

电寻址振幅型空间光调制器的光束整形能力

程煜^{1,2}, 黄大杰^{1*}, 范薇¹

¹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;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 对电寻址振幅型空间光调制器(SLM)在高功率激光系统中存在的问题进行了分析。理论分析了电寻址空间光调制器的黑栅效应对光束近场光束整形效果的影响,提出了通过优化空间滤波器的小孔参数获得最佳整形效果的技术方案,并计算了小孔滤波后的能量利用率。同时,分析了液晶空间光调制器的开口率对光束整形的影响,为了提升近场整形精度,空间光调制器的开口率最好大于 64%。研究了纯振幅型空间光调制器调制过程中引入的相位畸变,从理论分析和实验验证两方面得出了附加相位分布图,计算得出最大附加相位为 0.226λ。

关键词 光学器件; 电寻址调制器; 黑栅效应; 开口率; 附加相位

中图分类号 TN761

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0405001

Beam Shaping Capability of Amplitude Spatial Light Modulator by Electrical Addressing

Cheng Yu^{1,2}, Huang Dajie¹, Fan Wei¹

¹Key Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The problems of the amplitude spatial light modulator(SLM) by electrical addressing in high power laser systems are analyzed. Firstly, the effect of the black gate of the SLM by electrical addressing on the near-field beam shaping is analyzed theoretically. The technical scheme of obtaining the best shaping effect by optimizing the aperture size of the spatial filter is proposed, and the energy efficiency of the filter is calculated. Meanwhile, the effect of liquid crystal SLM's opening ratio on beam shaping is analyzed. In order to enhance the near-field shaping accuracy, the opening ratio of the SLM should be better than 64%. Finally, the phase distortion introduced by the pure amplitude spatial light modulator is studied. The additional phase is obtained from the theoretical analysis and experimental verification. The calculated maximum additional phase is 0.226λ.

Key words optical devices; modulator by electrical addressing; black gate effect; opening ratio; additional phase

OCIS codes 140.3300; 220.1080; 230.3720

1 引言

随着激光技术的快速发展,光束整形已经成为一个重要的研究领域,尤其是在高功率激光技术研究中。液晶空间光调制器(SLM)作为主动型的光束整形器件,是一种高对比度、高分辨率、主动型、可编码的空间光调制器件^[1],是光束整形领域不可或缺的部分。

高功率激光装置中的插入器件应具有灵活可控、引入光学畸变量小、能量损失小、破坏阈值高等特点。目前,液晶 SLM,按照寻址方式可分为电寻址和光寻址两种^[2]。光寻址 SLM 利用照射在液晶光导层的寻址

收稿日期: 2016-10-09; 收到修改稿日期: 2016-12-20

作者简介: 程煜(1992—),男,硕士研究生,主要从事液晶空间光调制器方面的研究。E-mail: chengyu094@163.com

导师简介: 范薇(1975—),女,研究员,博士生导师,主要从事惯性约束聚变高功率激光驱动器前端-预放等方面的研究。E-mail: fanweil@siom.ac.cn

*通信联系人。E-mail: hdajie@mail.ustc.edu.cn

光强度来控制各像素点两端的电压,像素点之间的光是连续的,透射率和损伤阈值更高,光束品质高,可以对近场强度进行有效控制,目前上海光机所联合实验室已经研制成功^[3-4]。

电寻址 SLM 具有成本低、尺寸小、操作简便等优点,应用十分广泛。电寻址 SLM 具有振幅调制模式和相位调制模式^[5-6],对应于振幅型和相位型 SLM。相位型 SLM^[7-8]一般用来调制激光器的波前信息,而振幅型 SLM 用来调制激光的近场空间强度。但是,电寻址 SLM 中的二维光栅会减小调制器的有效调制区域,并产生黑栅效应^[9],对光束整形效果产生影响。此外,因为不同像素点加载电压的不一致,会影响液晶不同像素点的折射率,电寻址 SLM 还引入了额外相位畸变。

本文理论分析了黑栅效应对光束近场整形效果的影响,并提出了通过优化空间滤波器的小孔参数获得最佳整形效果的技术方案;分析了电寻址液晶 SLM 的开口率对成像质量的影响;利用琼斯矩阵分析电寻址 SLM 的单个像素点的相位畸变与振幅调制度的关系,实现了振幅调制所带来的相位畸变的精确计算。

2 黑栅效应对光束整形的影响

采用的电寻址 SLM 采用矩阵寻址方案,像素之间有互相绝缘的行电极和列电极,行电极、列电极和显示像素分别连接到薄膜晶体管的栅、源、漏三极上。投射在行电极和列电极上的光由于光电效应会造成电路噪声,故行电极和列电极上被镀上一层不透光的金属镀层,其振幅透射率为 0。这恰好形成了一个二维黑栅矩阵,其衍射作用会引入阵列分布的多个像,这就是黑栅效应。黑栅效应会带来两个问题:一是黑栅效应对整形效果的影响;二是开口率(透光区域与 SLM 实际大小的比值)对激光整形能力的影响。

2.1 黑栅效应对整形效果的影响

通过 MATLAB 仿真,模拟光束经过具有黑栅效应的电寻址 SLM 和 $4f$ 成像系统后,在像面上的成像结果,并与无黑栅效应的理想情况进行比较,具体分析黑栅效应的影响。设电寻址 SLM 的像素大小为 $M \times N$,像素间距为 L ,水平、竖直方向透光因子皆为 α ,理想的透射率分布为 $I(x, y)$,则 SLM 二维光栅的振幅分布为

$$t(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{\alpha L}, \frac{y}{\alpha L}\right) \times \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \delta(x - mL, y - nL) \times I(x, y). \quad (1)$$

光束经过 SLM 和 $2f$ 成像系统后,汇聚在第一个透镜的后焦面上,相当于对 SLM 后的图像进行傅里叶变换

$$T(f_x, f_y) = \mathfrak{F}[t(x, y)] = \mathfrak{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{\alpha L}, \frac{y}{\alpha L}\right) \times \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \delta(x - mL, y - nL) \times I(x, y)\right] = \alpha L^2 \text{sinc}(\alpha L f_x, \alpha L f_y) \times \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \exp[i2\pi(f_x m + f_y n)] \otimes \mathfrak{F}[I(x, y)]. \quad (2)$$

经过适当大小的小孔滤波,再经过第二个透镜,光束就在第二个透镜的后焦面成像

$$t'(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}[T(f_x, f_y)]. \quad (3)$$

将成像得到的 $t'(x, y)$ 与 $I(x, y)$ 进行比较,计算均方根误差,分析黑栅效应带来的影响。

由以上理论分析可以发现,黑栅效应对成像质量的影响,主要表现为一个卷积的过程。卷积的平滑作用会造成成像的模糊,分辨率降低。同时, $T(f_x, f_y)$ 引入的被辛格函数调制的周期分布梳状函数(即二维黑栅的衍射作用)将产生多级像,降低衍射光的利用率,且相邻衍射级之间发生部分重叠,使所需的图像像质降低^[10]。

在大型高功率激光系统中,空间滤波器^[11-13]能滤除傅里叶频谱中的高频分量、实现像传递、改变光束直径和隔离杂散光,有效地改善系统的光束质量,同时提高系统的可输出功率和可聚焦功率^[14]。为了实现最佳的近场控制能力,需要控制空间滤波器小孔尺寸。当空间滤波器小孔过大时,高频成分的存在(黑栅效应)会降低激光光束质量,当空间滤波器小孔过小时,会影响近场边缘陡峭度,从而降低全系统输出能量。

由此,设计仿真实验来计算最佳滤波孔尺寸。为了简化仿真过程,设 SLM 分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ($M=N=512$),单位像素大小 $L=8.5 \mu\text{m}$,入射光波长 $\lambda=632.8 \text{ nm}$,空间滤波器的焦距 $f=0.15 \text{ m}$ 。高斯型入射光垂直照射到 SLM 上,SLM 调制图案透射率为反抛物线型。入射光振幅分布 $I_1(r)$ 和 SLM 调制图案透射率 $P(r)$ 的表达式分别为

$$I_1(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_1^2}\right) / \exp\left(-\frac{2a^2}{\omega_1^2}\right), \quad (4)$$

$$P(r) = \begin{cases} 0.5r^2 + 0.5, & r \leq \omega_2 \\ 1, & r > \omega_2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $\omega_1 = \omega_2 = 1 \text{ mm}$, $a = \sqrt{2}/2 \text{ mm}$ 。

经过调制, 高斯型光束变为平顶光束, 出射光的理想振幅分布如图 1 所示(经过归一化处理)。为了体现黑栅效应的结构和开口率, 将图 1 中的每单个像素扩充成 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$, 并进行处理。以开口率 64% 为例, 100 pixel 中有 64 pixel 代表透光区域, 像素值取原单个像素的振幅值, 其余 36 pixel 代表黑栅的不透光区域, 振幅值为 0。对图 1 的振幅分布进行以上处理, 就得到了带有黑栅效应的振幅分布, 如图 2 所示。图像分辨率变为 $5120 \text{ pixel} \times 5120 \text{ pixel}$, 且图中可以看到很明显的二维黑栅。

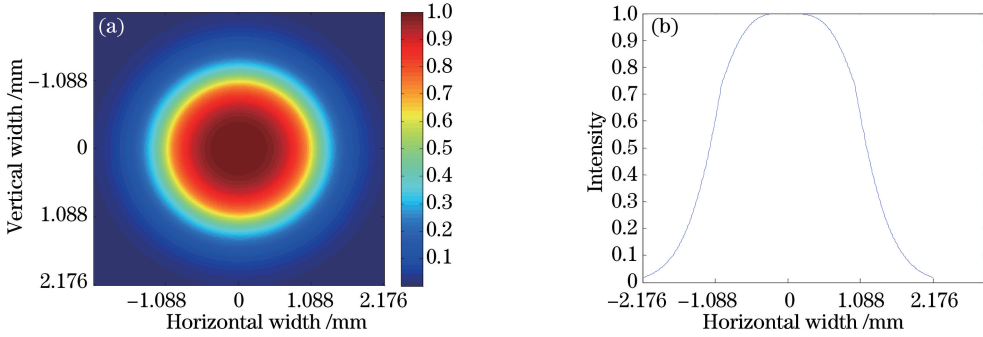


图 1 SLM 透射光。(a)理想振幅分布;(b)中心一维振幅分布

Fig. 1 Transmission light of SLM. (a) Ideal amplitude distribution; (b) one dimensional amplitude distribution in the center

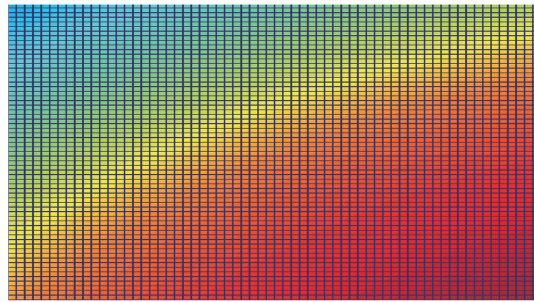


图 2 黑栅效应下的振幅分布(截选片段)

Fig. 2 Amplitude distribution in black gate effect (figure selected)

对图 2 进行傅里叶变换, 即可得到在像传递焦平面上的频谱分布, 如图 3 所示(由于中心零频强度太大, 因此对频谱进行了对数处理)。从图 3 中可以发现, 除了频域中心的零频光, 还有多级衍射光和二维黑栅带来的频域边框。这些都会降低成像图案的像质, 必须用滤波小孔滤除高频成分。从图 3 的频域分布可以计算出, 零频光到一级衍射光斑的距离为 512 pixel (约 19 倍衍射极限)。因此只要令滤波孔半径小于 512 pixel , 则就可以较好地去除黑栅效应所带来的多级衍射光。

为了得出最佳滤波孔大小, 引入误差计算公式进行数值分析。计算公式为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{1,i,j} - X_{0,i,j})^2}{M \times N}}, \quad (6)$$

式中 $X_{1,i,j}$ 为小孔滤波后的光斑分布, $X_{0,i,j}$ 为无黑栅效应的理想光斑分布。计算了不同滤波孔大小所带来的误差, 其结果如图 4 和表 1 所示。从中可以发现最佳滤波孔大小为 11 倍衍射极限(约 0.638 mm), 并且处在 $9 \sim 13$ 倍衍射极限之间的小孔都能较好地保证成像质量。但是, 当小孔大于 19 倍衍射极限(约 1.10 mm) 时, 误差将急剧增大, 说明小孔在 19 倍衍射极限以下都能基本去除黑栅效应的影响。

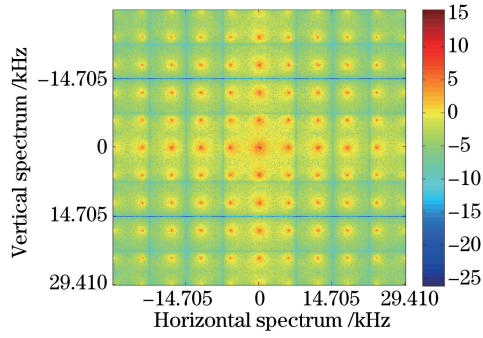


图 3 焦平面频谱分布

Fig. 3 Frequency spectrum distribution at focal plane

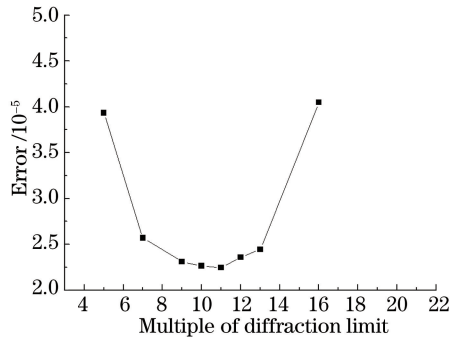


图 4 误差与衍射极限倍数(即小孔尺寸/衍射极限)的关系图

Fig. 4 Relationship between errors and multiple of the diffraction limit (aperture size/diffraction limit)

表 1 不同衍射极限倍数所对应的误差

Table 1 Errors corresponding to different multiples of diffraction limit

Multiple of diffraction limit	5	7	9	10	11
Error / 10 ⁻⁵	3.9347	2.5690	2.3104	2.2641	2.2464
Multiple of diffraction limit	12	13	16	19	20
Error / 10 ⁻⁵	2.3589	2.4442	4.0491	200	22680

图 5 显示了经过 11 倍衍射极限的小孔滤波后的成像结果及焦斑分布,其调制图案与输入图案匹配度很高,焦斑分布也完全去除了多级光的干扰。

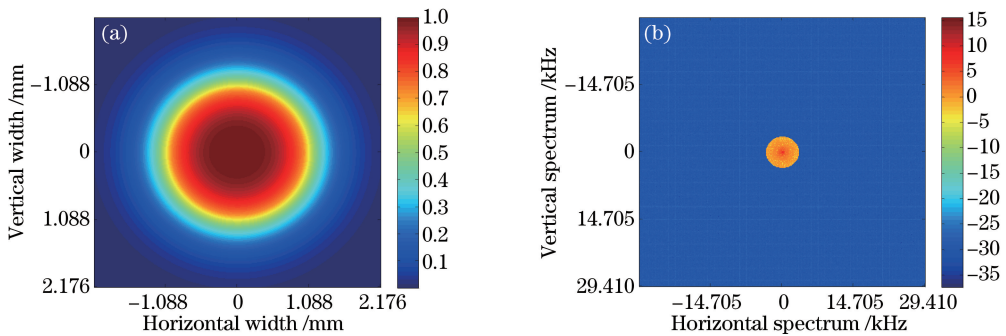


图 5 (a)小孔滤波后的像面振幅分布;(b)小孔滤波后的焦斑分布

Fig. 5 (a) Image plane amplitude distribution after filtering; (b) focal spot distribution after filtering

另外,单倍衍射极限(艾里斑大小) d 的计算公式为

$$d = 1.22 \frac{\lambda f}{D} = 0.058 \text{ mm}, \quad (7)$$

式中 $D = 2\max(\omega_1, \omega_2)$ 。最大滤波孔半径 r_{\max} 和最佳滤波孔半径 r_{best} 计算公式分别为

$$r_{\max} = \frac{Md_{f-x}\lambda f}{10} = N_{\max}d = 19d \approx 1.10 \text{ mm}, \quad (8)$$

$$r_{\text{best}} = N_{\text{best}}d = 11d \approx 0.638 \text{ mm}, \quad (9)$$

式中 $d_{f-x} = 1/(ML)$, 代表每个像素的空间频率。

经过多次实验仿真发现, 在 SLM 空间分辨率不变的情况下, 黑栅效应所带来的空间频谱分布也是不变的, 一级衍射像到零级像之间的空间距离恒为 1.10 mm, 远大于艾里斑的大小(19 倍)。所以在改变调制后 SLM 透射光束直径 D 时, 最大滤波孔半径 r_{\max} 不变。此外, 在选择最佳滤波孔半径 r_{best} 时, 选择范围总是在一级衍射像和零级像之间, 而光束直径 D 只会影响零级像的强度和大小, 不改变空间频谱分布, 所以最佳滤波孔半径 r_{best} 变化也不明显。但是, 光束直径 D 对艾里斑的大小 d 影响很大, 因而透射光斑光束直径 D 就成为了影响滤波孔衍射极限倍数的主要因素。对于不同的光束直径 D , 分别进行了计算。当 $D = 3 \text{ mm}$ 时, $N_{\max} = 29, N_{\text{best}} = 19$, 当 $D = 4 \text{ mm}$ 时, $N_{\max} = 38, N_{\text{best}} = 26$ 。

最后, 还计算了小孔滤波所带来的能量损失。在保证去除黑栅效应的情况下, 滤波小孔的半径总是介于一级衍射像到零级像之间, 能够通过滤波小孔的能量主要来自于零级像, 所以其能量损失也保持恒定。经过计算, 滤波孔的能量透射率为 83.59%, 这说明小孔滤波带来的能量损失不大, 方案具有较高的可行性。

2.2 开口率对光束整形质量的影响

研究了开口率对于光束整形质量的影响。目前市场上的电寻址 SLM 的开口率为 50%~90%, 故实验设置了 6 种不同的开口率, 分析开口率对最佳滤波孔半径和误差的影响。

前文已经提到, 最佳滤波孔的半径只与电寻址 SLM 的空间像素结构有关, 所以开口率的大小对最佳滤波孔的大小没有影响, 仿真实验也证明了这一点。但开口率对整形后激光光束的成像质量有影响。开口率越大, 成像质量就越高, 误差越小, 其实验结果如图 6 所示。从图中还可以发现, 当开口率达到 64% 后, 继续增大开口率对误差的影响并不明显, 直到开口率继续增大到足够大(90% 以上), 才会有微小的提升。从经济效益来考虑, SLM 的开口率最好大于 64%。

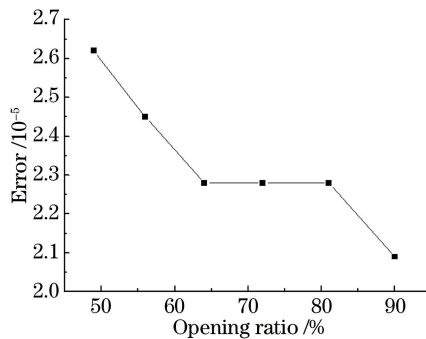


图 6 开口率对误差的影响

Fig. 6 Effect of opening ratio on errors

综上所述, 电寻址 SLM 的能量利用率由 SLM 本身的开口率和小孔滤波的能量透射率共同决定。其中, 在去除多级像影响的前提下, 小孔滤波的能量透射率相对稳定, 为 83.59%。但是开口率的大小, 会影响 SLM 整体能量利用率的大小。开口率越大, 能量利用率越高, 整形后的误差也越小。

3 振幅调制模式的相位畸变

电寻址振幅型 SLM, 只需要改变输入调制图案上各像素的灰度就可以控制液晶上各像素点两端所加的电压, 从而改变透射率的大小, 实现振幅调制。但是, 根据液晶 SLM 的琼斯矩阵^[15-16], 即使是目前商品化的电寻址纯振幅型 SLM, 由于不同像素点加载电压的不一致, 会影响液晶不同像素点的折射率, 所以依然会引入额外相位畸变。为了研究相位畸变的影响有多大, 是否会对后续的光路系统及器件产生破坏, 从理论分析和实验验证两个方面, 分析液晶透射率与附加相位之间的关系, 并计算出了振幅调制所带来的最大附加相位。

液晶 SLM 的一般结构如图 7 所示, 它由两块偏振片夹一块液晶层构成。 ψ_1 和 ψ_2 分别是起偏器和检偏

器与 x 轴的夹角。当液晶的工作模式为 90° 扭曲向列型 (TN), 即液晶分子指向矢旋转了 90° , 用 E 和 $\sqrt{T} \exp(-j\delta)E$ 分别作为输入光和输出光的复振幅, 那么光束经过的液晶 SLM 的琼斯矩阵^[15-16]为

$$T = \left[\frac{\pi}{2\gamma} \sin(\gamma) \cos(\psi_1 - \psi_2) + \cos(\gamma) \sin(\psi_1 - \psi_2) \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma} \sin(\gamma) \sin(\psi_1 + \psi_2) \right]^2, \quad (10)$$

$$\delta = \beta - \tan^{-1} \frac{(\beta/\gamma) \sin(\gamma) \sin(\psi_1 + \psi_2)}{(\pi/2\gamma) \sin(\gamma) \cos(\psi_1 - \psi_2) + \cos(\gamma) \sin(\psi_1 - \psi_2)}, \quad (11)$$

式中

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} (n_e - n_o), \quad (12)$$

$$\gamma = \left[\left(\frac{\pi}{2} \right)^2 + \beta^2 \right] / 2, \quad (13)$$

式中 β 代表双折射系数, 与 o 光和 e 光的折射率之差有关, 并随外加电压的变化而变化。令起偏和检偏角 $\psi_1 = \psi_2 = 0$, 计算出液晶透射率 T 和相位 δ 随双折射系数 β 的变化关系, 其 MATLAB 仿真结果如图 8 所示。

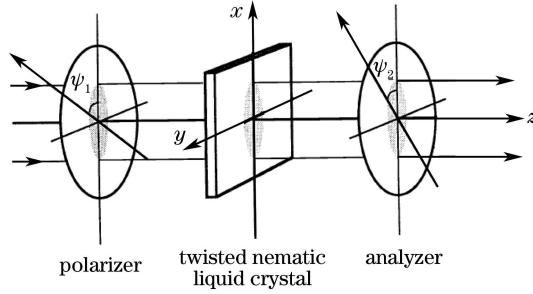


图 7 液晶空间光调制器的结构

Fig. 7 Structure of liquid crystal spatial light modulator

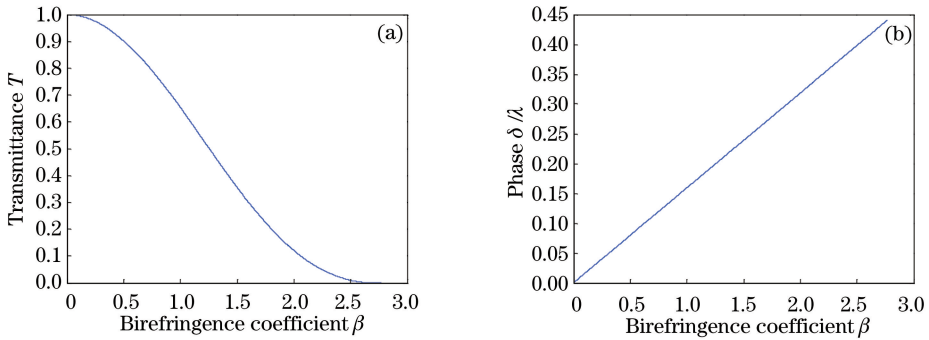


图 8 (a) 透射率随双折射系数变化关系; (b) 相位随双折射系数变化关系

Fig. 8 (a) Relationship between transmittance and birefringence coefficient; (b) relationships between phase and birefringence coefficient

在此基础上, 利用 MATLAB 拟合了透射率与附加相位之间的数值关系, 其中 β 处于 $(0, \sqrt{3}\pi/2)$, 如图 9 所示。从图中可以发现, 附加相位随着透过率的上升单调递减, 在透过率最小为 0 时, 附加相位为 0.433λ , 在透过率最大为 1 时, 附加相位为 0。实验使用的是艾谱实验室的 HD5LM85T 电寻址 SLM, 其有效透过率变化范围为 $0.4 \sim 1.0$, 在透过率最小为 0.4 时, 附加相位为 0.226λ 。

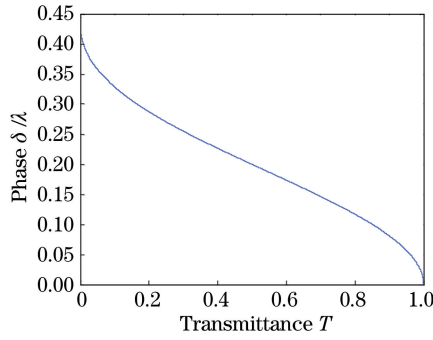


图 9 相位与透射率变化关系

Fig. 9 Relationship between phase and transmittance

在此基础上,利用 HD85T 电寻址 SLM 设计了验证实验,实验装置图如图 10 所示。调制图片通过个人电脑(PC)传输到 SLM 中,高斯型光束经过调制器后通过空间滤波器传播,最后由波前传感器探测得到实验相位分布。

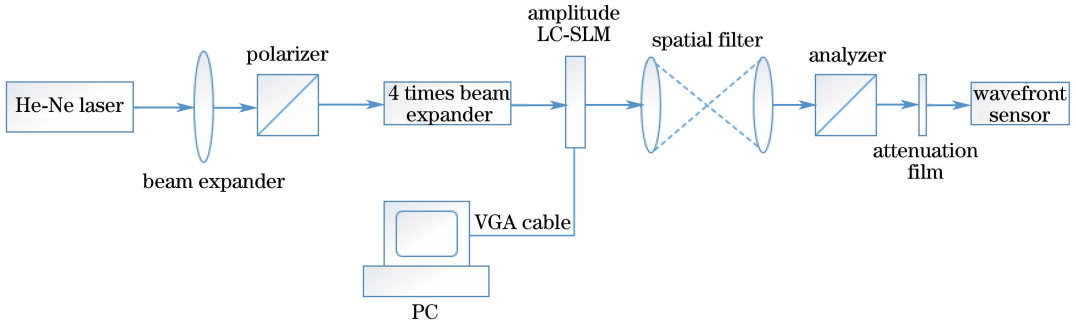


图 10 测量振幅型 SLM 附加相位的实验装置

Fig. 10 Experimental device for measuring additional phase of amplitude SLM

调制图案是透射率呈中心对称的反抛物线型调制光斑。其表达式为

$$I_2(r) = \begin{cases} (1-b)r^2 + b, & r < \omega \\ 1, & r \geq \omega \end{cases}, \quad (14)$$

式中 b 代表中心最低透射率, ω 代表光斑半径。

通过比较实验前后的相位分布,实验测得了附加相位分布图,如图 11(a)所示;根据琼斯矩阵原理(图 9 中的对应关系),对调制图案的透射率分布进行理论仿真,得到了理论附加相位分布图,如图 11(b)所示。两者匹配度较高,且因振幅调制所带来的最大相位畸变(即图片中心与边缘的相位差)也比较接近。经过计算,实验相位变化为 0.135λ ,而理论相位变化为 0.226λ 。

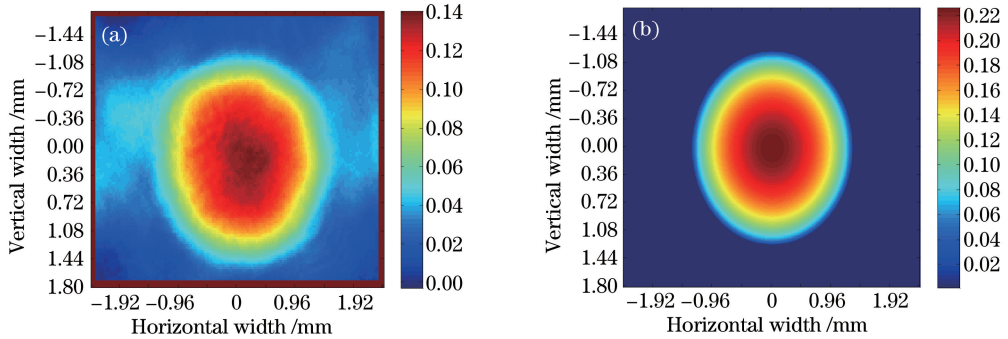


图 11 由振幅调制所带来的附加相位畸变分布。(a)实验结果;(b)理论结果

Fig. 11 Additional phase distortion distribution brought by amplitude modulation. (a) Experimental results; (b) theoretical results

对于实验与理论相位分布的差异进行了分析。首先,实验的附加相位分布是通过调制前后的相位分布相减得到的,而入射光源不能实现完全的输出稳定,这本身会给测量结果带来一定的误差($0.02 \sim 0.03\lambda$)。其次,相位调制器的边缘存在残留噪声。从图 11(a)中可以看到,传感器中心部位的相相位较于上下边缘处的相位要大,这是由传感器的残留噪声造成的,并带来约 0.04λ 的误差。最后,传感器自身也存在测量误差,很容易受到不稳定的外界光和空气流动的干扰,这些外界因素的影响难以完全消除。

综上所述,从理论和实验两方面研究得出,由液晶调制器本身性质引入的波前畸变最大为 0.226λ 。此外,经过计算,当调制器的开关比能达到 $100:1$ 时,引入的最大波前畸变为 0.433λ 。

4 结 论

本文针对电寻址 SLM 在高功率激光装置上的应用可行性进行了分析。由于电寻址 SLM 的黑栅效应,当后续空间滤波器不匹配时,会在近场上带来额外的高频调制,影响激光光束质量,严重时破坏大口径光学元件。通过小孔滤波的方法去除了黑栅效应带来的影响,而且带来的能量损失也较小,小孔滤波过程的能量透射率达到 83.59% 。

研究了调制器开口率对光束质量的影响。为了得到更高精度的控制能力,SLM 的开口率最好大于 64% 。计算了振幅型空间光调制器在振幅调制时所带来的附加相位。由于实验使用的电寻址空间光调制器的开关比只有 $0.4:1$,因此在这样的全口径透过率差异下,引入的波前畸变量为 0.226λ 。当调制器的开关比能达到 $100:1$,引入的最大波前畸变为 0.433λ 。

参 考 文 献

- [1] Sui Zhan. Beam holographic control in high power laser system[D]. Shanghai: Fudan University, 2006.
隋 展. 高功率激光系统中的光束全息控制[D]. 上海: 复旦大学, 2006.
- [2] Li Haifeng. Liquid crystal light valve and its application in large screen projection display[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
李海峰. 液晶光阀及其在大屏幕投影显示中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [3] Huang Dajie, Fan Wei, Li Xuechun, *et al.* Performance of an optically addressed liquid crystal light valve and its application in optics damage protection[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(7): 072301.
- [4] 黄大杰, 范 薇, 于国浩, 等. 振幅型光寻址液晶光阀装置及其制备方法: 中国, CN201010195229.7[P]. 2011-11-16.
- [5] Yan Shuhua, Dai Yifan, Lü Haibao, *et al.* Methods of eliminating pixelization effect in electro-addressable spatial light modulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(11): 1421-1424.
颜树华, 戴一帆, 吕海宝, 等. 电寻址空间光调制器“黑栅”效应的消除方法[J]. 光子学报, 2002, 31(11): 1421-1424.
- [6] Xie Jie. Preparation of binary amplitude panel for laser space shaping[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
谢 杰. 二元振幅型面板用于激光空间整形的研制[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008.
- [7] Lu Qiang, Sheng Lei, Zhang Xin, *et al.* Investigation on pure phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0112001.
鲁 强, 盛 磊, 张 鑫, 等. 斜入射下液晶空间光调制器纯相位调制特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0112001.
- [8] Liang Yansheng, Yao Baoli, Lei Ming, *et al.* Optical micro-manipulation based on spatial modulation of optical fields [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36 (10): 1026003.
梁言生, 姚保利, 雷 铭, 等. 基于空间光场调控技术的光学微操纵[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1026003.
- [9] Li Bing. Study of pure phase liquid crystal spatial light modulator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
李 冰. 纯相位液晶空间光调制器的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [10] Li Sha, Liu Xu, Zhang Xiaojie. Black-matrix effect of liquid crystal display in reconstructing computer-generated hologram[J]. Optoelectronic Engineering, 2007, 34(8): 41-45.
李 莎, 刘 旭, 张晓洁. 计算全息再现中 LCD 黑栅效应的研究[J]. 光电工程, 2007, 34(8): 41-45.
- [11] Simmons W, Guch S, Rainer F, *et al.* A high energy spatial filter for removal of small scale beam instabilities in high power solid state lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(9): 852-852.
- [12] Hunt J T, Renard P A, Simmons W W. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple

- spatial filters[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(4): 779-782.
- [13] Simmons W W, Speck D R, Hunt J T. Argus laser system: performance summary[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(7): 999-1005.
- [14] Xu Shixiang, Guan Fuyi, Lin Zunqi, *et al.* Design and measurement of focal lengths of lenses of large f -number used in spatial filters in a high power solid-state laser system[J]. *Chinese J Lasers*, 1996, 23(12): 1077-1080.
徐世祥, 管富义, 林尊琪, 等. 高功率激光系统空间滤波器透镜焦距的选择及其测量[J]. *中国激光*, 1996, 23(12): 1077-1080.
- [15] 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, 陈祯培, 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.
- [16] Saleh B E A, Lu K H. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(3): 240-246.