

数字微镜器件用于光束空间整形

黄大杰 范 薇 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联合实验室, 上海 201800)

摘要 介绍了数字微镜器件(DMD)的工作原理,当 DMD 某像素微镜的角度固定在 $+12^\circ$ 或 -12° ,其在光学上等价于控制该像素的透射率为 0 或 1。结合二元面板的设计思想,用误差扩散法对 DMD 各像素微镜的状态进行设计,用以对 1053 nm 脉冲光进行空间整形,实现了一种主动、实时的光脉冲空间整形方案。填充因子(FF)和光场调制度(FM)作为评价光束近场质量的参数,在高功率激光系统中直接影响系统的能量利用率。上述实验中,经过空间整形,光束的填充因子由 33% 提高为 65%,光场调制度由 52% 降为 28%,而且整形后的光斑大小与预期相符。最后对实验所用的 DMD 进行了能量利用率、波前畸变稳定性的测试。

关键词 光学器件;空间光调制器;空间整形;数字微镜器件;误差扩散法;二元振幅

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0502008

Spatial Laser Beam Shaping Using Digital Micromirror Device

Huang Dajie Fan Wei Lin Zunqi

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

Abstract The operating principle of digital micromirror device (DMD) is introduced. When the tilted angle of a pixel mirror is set at $+12^\circ$ or -12° , it means that the optical transmissivity of this pixel is 0 or 1. With the help of the design method in binary panels, error diffusion method is used to spatially shape the 1053 nm laser pulse, which also realizes an initiative way of spatial modulation for laser pulse. Filling factor (FF) and field modulation (FM) are both factors which decide the quality of the near field laser beam and they directly affect energy availability factor of the high power laser system. In this experiment, FF increases from 33% to 65% and FM decreases from 52% to 28% after being shaped, and the size of the shaped beam is the same as we expected. At the end, the energy availability factor and mirror stability of this DMD are tested.

Key words optical devices; spatial light modulator; spatial modulation; digital micromirror device; error diffusion method; binary amplitude

OCIS codes 140.3300; 220.1080; 230.4685

1 引 言

在应用激光的许多场合,需要对光束的振幅、相位、偏振态等进行调制,以满足后续光路系统的要求,因此各种类型的空间光调制器已成为国内外研究的热点,尤其是主动型的空间光调制器更是受到关注,如美国国家点火(NIF)装置上的光寻址液晶空间光调制器^[1],OMEGA-EP 上的硅基板(LCOS)液晶空间光调制器^[2]等。

目前主动、二维可编码型的空间光调制器主要

有:薄膜晶体管(TFT)液晶空间光调制器,LCOS 液晶空间光调制器和数字微镜器件(DMD)等。前两种调制器主要是利用液晶的混合场效应^[3],在液晶层的不同区域加不同电场,引起液晶分子排列方向和位置的变化,从而导致其相应区域的复振幅透射率发生变化,实现对光束复振幅的调制。而 DMD 则是一种被集成在寻址集成芯片上的快速数字光开关反射阵列,是由许多小型铝制反射面镜构成的,通过控制各像素微镜的反射角度实现对光束的复振幅

收稿日期: 2010-12-07; **收到修改稿日期:** 2011-02-15

作者简介: 黄大杰(1986—),男,博士研究生,主要从事空间光调制器方面的研究。E-mail: hdajie@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,主要从事激光惯性约束核聚变、高功率激光驱动器和 X 光激光等方面的研究。

调制。DMD 在投影显示、光刻、全息照相、冷原子等方面已具有广泛的应用^[4,5]。本文主要利用了 DMD 的二元振幅调制特性,采用误差扩散法^[6]设计 DMD 各像素微镜的状态,对 1053 nm 脉冲光进行空间整形,对整形前后光束的填充因子(FF)、光场调制度(FM)进行了定量比较,并对实验所用的 DMD 进行了能量利用率、相位畸变稳定性的测试,最后和液晶空间光调制器进行了比较。

2 DMD 空间整形原理

2.1 DMD 的结构

DMD 是一种反射式电寻址空间光调制器,是由许多小型铝制反射面镜构成的(例如1024 pixel×768 pixel),每个正方形铝镜子边长为 12.7 μm,像素周期为13.7 μm,微镜的转动是由它下面的存储器单元的状态来控制的,靠微镜本身与下面存储器单元之间电压差所产生的静电吸引来完成,详细结构^[7]如图 1所示。

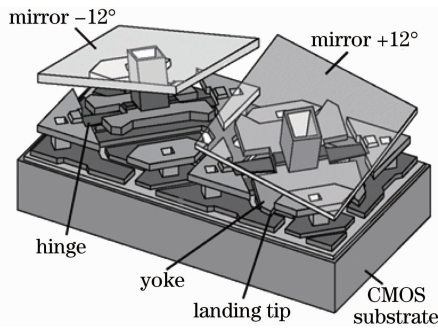


图 1 DMD 反射微镜结构

Fig. 1 Structure of the micromirror of DMD

微镜能沿对角线方向旋转±12°,DMD 光开关的原理如图 2 所示。

图 2 中,微镜的旋转轴为方形反射面的对角线方向,由于微镜可转动±θ_L=±12°,故两个方向的

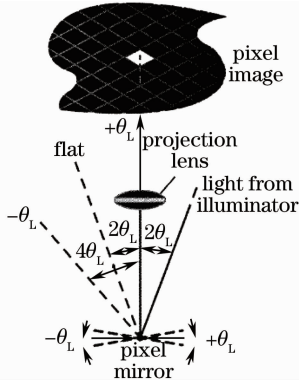


图 2 DMD 光调制原理

Fig. 2 Principle of the light modulation of DMD

反射光相差 4θ_L 的角度。沿着+θ_L 的方向为光学输出面,若像素微镜转动+θ_L,光学输出面上该像素位置处是亮的,相当于对该像素的透射率为 1,处于“开”态;若像素微镜转动-θ_L,光学输出面上该像素位置处是暗的,相当于对该像素的透射率为 0,处于“关”态。

2.2 利用 DMD 空间整形的原理

由 DMD 的结构可知,各像素的透射率可以控制为 0 或 1,而通过误差扩散法设计透射率 0、1 的分布可以实现激光光束的不同部位的强度透射率^[6]。

误差扩散法的算法流程如下:

初始时,设置目标透射率 $t(m, n) = \sqrt{I(m, n)}$,其中 $I(m, n)$ 对应计算得出的整形后的目标强度且 $t(m, n) \in [0, 1]$ 。若 $t(m, n) > 0.5$,则对应像素取值 $s(m, n) = 1$;否则 $s(m, n) = 0$ ($s(m, n)$ 表示由误差扩散法设计得到的坐标为 (m, n) 的像素的透射率,此值或者为 0,或者为 1)。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 $t(m+a, n+b) + c(a, b)e(m, n)$ 代替, $c(a, b)$ 为误差加权系数。在 Floyd&Steinberg 的算法中仅对邻近的 4 个像素 $(m+1, n-1), (m+1, n), (m+1, n+1), (m, n+1)$ 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像素进行同样的处理,如图 3 所示^[6]。

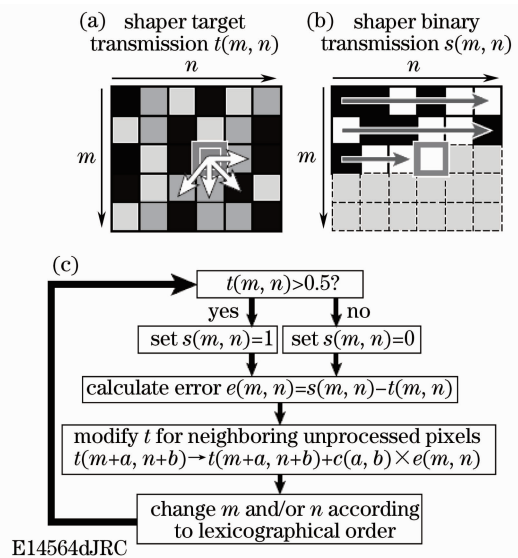


图 3 误差扩散法

Fig. 3 Error diffusion method

中国科学院上海光学精密机械研究所的神光 II 升级装置前级空间整形模块中,已采用上述方法设计振幅型二元面板,并取得了较好的空间整形效果^[8]。本实验对于 DMD 各像素微镜的设计方法与之相似,但与之相比,又具有主动、实时的优势。

3 脉冲光整形实验

实验光路如图 4 所示,激光脉冲(线偏振、脉宽 5 ns,波长 1053 nm)入射到 DMD 上,然后反射经过空间滤波器(滤波小孔为一个可变光阑),在 DMD 的像传递平面上利用科学 CCD 进行空间强度分布测试。由于 CCD 接收的光强过强易导致饱和,脉冲光入射至 DMD 以前加一格兰棱镜,通过旋转其角度,调节入射至 DMD 表面的光强。入射至 DMD 表面的光斑大小为 3.2 mm(在图 4 的空间滤波器系统中, $f_1 = f_2 = 800$ mm,所以入射至 CCD 表面的光斑大小也是 3.2 mm)。

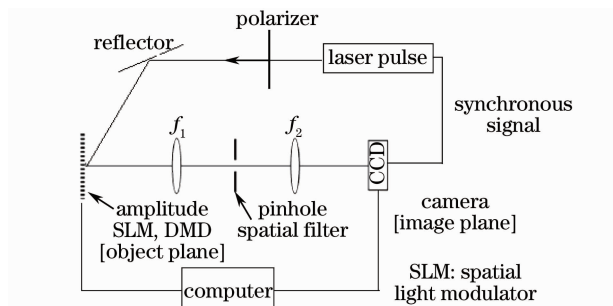


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

3.1 开关对比度测试

此时去除图 4 中空间滤波器系统中的滤波小孔,由于 CCD 的接收面位于 DMD 的像传递平面上,CCD 接收面处的光强分布与 DMD 的透光分布是完全对应的,无需误差扩散法,直接设置 DMD 透光分布如图 5(a)所示(白色部分表示透光),实验中 CCD 接收光强分布如图 5(b)所示。中间第 1024 行的光强分布如图 5(c)所示,由此得到开关对比度约为 300:1。



图 5 (a) 设置 DMD 的透光分布,(b) CCD 接收面光斑,(c) 第 1024 行的一维强度分布

Fig. 5 (a) Setup of DMD, (b) light spot shown on CCD, (c) one-dimensional distribution of light intensity in the image plane

3.2 将入射光斑整形为平顶超高斯光斑

步骤 1:光路对准(去除图 4 中空间滤波器系统中的滤波小孔)。设置 DMD 的透光分布为十字叉丝,在 CCD 接收面会有一个对应的十字叉丝像,精确调准光路,使该十字叉丝像最终位于 CCD 接收面的正中心,便于后续对 DMD 各像素分布的准确设计,如图 6 所示。

步骤 2:测量入射至 DMD 表面的光强分布(去除图 4 中空间滤波器系统中的滤波小孔)。设置 DMD 为全透,此时 CCD 测得的光强分布即认为是入射至 DMD 表面的光强分布,光强分布如图 7 所示。整形前,此光束的填充因子 $f_{FF} = 33\%$,中心 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 方形区域内光场调制度 f_{FM} 为 52% 。此处选择 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的方形区域是为了便于和

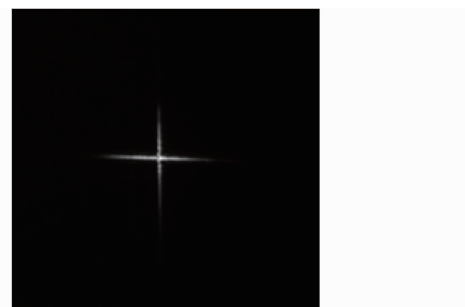


图 6 十字叉丝像

Fig. 6 Image of the cross

整形后光斑的 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 平顶区域进行定量比较。光束填充因子 f_{FF} 的定义是: $f_{FF} =$

$$\frac{\int_S I(x,y) ds}{I_{\max} S}, S \text{ 表示光斑区域,边缘强度通常取 } 1\%$$

左右,亦可根据整形精度进行调整; s 表示净口径面积;光场调制度 f_{FM} 的定义是: $f_{FM} = \frac{2(I_{max} - I_{min})}{I_{max} + I_{min}}$,用以描述空间光场的扰动强度。在高功率激光系统中,填充因子和光场调制度是光束近场质量的重要参

数,为提高系统的能量利用率,通常要求 f_{FF} 尽可能地高, f_{FM} 尽可能地低。在本文中计算 f_{FF} 时,取相对光强2%为光束边界。

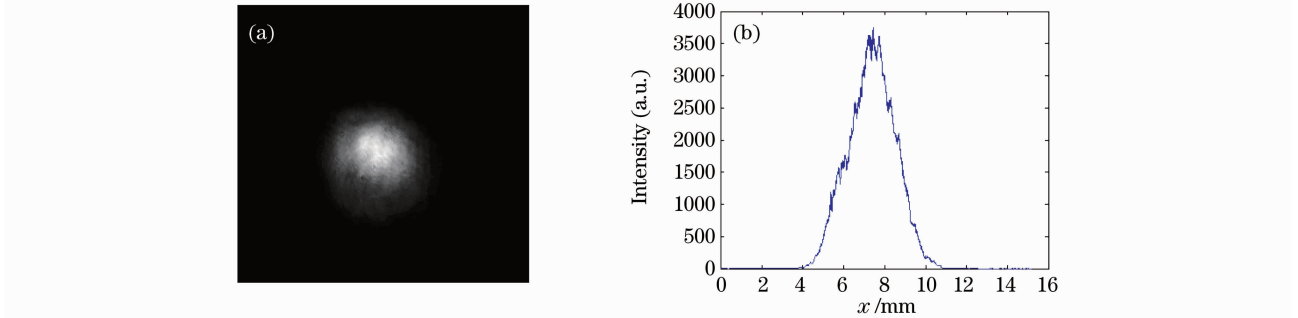


图7 (a)入射脉冲的光斑,(b)一维光强分布

Fig. 7 (a) Light spot and (b) one-dimensional distribution of the incident light pulse

步骤3:将入射光整形为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ (边界强度1%)的中心平顶、边缘5阶超高斯分布的光斑(图4中空间滤波器系统中的滤波小孔口径2 mm)。平顶超高斯分布按图8所示进行设计。

式中 x 以图形中心为坐标原点, L 即为平顶部分宽度 2.1 mm , $w=0.331\text{ mm}$ 以保证边界 $x=1.5\text{ mm}$ 处的强度为1%。图8(a)的二维分布即为图8(b)的一维扩展,稍有区别的是在4个角处要保证强度分布连续、自然地过渡。

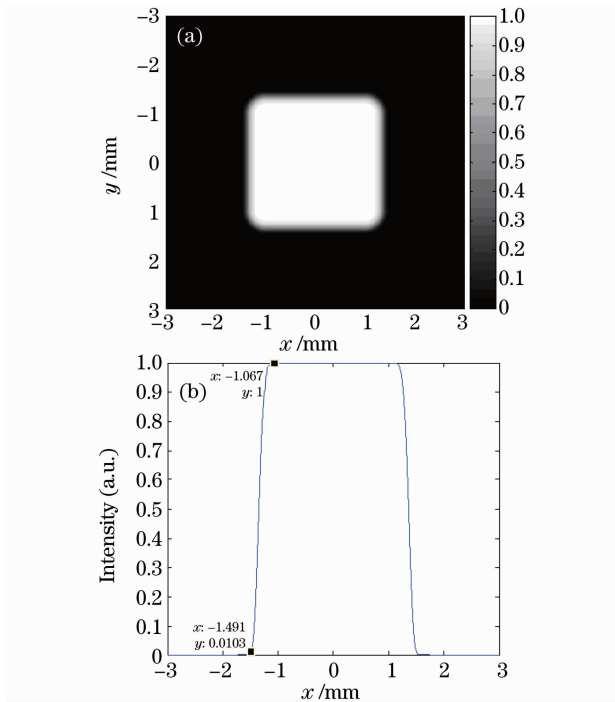


图8 (a)设计的平顶超高斯光斑,(b)中间 $y=0$ 的一维光强分布

Fig. 8 (a) Designed flat top-super Gauss light spot, (b) one-dimensional distribution where $y=0$

图8中,中心宽度为 2.1 mm 的部分为平顶区,边缘区域的强度分布满足

$$I(x) = \exp\left\{-\left[\left(x - \frac{L}{2}\right)/w\right]^5\right\}, \quad (1)$$

在设计中,对于 3 mm 的光斑宽度(边界为1%),设计平顶部分的宽度 $L=2.1\text{ mm}$,对于此 L 值的选择并没有特别严格的限制。当然若 L 过大,整形后的光斑失去了软边的效果;若 L 过小,使光斑的能量利用率降低。在以往二元面板的设计中,通常平顶部分比例取 $0.5 \sim 0.8$ 时,整形后的光束在抑制衍射和能量利用率两个方面均有较好的效果,此处设计平顶部分比例为 $2.1/3=0.7$,也在此范围内。根据图7,8,用误差扩散算法设置DMD各像素的透射率0,1的分布,整形后的光斑如图9所示。

经过整形,图9(a)的光斑填充因子为65%, $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 平顶区域光场调制度为28%。对比整形前图7、整形后图9的光斑,填充因子由33%提高为65%,光场调制度由52%降为28%,光束近场质量有明显的提高,这可以在很大程度上提高高功率激光系统能量的利用率。而且由图9(b)可知,整形后,光斑边缘1.8%强度的宽度为 3 mm ,中心平顶部分的宽度为 2 mm ,可见与预先设计的图8基本相符。

4 其他因素

从上述整形结果来看,数字微镜空间光调制器可以实现空间强度分布的实时控制。除此之外,能量利用率和器件本身的波前畸变是重点需要考虑的。

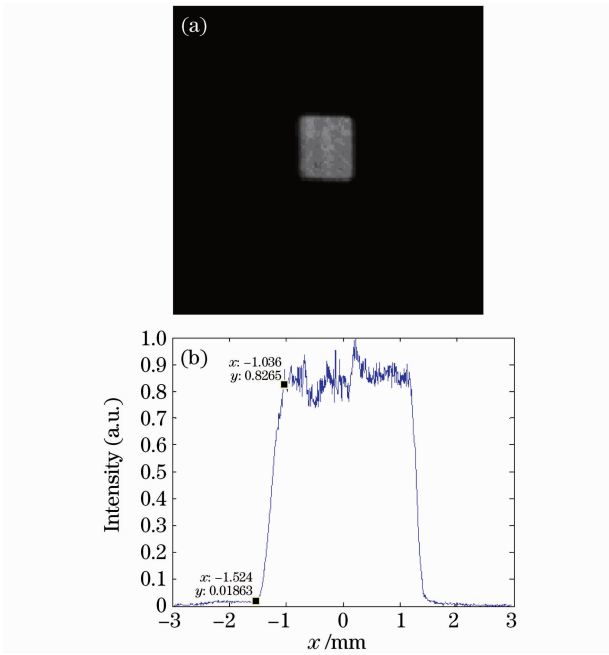


图 9 (a)入射脉冲经 DMD 整形系统后的光斑，
(b)一维光强分布

Fig. 9 (a) Light spot and (b) one-dimensional distribution of the light pulse when shaped by the shaping system with DMD

4.1 能量利用率

能量利用率在实验中经过测试为 21%，测试方法如图 10 所示。

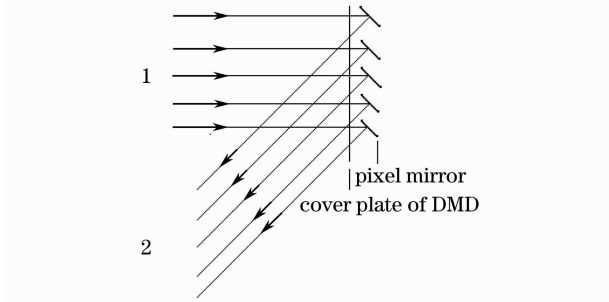


图 10 测试 DMD 能量利用率的光路

Fig. 10 Structure designed for testing energy availability factor of DMD

使 DMD 微镜均向一个方向偏转(在反射方向 2 收集反射光,则此时相当于设置 DMD 各像素为全开),测得入射 1 的光功率 $W_i = 664 \mu W$,在反射 2 方向测得 0 级像的光功率 $W_r = 140 \mu W$,能量利用率 $E = 21\%$ 。

影响能量利用率的 因素主要有两个:1)器件对所用激光波长的反射率;2)器件的面积填充因子。器件的能量利用率和反射率、面积填充因子的关系为

$$E = R \times f_{FF}^2, \quad (2)$$

式中 R 是器件的能量反射率, f_{FF}^2 是器件的面积填充因子(该器件的面积填充因子为 f_{FF}^2 ,则能量反射率为 f_{FF}^2 ,若器件反射面的材料反射率为 R ,不考虑衍射效率的影响,则有(2)式)。对于实验所用的 DMD, $R = 88\%$, $f_{FF}^2 = 86\%$,所以该器件所能达到的最大能量利用率为 $88\% \times (86\%)^2 \approx 65\%$ 。实验中能量利用率偏低是由于所用 DMD 芯片的防护玻璃对 1053 nm 光反光强烈引起的(在图 10 入射 1 的反方向有明显的反射斑)。

4.2 波前畸变

器件的波前畸变主要由 3 个因素决定:1)防护玻璃的面型;2)基元的面型;3)基元旋转后的机械稳定性。对基元旋转后中心 $\Phi = 7.6 \text{ mm}$ 的区域进行了波前畸变稳定性的测试,测试结果如图 11~13 所示。

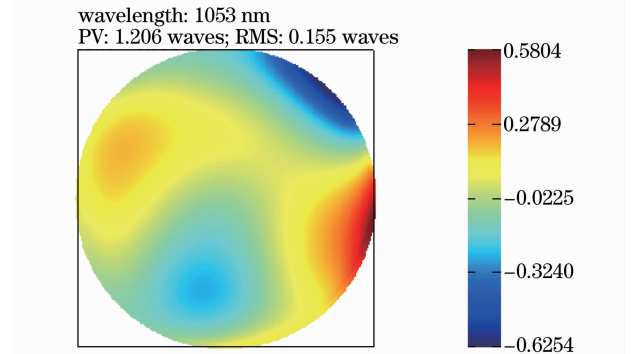


图 11 $\Phi = 7.6 \text{ mm}$ 区域波前畸变的第一次测试结果
Fig. 11 First experimental result of wave front distortion in the range of $\Phi = 7.6 \text{ mm}$

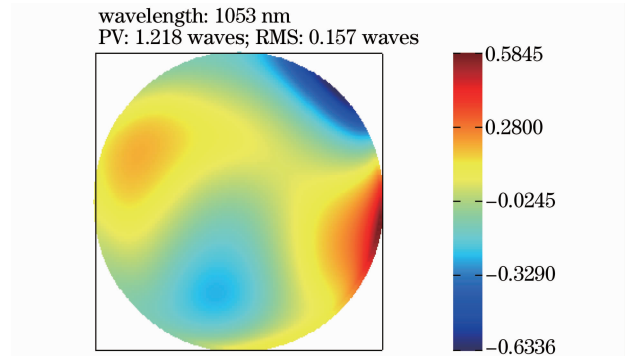


图 12 $\Phi = 7.6 \text{ mm}$ 区域波前畸变的第二次测试结果
Fig. 12 Second experimental result of wave front distortion in the range of $\Phi = 7.6 \text{ mm}$

相位畸变是利用 Hartmann 波前探测器进行测量的,每次测量的光强数据都有一定的波动,导致推出的相位分布允许存在一定范围的变化,图 11~13 的标尺最大值并不相同,但都不超过 0.01(单位是波长),其相位分布是完全一致的,所以可认为波前畸变是稳定的。

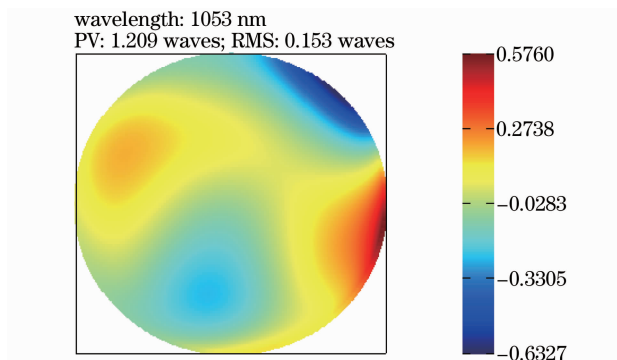


图 13 $\Phi=7.6$ mm 区域波前畸变的第三次测试结果

Fig. 13 Third experimental result of wave front distortion in the range of $\Phi=7.6$ mm

5 结 论

用误差扩散法对 DMD 各像素微镜的状态进行了设计,从而对 1053 nm 脉冲光进行了空间整形实验,实现了主动、实时的空间整形。经过整形,光束的填充因子由 33% 提高为 65%,光场调制度由 52% 降为 28%,光束近场质量有明显的提高,而且整形后的光斑大小与预期相符。最后对实验所用的 DMD 进行了能量利用率、相位畸变稳定性的测试。对于液晶空间光调制器,因其主动、可编码的特性,在许多领域已得到广泛应用^[9,10],但由于液晶分子的相互作用,当对一个像素区域的复振幅进行控制时,相邻区域也会受到影响^[11],而由 DMD 的原理可知,对其各个像素透射率是可以真正做到独立控制的,在需要用振幅型空间光调制器进行小区域调整时,DMD 要有优势。当然,若将其应用于高功率激光装置的前级系统,还需严格评估其反射面相位畸变对后续光路的影响等因素。

参 考 文 献

- 1 J. Heebner. Programmable beam spatial shaping for the National Ignition Facility[C]. *SPIE Newsroom*, 2010, DOI: 10.1117/2.1201007.003139
- 2 S. W. Bahk, E. Fess, B. E. Kruschwitz *et al.*. A high-resolution adaptive beam-shaping system for high-power lasers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9151~9163
- 3 Wang Kangjun. The liquid crystal spatial light modulator and its application[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(6): 65~67
王康俊. 液晶空间光调制器及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(6): 65~67
- 4 D. Dudley, W. Duncan, J. Slaughter. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [C]. *SPIE*, 2004, **4985**: 14~25
- 5 J. Liang, R. N. Kohn, M. F. Becker *et al.*. 1.5% root-mean-square flat-intensity laser beam formed using a binary-amplitude spatial light modulator [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(10): 1955~1962
- 6 C. Dorrer, J. D. Zuegel. Design and analysis of binary beam shapers using error diffusion[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2007, **24**(6): 1268~1275
- 7 Wang Wei, Gong Mali. Spatial light modulating characters of digital micro mirror device (DMD) at laser illumination [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, **22**(3): 31~35
王 巍, 巩马理. 数字微镜器件(DMD)在相干光照明下的空间光调制特性[J]. *光电技术应用*, 2007, **22**(3): 31~35
- 8 Xie Jie, Fan Wei, Li Xuechun *et al.*. Spatial laser beam shaping using binary panels [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1959~1966
谢 杰, 范 薇, 李学春等. 二元振幅型面板用于光束空间整形[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1959~1966
- 9 Ma Haotong, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. Near-field beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2032~2036
马浩统, 周 朴, 王小林等. 基于液晶空间光调制器的激光束近场整形[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2032~2036
- 10 Yunfeng Ma, Zhongwei Fan, Jisi Qiu *et al.*. High quality beam shaping by square soft-edge diaphragm combined with liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2): 134~137
- 11 Cai Dongmei, Ling Ning, Jiang Wenhan. The performance of phase-only liquid crystal spatial light modulator used for generating Zernike terms [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 897~903
蔡冬梅, 凌 宁, 姜文汉. 纯相位液晶空间光调制器拟合泽尼克像差性能分析[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 897~903