

基于空间光调制器的全息透镜记录波前像差优化方法

韩 剑 刘 娟 刘冬梅 胡 滨 王涌天

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 提出了一种基于空间光调制器(SLM)的全息透镜(HL)记录波前像差的优化方法。从波像差理论出发,经过理论分析得出透射式全息透镜的像差表达式与像差特性,绘制了全息透镜的一维像差曲线,提出了基于空间光调制器的全息透镜波前像差优化方法。使用空间光调制器加载全息图,通过单次曝光记录全息透镜减小像差的方法进行了理论分析,并针对空间光调制器的零级串扰以及视场孔径光阑对全息图和像差的影响进行了讨论。使用优化后的全息图函数计算出包含非球面信息的全息图,设计了基于空间光调制器的全息透镜记录与成像实验,实验结果与理论分析相符合。

关键词 全息; 全息透镜; 单次曝光; 空间光调制器

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209023

Optimizing Approach of Wavefront Aberration in the Recording of Holographic Lens Based on Spatial Light Modulator

Han Jian Liu Juan Liu Dongmei Hu Bin Wang Yongtian

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A novel method is presented to optimize recording wavefront aberration of holographic lens (HL) based on spatial light modulator (SLM). According to the theory of wavefront aberration, aberration characteristics and expressions are obtained, and one-dimensional aberration curves are drawn, and optimizing approach of holographic lens based on SLM is proposed. We theoretically analyze the approach of reducing aberrations by recording the holographic lens via single exposure with a hologram loaded on the SLM. The effect which zero-order crosstalk of the SLM does to the holograms as well as the stop surface of the field of view does to the aberrations is discussed. Using the optimized hologram containing the aspheric information, we design the experiment of recording the holographic lens based on the SLM, and the result is consistent with the theoretical analysis.

Key words holography; holographic lens; single exposure; spatial light modulator

OCIS codes 090.1000; 090.2890; 090.1760; 090.1995

1 引 言

近年来随着微光学和微电子学的发展,全息透镜(HL)等衍射光学元件以其重量轻、体积小等特点而重新为学者们所关注,并应用于轻小型的头盔式全息波导显示器^[1]等成像光学系统之中。相比于光刻法制作全息透镜^[2],传统的干涉法具有制作过程简单、制作样式灵活等优势。但是该方法要求在制作过程中,再现与记录条件完全一样或共轭^[3],否则会导致

全息透镜产生一定的像差。在实际情况下,完全共轭是不可能的。因此如何优化全息透镜的设计、减小全息透镜的像差成为研究的重点。

早期的学者如 Meier 等^[4-5]通过对全息再现像波前的讨论,得到了物体再现像的三级像差表达式,为全息透镜的设计奠定了理论基础。然而在实际设计全息光学系统时,由于物理空间和记录光源的限制,很难保证记录和再现时的光学波长完全一样。

收稿日期: 2013-10-15; **收到修改稿日期**: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61235002)、国家 973 计划(2013CB328801, 2013CB328806)

作者简介: 韩 剑(1988—),男,博士研究生,主要从事全息波导头盔设计、成像光学系统设计和全息三维显示等方面的研究。E-mail: hanjianbit@126.com

导师简介: 刘 娟(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事微纳光学元件设计、全息光学、衍射光学及其应用等方面的研究。E-mail: juanliu@bit.edu.cn。

为了降低或消除波长漂移带来的附加像差, Amitai 等^[6-7]提出了混合递归设计方法。但是递归方法校正像差要求实验时精确调节记录光半径和角度,增加了实验难度。由于最终全息图需要使用中间全息图的再现光充当参考光记录,所以要求中间全息图有很高衍射效率,并且对全息记录的材料、方式以及过程也有很高的要求。随着计算全息的发展,空间光调制器(SLM)技术日趋成熟,使用 SLM 加载带有非球面波前的全息图参与记录,能有效解决这个问题。

本文通过分析全息透镜的记录波前三级像差表达式,提出了一种基于 SLM 的校正记录波前像差的方法,简化了实验过程,降低了制作难度,并有效减小了全息透镜的像差。

2 全息透镜像差理论

全息透镜的设计目的就是使其在一定条件下能够达到最佳成像效果。通过改变全息记录的光源距离、偏离角度、使用波长、底板的形状(平面或曲面)或乳胶的体积变化因子等可变参数,使实际输出波前与期望输出的理想波前像差最小,即像差函数最小。

根据全息光学的基本原理,无像差的条件就是再现过程与记录过程完全一样,或者与记录过程共轭。全息图的像差可以表示为理想像面波前位相分布 Φ_d 与实际像面波前位相分布 Φ_j 之差^[4],即

$$\Delta = \Phi_d - \Phi_j, \quad (1)$$

由全息图记录与再现的物像关系知,实际再现像面波前的位相分布为

$$\Phi_j = \Phi_C \pm (\Phi_O - \Phi_R), \quad (2)$$

式中 Φ_C 、 Φ_O 、 Φ_R 分别为再现波、物光波和参考波在全息图平面上的位相分布,符号“+”适用于原始物体的虚像,“-”适用于其共轭实像。将(2)式代入(1)式得全息图的像差为

$$\Delta = \Phi_d - \Phi_C \mp (\Phi_O - \Phi_R). \quad (3)$$

如图 1 所示, X-Y 平面为全息图平面, $P(x, y)$ 为其上任意一点,空间中物点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ 位于全息图平面外,到原点 O 的距离为 R,到点 P 的距离为 r, QO 与 X-Z 平面之间的夹角为 α ,其在 X-Z 平面的投影与 Z 轴夹角为 β 。

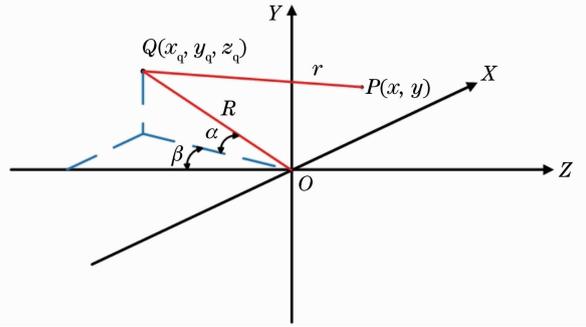


图 1 空间物点对应的空间物理量

Fig. 1 Spatial physical quantity corresponding to the object points

全息光学元件的三次像差可用其波像差来描述,波长为 λ 的单色光从左侧照明物点 Q,从点 Q 发出的球面波在全息平面 X-Y 上的位相分布为

$$\Phi_O = \frac{2\pi}{\lambda}(R - r), \quad (4)$$

由图 1 所示几何关系可知,点 Q 到点 P 的距离 r 可表示为

$$r = R \left[1 + \left(\frac{y}{R} \right)^2 + \left(\frac{x}{R} \right)^2 - \frac{2\sin\alpha}{R}y - \frac{2\cos\alpha\sin\beta}{R}x \right]^{1/2}, \quad (5)$$

用泰勒级数将(5)式展开并移项得

$$R - r = -\frac{1}{2} \frac{x^2 + y^2}{R} + \sin\alpha y + \cos\alpha\sin\beta x + \frac{1}{8} \frac{1}{R^3} (x^2 + y^2)^2 - \frac{1}{2} \frac{\cos\alpha\sin\beta}{R^2} (x^3 + xy^2) - \frac{1}{2} \frac{\sin\alpha}{R^2} (x^2 y + y^3) + \frac{1}{2} \frac{\sin^2\alpha}{R} y^2 + \frac{\sin\alpha\cos\alpha\sin\beta}{R} xy + \frac{1}{2} \frac{\cos^2\alpha\sin^2\beta}{R} x^2 + \dots, \quad (6)$$

相应地, Φ_d 、 Φ_C 和 Φ_R 均可由(4)式表示。

由(3)、(4)、(6)式得全息图的三次像差为

$$\Delta = \Delta_F + \Delta_S + \Delta_C + \Delta_A = -\frac{x^2 + y^2}{2} F + \frac{(x^2 + y^2)^2}{8} S - \frac{x^2 + y^2}{2} (C_x x + C_y y) + \frac{1}{2} (A_x x^2 + 2A_{xy} xy + A_y y^2), \quad (7)$$

式中, Δ_F 、 Δ_S 、 Δ_C 、 Δ_A 分别为场曲、球差、慧差和像散^[4],各项系数分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_C} \mp \mu \left(\frac{1}{R_O} - \frac{1}{R_R} \right), \\ S = \frac{1}{R_d^3} - \frac{1}{R_C^3} \mp \mu \left(\frac{1}{R_O^3} - \frac{1}{R_R^3} \right), \\ C_x = \frac{\cos \alpha_d \sin \beta_d}{R_d^2} - \frac{\cos \alpha_C \sin \beta_C}{R_C^2} \mp \mu \left(\frac{\cos \alpha_O \sin \beta_O}{R_O^2} - \frac{\cos \alpha_R \sin \beta_R}{R_R^2} \right), \\ C_y = \frac{\sin \alpha_d}{R_d^2} - \frac{\sin \alpha_C}{R_C^2} \mp \mu \left(\frac{\sin \alpha_O}{R_O^2} - \frac{\sin \alpha_R}{R_R^2} \right), \\ A_x = \frac{\cos^2 \alpha_d \sin^2 \beta_d}{R_d} - \frac{\cos^2 \alpha_C \sin^2 \beta_C}{R_C} \mp \mu \left(\frac{\cos^2 \alpha_O \sin^2 \beta_O}{R_O} - \frac{\cos^2 \alpha_R \sin^2 \beta_R}{R_R} \right), \\ A_{xy} = \frac{\cos \alpha_d \sin \alpha_d \sin \beta_d}{R_d} - \frac{\cos \alpha_C \sin \alpha_C \sin \beta_C}{R_C} \mp \mu \left(\frac{\cos \alpha_O \sin \alpha_O \sin \beta_O}{R_O} - \frac{\cos \alpha_R \sin \alpha_R \sin \beta_R}{R_R} \right), \\ A_y = \frac{\sin^2 \alpha_d}{R_d} - \frac{\sin^2 \alpha_C}{R_C} \mp \mu \left(\frac{\sin^2 \alpha_O}{R_O} - \frac{\sin^2 \alpha_R}{R_R} \right), \end{array} \right. \quad (8)$$

式中 $\mu = \lambda_c / \lambda_o$ ，下标为 d、C、O、R 的参数分别表示理想像、再现光、物光和参考光的相关参数。

实际制作全息透镜时，难以保证再现与记录条件完全一样或者共轭，由记录波前引入像差也是不可避免的。图 2 为透射式全息透镜的记录和成像光路示意图，使用一个轴上半径为 R_0 的球面波和角度为 β_r 的离轴平行光进行记录，再现光波长与参考光波长相同，再现时将再现物体进行频域傅里叶变换，变成一系列平行光入射到记录的全息透镜上进行成像。

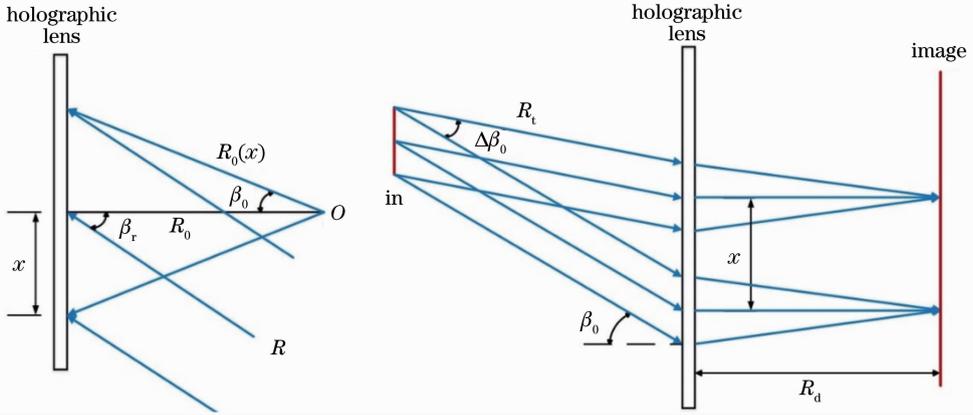


图 2 全息透镜(a)记录与(b)再现光路

Fig. 2 (a) Recording and (b) reproducing optical path of holographic lens

考虑一维的情况，即 $\alpha = 0$ ，则像差只剩 S 、 F 、 C_x 、 A_x 项。由图 2 几何关系得

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \beta_0 = \frac{x}{R_0} - \frac{1}{2} \frac{x^3}{R_0^3}, \\ R_0(x) = R_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{R_0} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{R_0} \right)^4 \right], \\ \sin \beta_r(x) = \sin \beta_r, \\ \sin \beta_c(x) = \sin(\beta_c + \Delta\beta_c) = \\ \quad \sin \left(\pi + \beta_r - \frac{x \cos \beta_r}{R_t} \right) = \\ \quad - \sin \beta_r - \Delta\beta_c \cos \beta_r = \\ \quad - \sin \beta_r + \frac{x \cos^2 \beta_r}{R_t}, \\ R_d(x) = -R_0. \end{array} \right. \quad (9)$$

分析其再现实像，并令 $R_t = R_0 \cos^2 \beta_r$ ，可得 $\sin \beta_r(x) = 0$ ，结合透镜相位变换因子

$$T(x, y) = \exp(jkn\Delta_0) \exp \left[j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right], \quad (10)$$

得到上述全息透镜的一维像差为

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_s = \frac{3}{2} \frac{x^2}{R_0^5}, \\ \Delta_{C_x} = -\frac{x}{R_0^3} + \frac{3}{2} \frac{x^3}{R_0^5}, \\ \Delta_{A_x} = -\frac{x^2}{R_0^3} + \frac{3}{2} \frac{x^4}{R_0^5}, \\ \Delta_F = \frac{1}{2} \frac{x^2}{R_0^3} - \frac{1}{2} \frac{x^4}{R_0^5}. \end{array} \right. \quad (11)$$

一维像差曲线如图 3 所示。由图 3 可知，随着像面的增大，像差也在增大。像面中心的像差理论

上为0,边缘像差最大。

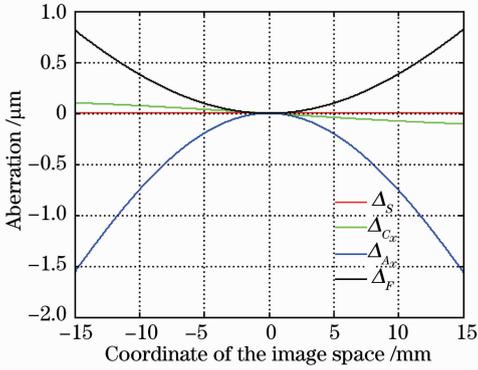


图3 $R_0 = 50$ mm时,一维像差曲线

Fig. 3 Curves of one-dimensional aberrations for $R_0 = 50$ mm

3 基于 SLM 的全息透镜像差优化

递归方法^[6-7]是使用一个或多个中间全息图产生非球面波前来记录最终全息图的方法,通过调整中间全息图的球面记录参数来使最终全息图的像差最小。但是,递归算法采用纯光学记录和曝光,要想得到预期的实验效果需要要求实验中各项记录参数不能存在偏差,实验难度较大。在此基础上,研究了采用 SLM 代替中间全息图产生非球面波前,使用一次曝光记录就能生成低像差的全息透镜,原理光路如图 4 所示。

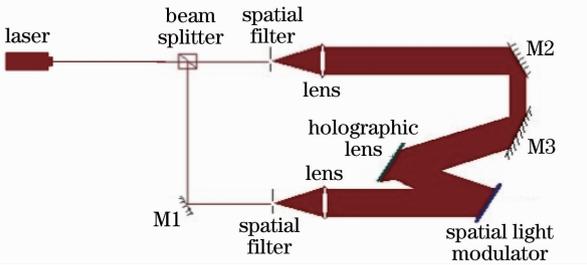


图4 全息透镜记录原理光路图

Fig. 4 Schematic diagram of the holographic lens recording

为了使实验过程简单精确,最终全息图直接使用 SLM 产生的非球面波与入射离轴平面波相干涉来记录。因此,最重要的问题是获取加载到 SLM 上的理想图函数以产生非球面波前。经分析,可采用像差函数均方差优化的方法来确定图函数,此外,考虑到 SLM 本身的周期结构所引起的多级衍射光会影响再现像的质量,因此采取加入孔径光阑的方法直接滤除高级次衍射光^[8]。视场光阑的加入对像差优化具有很大影响,在计算图函数时要考虑视场孔径光阑的影响。

以物面上点 A_1 、 A_2 、 A_3 为例,采用点 A_1 发出的球面波 O_1 与轴外平面波 R 记录全息透镜,如图 5 所示,考察其再现实像,由(3)式得该全息图的像差可表示为

$$\Delta = \Phi_d - \Phi_C + (\Phi_{O_1} - \Phi_R). \quad (12)$$

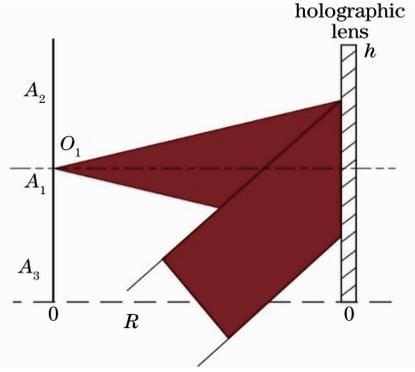


图5 透镜记录示意图

Fig. 5 Sketch of lens recording

点 $A_1(x_1, y_1)$ 、 $A_2(x_2, y_2)$ 、 $A_3(x_3, y_3)$ 发出的球面波在透镜记录面上的位相分布为

$$\begin{cases} \Phi_1 = k \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + R_0^2}, \\ \Phi_2 = k \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + R_0^2}, \\ \Phi_3 = k \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + R_0^2}. \end{cases} \quad (13)$$

由(12)、(13)式可知,当采用点源 A_1 发出的球面波再现时,无像差;采用点源位于 A_2 或 A_3 的球面波进行再现时存在像差,且像差随再现球面波与记录球面波点源距离的增大而增大。对点源位于 A_2 的再现球面波来说,要使它成理想无像差的像,则记录时球面波点源应在 A_2 位置,点源 A_3 同理。相应于再现物点 A_1 、 A_2 和 A_3 的理想全息透镜位相分布分别为

$$\begin{cases} \Phi_{h_1} = \Phi_1 - \Phi_R, \\ \Phi_{h_2} = \Phi_2 - \Phi_R, \\ \Phi_{h_3} = \Phi_3 - \Phi_R. \end{cases} \quad (14)$$

但是对于一个全息图函数来说不可能同时满足所有再现物点理想成像,为了使整个再现像面的像差最小,采用实际位相分布与每个再现物点的理想位相分布差的平方和最小的方法,来求得最佳优化的全息图函数为

$$F(x, y) = (\Phi_h - \Phi_{h_1})^2 + (\Phi_h - \Phi_{h_2})^2 + (\Phi_h - \Phi_{h_3})^2 + \dots \rightarrow 0, \quad (15)$$

对(15)式求导并令导数等于0:

$$\frac{d}{dx dy} [(\Phi_h - \Phi_{h_1})^2 + (\Phi_h - \Phi_{h_2})^2 + (\Phi_h - \Phi_{h_3})^2 + \dots] = 0. \quad (16)$$

由(13)、(16)式即可逐点求得全息图函数 Φ_h 的

分布。

在计算全息图函数时,需考虑视场孔径光阑的影响,如图 6 所示,以一维光阑为例,取全息图平面最底端为坐标原点 O ,全息图高 h ,光阑面位于左侧物面和全息透镜面中间,范围为 $(h/2-w, h/2+w)$, a_1 、 a_2 是物面上光源能够照射到全息透镜面上点 x 的上下两端的坐标范围。

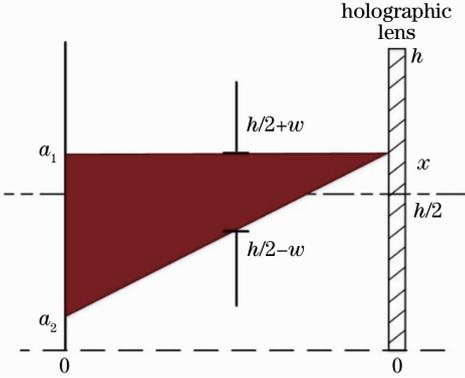


图 6 一维光阑示意图

Fig. 6 Sketch of one-dimensional diaphragm

由图 6 所示几何关系可知

$$\begin{cases} a_1 = -x + 2w + h, \\ a_2 = -x - 2w + h, \end{cases} \quad (17)$$

式中若 $a_1 > h$ 则 $a_1 = h$, 若 $a_2 < 0$ 则 $a_2 = 0$ 。

对于全息透镜面上的点 x , 物平面上, 只有 (a_2, a_1) 范围内的点源发出的光才能通过孔径光阑到达点 x 。也就是说, 采用上述方法计算全息透镜面上位置 x 处的最佳位相时, 只需要考虑 (a_2, a_1) 范围内物面的理想位相分布, 其余范围的位相分布对点 x 贡献为 0, 因此(16) 式可以表示为

$$\frac{d}{dx dy} [(\Phi_h - \Phi_{ha_1})^2 + \dots + (\Phi_h - \Phi_{ha_2})^2] = 0. \quad (18)$$

为消除 SLM 的零级串扰, 可在 SLM 上载入线性位相因子, 使有效衍射信息和零级衍射光产生偏移^[9]。通过数值计算得到的优化全息透镜位相分布为 Φ_h , 加载到 SLM 上的位相信息可以表示为

$$\Phi_{\text{SLM}} = \Phi_h + \Phi_1, \quad (19)$$

式中 Φ_1 为加载的线性位相分布, 可表示为

$$\Phi_1(x, y) = (x \sin \alpha + y \cos \alpha) \tan \theta, \quad (20)$$

式中 θ 为线性位相因子的倾斜角度, α 为线性因子倾斜点的方向角度, 可以表示为

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right). \quad (21)$$

通过上述方法就可以使有用的位相信息和零级干扰在光轴的垂直方向进行分离。记录时在零级光

前加入一个挡板就可以去除零级光的干扰, 以提高全息图的衍射效率。

4 使用 SLM 进行记录波前像差优化的数值模拟及实验结果

通过视场光阑反向扫描的方法对全息图位相函数分布进行优化, 从(18)式出发, 进行数值模拟, 选取如下基本参数: 记录透镜半径为 $R=50$ mm, 参考平面波离轴角度 $\alpha=0^\circ$, 物平面和记录的全息透镜大小为 $l \times l (l=7.68$ mm), 物方孔径光阑距透镜距离为 $R/2$, 孔径光阑直径分别为 $2l/3, l/2, l/3, l/4$ 。

以孔径光阑直径等于 $l/2$ 为例, 通过计算得到全息图位相分布如图 7(a)所示, 在此基础上, 加入线性位相偏移因子, 得到新的位相分布如图 7(b)所示。

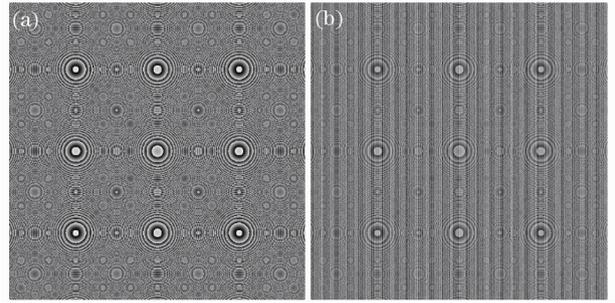


图 7 全息图位相分布图。(a) 未加载线性位相因子的位相分布图; (b) 加载线性位相因子之后的位相分布图

Fig. 7 Phase distribution of hologram. (a) Phase distribution without linear phase factor; (b) phase distribution with linear phase factor

根据图 8 所示光路, 对上述算法得到的全息透镜的成像效果进行数值模拟。选取位于 x 轴上从物面边缘到原点的一系列物点, 理论上每个物点通过上述全息透镜后, 成为不同离轴角度的平行光, 平行光经过傅里叶变换在傅里叶焦平面处聚焦于一点。

以聚焦点扩散斑的大小(像素数)来表示全息透镜的像差大小, 如图 9 所示。图中横轴表示 X 轴上物点到原点的距离, 0 表示到原点的距离为 3.84 mm, 25 表示到原点的距离为 0 mm, 纵轴表示 $X'O'Y'$ 面上扩散像点的大小。红色曲线表示未经校正直接采用半径为 $R=50$ mm 轴上球面波和轴外平行光相干涉得到的全息透镜的成像点扩散斑大小, 蓝色线是再现物光波通过优化后的全息透镜之后的扩散斑大小。

由图 9 可以看出, 与未优化的全息透镜相比, 随物方孔径减小, 再现物光经过优化的全息透镜后, 其像差改善越来越明显, 并且全息透镜的像差优化是以牺牲一部分透镜中央区域的成像质量为前提的。

图 10 为优化前后的全息透镜成像调制传递函数 (MTF) 曲线, 彩色实线所示为从中心到边缘对角线上的若干采样点, 黑色虚线所示为该全息透镜的衍

射极限。从该图可以看出边缘像面的传函曲线由小于 0.1 提升至大于 0.3, 透镜边缘像差经过优化后明显减小, 整体像差平衡且像质显著提高。

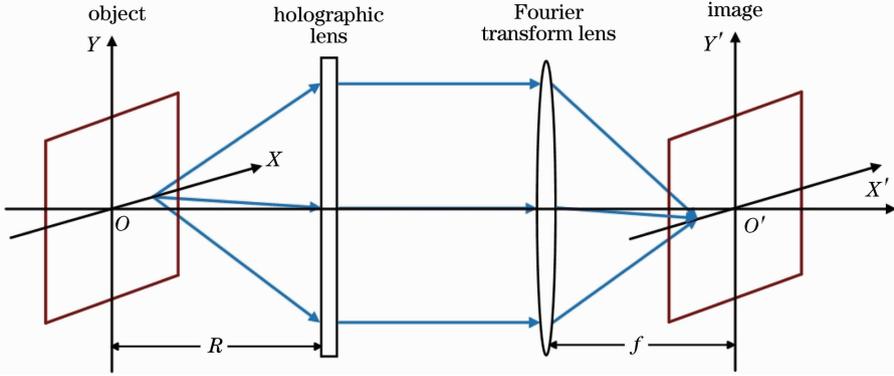


图 8 数值计算光路

Fig. 8 Optical path of numerical computation

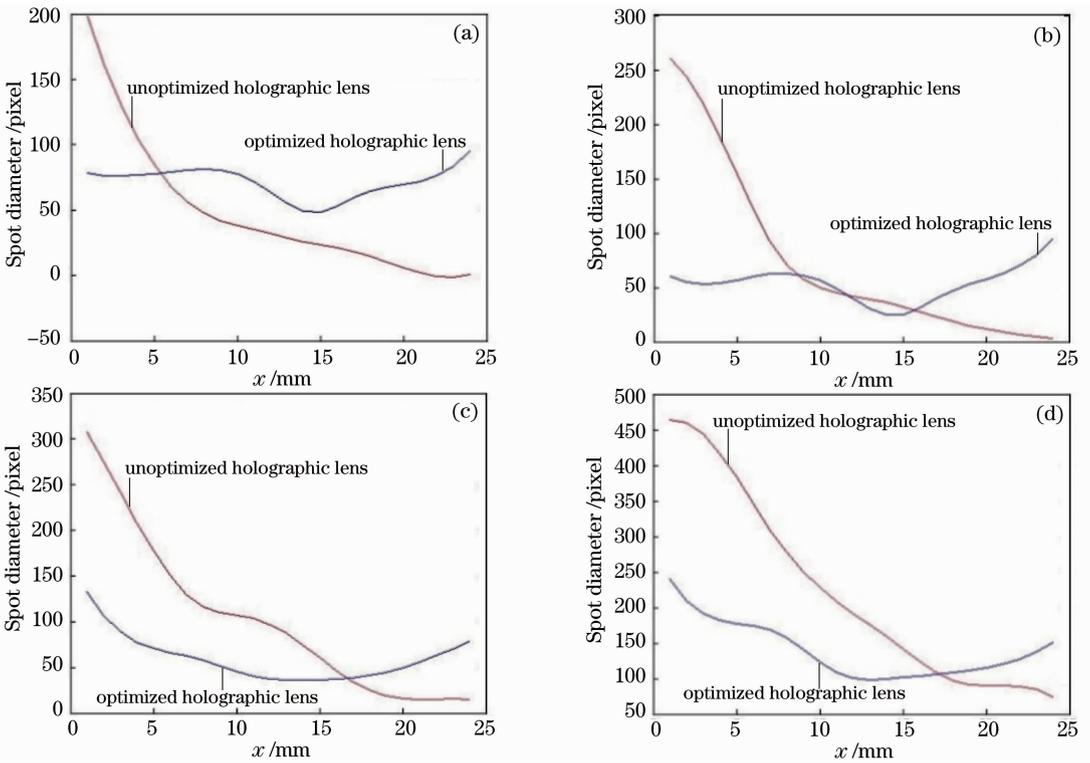


图 9 不同光阑孔径对应全息透镜的成像点扩散斑分布曲线图。(a) $2l/3$; (b) $l/2$; (c) $l/3$; (d) $l/4$

Fig. 9 Curves of spot diameter distribution of holographic lens with different diaphragm apertures. (a) $2l/3$; (b) $l/2$; (c) $l/3$; (d) $l/4$

为了保证记录精度, 需要尽量减少曝光时间, 因此在减小记录波前像差的基础上还需保证曝光量。考虑到实验所用的激光器功率, 将孔径光阑大小设定为 $l/2$ 。将计算得到的全息图函数加载到 BNS 公司的分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的 SLM 上, 进行曝光记录得到 $7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$ 的全息透镜。使用红光氦氖激光器再现, 不考虑色差的情况下观察全息

透镜的成像质量, 光功率为 47.8 mW , 到达记录表面的光功率约为 0.27 mW , 曝光时间经过多次实验测量后选择 13 s 。记录后使用分辨率板进行成像, 观察像差。图 11(a)、(b) 分别为记录好之后未进行像差校正的全息透镜的成像图片和像差校正后的实验图片。

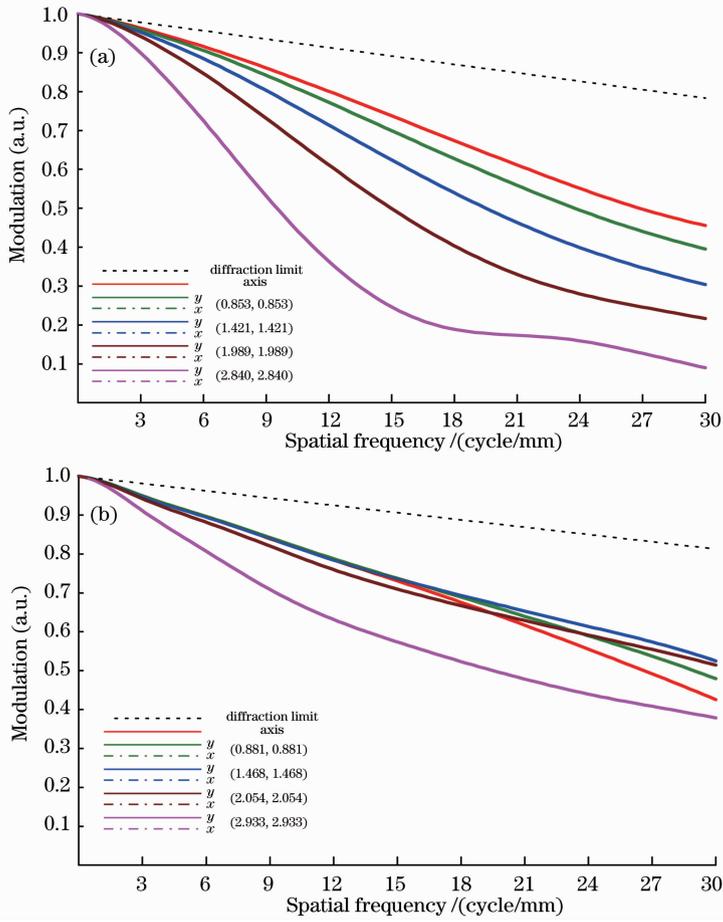


图 10 全息透镜光学调制传递函数曲线。(a) 优化前记录的全息透镜 MTF; (b) 优化后记录的全息透镜 MTF
 Fig. 10 Optical MTF curves of HL. (a) MTF of recorded HL before optimization; (b) MTF of recorded HL after optimization

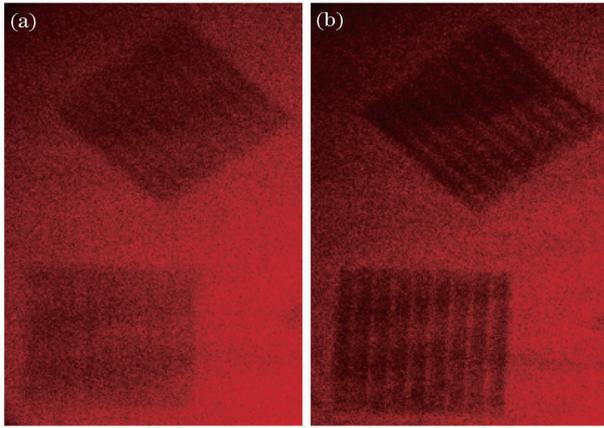


图 11 用全息透镜对分辨率版成像实验图。

(a) 未校正的全息透镜成像; (b) 校正后的透镜成像

Fig. 11 Experimental figures of resolution plate imaging via holographic lens. (a) Imaging of uncorrected holographic lens; (b) imaging of corrected holographic lens

由图 11 可以看出经过优化后的透镜成像比优化之前有比较明显的改善,分辨率以及整体像质都

得到有效提高,这和图 9(b)所示的像面弥散斑大小减小以及图 10(b)所得的传递函数提高符合得很好。验证了模拟结果的正确性以及该全息透镜记录波前像差优化方法的有效性。

5 结 论

基于 SLM 通过单次曝光记录的方法减小了全息透镜的像差。从波像差理论出发推导出了全息透镜的像差公式,使用该像差公式在考虑到孔径光阑与 SLM 零级串扰的影响情况下计算出优化后的全息图。设计了全息透镜的记录曝光实验,用 BNS 公司的分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ SLM 加载计算出的包含非球面信息的全息图,使其参与全息曝光并记录下全息透镜。用分辨率版验证该全息透镜的再现像的像差,成像结果显示像差得到校正,实验结果与理论分析相符合。

参 考 文 献

1 Zeng Fei, Zhang Xin, Zhang Jianping, *et al.*. Holographic

- waveguide head-mounted display system design based on prism-grating structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0909001.
- 曾 飞, 张 新, 张建萍, 等. 基于棱镜光栅结构的全息波导头盔显示系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0909001.
- 2 Li Xiansheng, Pu Donglin, Wei Goujun, *et al.*. Fabrication of holographic lens with digital method [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(6): 656–659.
- 李现胜, 浦东林, 魏国军, 等. 一种数字化的全息透镜制作方法[J]. *激光与红外*, 2010, 40(6): 656–659.
- 3 Zhou Haixian. *Holographic Optics—Design, Fabrication and Application*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- 周海宪. 全息光学——设计、制造和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- 4 Meier R W. Magnification and third — order aberrations in holography[J]. *J Opt Soc Am*, 1965, 55(8): 987–992.
- 5 Champagne E B. Nonparaxial imaging, magnification, and aberration properties in holography[J]. *J Opt Soc Am*, 1967, 57(1): 51–55.
- 6 Amitai Y, Goodman J W. Design of Fourier-transform holographic lenses in the presence of a recording-readout wavelength shift [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(12): 952–954.
- 7 Amitai Y, Friesem A A. Design of holographic optical elements by using recursive techniques [J]. *J Opt Soc Am A*, 1988, 5(5): 702–712.
- 8 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng, *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0309001.
- 沈 川, 张 成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0309001.
- 9 Zhang H, Xie J, Liu J, *et al.*. Elimination of a zero-order beam induced by a pixelated spatial light modulator for holographic projection[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(30): 5834–5841.

栏目编辑: 何卓铭