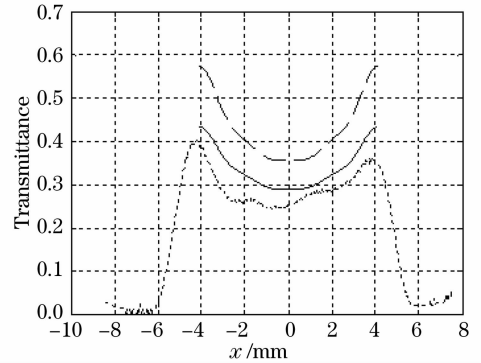


图 11 反高斯面板实际透射率与 1/0 的偏离造成的整形偏差(长划线为 1/0 透射率曲线, 实线为 0.8/0.01 时的透射率曲线, 点线为实验曲线)

Fig. 11 Transmission curve (dash line for 1/0 pixel transmission, solid line for 0.8/0.01 pixel transmission, dot line for experimental curve)

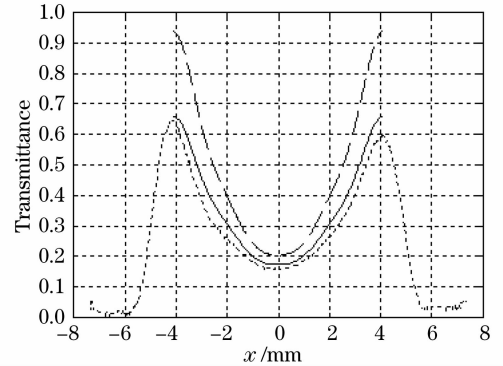


图 12 抛物线面板实际透射率与 1/0 的偏离造成整形偏差(长划线为 1/0 透射率曲线, 实线为 0.8/0.01 时的透射率曲线, 点线为实验曲线)

Fig. 12 Transmission curve (dash line for 1/0 pixel transmission, solid line for 0.8/0.01 pixel transmission, dot line for experimental curve)

根据以上分析, 在理论设计时, 考虑像素的实际透射率, 采用反馈算法, 对其进行预补偿设计, 可以基本上消除这种误差。图 13 是进行透射率预补偿设计后, 面板的透射率曲线(归一化后)。可以看到经过预补偿后, 抛物线面板(左图)中心边缘强度比恢复为 4.53:1, 相对误差降至 1.4%。而反高斯面板(右图)中心边缘强度恢复为 2.15:1, 相对误差降低为 1.2%。

本实验中使用的面板, 在设计阶段已经经过预补偿。用未经补偿的面板做对比实验, 反高斯和抛物线面板结合使用时, 高斯光束整形成为中心边缘光强比变为 1:3.3。可见用该算法能很好地弥补透射率带来的影响。

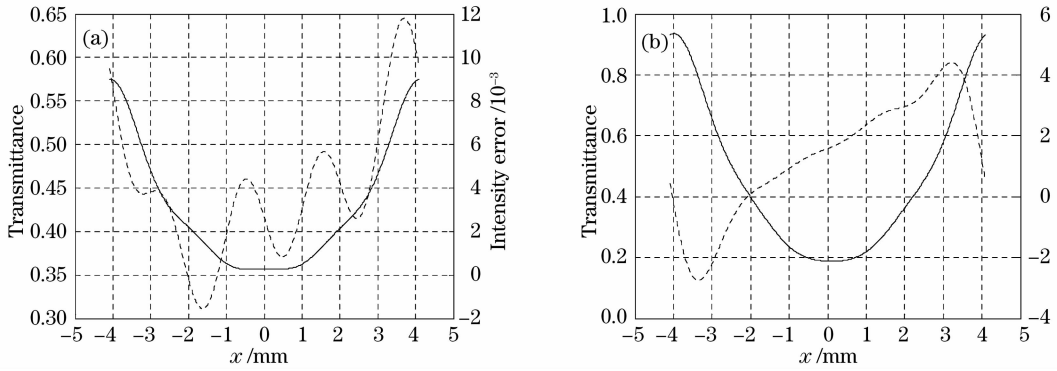


图 13 经过透射率预补偿设计后,反高斯面板 (a)和抛物线面板(b)的透射率曲线(实线为经过补偿之后的面板透射率,点线为与理论透射率的偏差)

Fig. 13 Transmission curve after precompensation design for pixel transmission error (solid line for the transmission after precompensation, dot line for the precompensation error)

5.2 面板最小像素尺寸大小不一致

面板加工的光刻流程的刻蚀步骤一般采用湿法刻蚀。湿法刻蚀会由于侧壁过量刻蚀等固有属性,产生线宽偏差,使得面板透光的最小像素的尺寸不能严格地等于设计值,这也是面板制作过程中主要的误差来源之一。

不难想出,当面板的目标透射率很小时,面板的透光像素处于分离的状态,而当目标透射率较大时,面板的不透光像素处于分离的状态。对这两种情况,由过量刻蚀引起的线宽误差,与透射率误差之间存在定量而且简单的函数关系^[15]。

当目标透射率小于 10%时,

$$T_{\text{obtained}} = T_{\text{target}} \times (S_{\text{blank}}/S_0)^2. \quad (4)$$

当目标透射率大于式等于 45%时,

$$T_{\text{obtained}} = \left[(1 - \sqrt{T_{\text{target}}}) \times \frac{S_{\text{metal}}}{S_0} - 1 \right]^2. \quad (5)$$

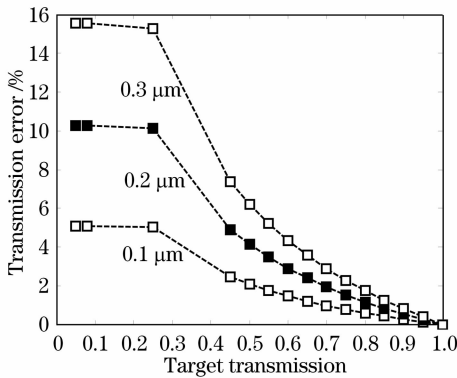


图 14 误差为 0.3 μm,0.2 μm,0.1 μm 时透射率误差随目标透射率变化的曲线

Fig. 14 Transmission error versus target transmission at different errors of 0.3 μm, 0.2 μm, 0.1 μm

其中, S_{blank} 和 S_{metal} 分别是透光像素和不透光像素的实际面积, T_{target} 和 T_{obtained} 分别是目标透射率和像素线宽误差所致的实际透射率。

图 14 是当像素线宽为 16 μm×16 μm 时,刻蚀误差分别为 0.3 μm,0.2 μm 和 0.1 μm,引起面板的实际透射率与目标透射率的相对误差曲线。可见过量刻蚀会使面板实际的透射率变大,而且目标透射率越小的部分,偏差越大(最大达 16%)。

由于面板加工的设备原因,刻蚀过程产生的偏差具有随机性,无法进行有效的预补偿。

5.3 空间滤波器小孔口径的变化

空间滤波器小孔在整形过程中起到滤高频通低频,使得整形效果平滑化的作用。小孔的大小不同,对整形效果也会产生一定的影响。

实际透射率与目标透射率的均方根误差为

$$e_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{\iint_s [T_{\text{obtained}}(x,y) - T_{\text{target}}(x,y)]^2 dx dy}}{\sqrt{\iint_s T_{\text{target}}(x,y)^2 dx dy}}. \quad (4)$$

表 1 显示了均方根误差与小孔直径的关系。随着小孔直径的增加,均方根误差先达到一个最小值(小孔直径约 2.4 mm 时),然后缓慢增大。实验中,小孔的直径为 1 mm。此时均方根误差 $e_{\text{rms}} = 1.9\%$ 。可见对误差扩散法而言,小孔口径为 1 mm 时,并不能得到最小的均方根误差。这也是误差来源之一。

表 1 均方根误差与空间滤波器小孔直径的关系

Table 1 Relation of e_{rms} and diameter of the pinhole of the spatial filter

Pinhole diameter /mm	0.8	1	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4
e_{rms}	0.0297	0.019	0.0135	0.0119	0.0124	0.013	0.0146	0.0161	0.0176

6 结 论

根据高功率激光系统对空间整形单元的要求,采用误差扩散算法设计了两块二元面板:反高斯面板以及抛物线面板,用以将入射的高斯分布的激光光束整形为平顶光束,进一步整形成为强度分布为抛物线函数的光束。实验结果表明,两块二元面板均具有相应的整形效果,但与理论设计目标还存在一定的偏差。误差分析发现,误差主要由面板的像素大小取值和实际透射率偏差引起。

在理论设计阶段,选择最优的像素,并在设计时考虑到面板实际透射率,进行反馈补偿,可以基本消除这两项最主要的误差来源。另外,把面板图形转刻到镀膜基片,通过镀增透和高反膜,也可以在一定程度上弥补透射率偏差。但由于设备以及流程的原因,转刻中的成品率不高,使得这种方法成本比较昂贵。

参 考 文 献

- 1 J. K. Crane, R. B. Wilcox, M. Hermann *et al.*. The NIF Injection Laser System. UCRL-LR-105821-99-1
- 2 Ian N. Ross, Pavel Matousek. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(12): 2945~2956
- 3 A. C. Erlandson, C. Marshall, M. Rotter *et al.*. Design and Performance of Flashlamp-Pumped Nd:Glass Amplifiers for the NIF. UCRL-LR-105821-98-4
- 4 Zhang Hua, Fan Dianyuan. Investigation of the amplified spontaneous emission in Nd:glass disk laser amplifier[J]. *Acta*

Physica Sinica, 2000, **49**(6): 1047~1051

张 华,范滇元. 钹玻璃片状放大器自发辐射放大特性的研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**(6): 1047~1051

- 5 He Shaobo, Yu Haiwu, Zheng Wanguo *et al.*. Research of amplified spontaneous emission in high power slab laser amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(5): 603~606

贺少勃, 於海武, 郑万国 等. 高功率激光片状放大器中自发辐射放大研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(5): 603~606

- 6 B. M. van Wousterghem, J. T. Salmon, R. W. Wilcox *et al.*. Beamlet Pulse-Generation and Wavefront-Control System. UCRL-LR-105821-95-1

- 7 Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1698~1704

杨向通, 范 薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1698~1704

- 8 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1107~1111

陈怀新, 隋 展, 陈镇培 等. 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): 1107~1111

- 9 M. W. Bowers, M. A. Hennesian. NIF Beam Shaping Masks
- 10 Thomas J. Suleski, Donald C. O' shea. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication. 1. Commercial slide imagers[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(32): 7507~7517

- 11 Donald C. O' shea, Willie S. Rockward. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication. 2. Spatially filtered half-tone[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(32): 7518~7526

- 12 R. W. Floyd, L. Steinberg. An adaptive algorithm for spatial grayscale[J]. *Proc. SID*, 1976, **17**(2): 75~77

- 13 Keith T. Knox. Error diffusion; a theoretical view[C]. *SPIE*, 1993, **1913**: 326~331

- 14 Design and Analysis of Binary Beam Shapers Using Error Diffusion. *LLE Review*, **108**