

多层微图案成像特性的研究

莫之畅^{1,2}, 魏劲松^{2*}, 曹清¹¹上海大学理学院, 上海 200444;²中国科学院上海光学精密机械研究所微纳光电子功能材料实验室, 上海 201800

摘要 研究了多层微图案的成像特性, 将基于光刻技术制作的微米级和高透光微图案附着在透明玻璃基板上, 这种带有图案的玻璃基板堆叠约 50 层后能由光学显微镜进行多层成像, 最终的成像质量呈上层清楚下层模糊的特点。通过光场分析排除邻近层的串扰和照明对成像结果的影响, 通过研究玻璃基片的厚度、层数, 分析了像差对成像结果的影响, 并定量分析了层间反射作为主要噪声在成像物场上的分布。最后, 提出了一种优化方案, 采用降低界面反射, 增进噪声吸收及图像处理的方式提高信噪比, 恢复底层不清晰图案。该研究可对日益增长的文档等信息进行备份存放和成像观察, 有效提高了空间利用率。

关键词 成像系统; 光刻技术; 多层成像; 微图案; 成像分析; 文档备份

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2011001

Study on Imaging Characteristics of Multilayer Micropatterns

Mo Zhichang^{1,2}, Wei Jingsong^{2*}, Cao Qing¹¹College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China;²Laboratory of Micro-Nano Optoelectronic Materials and Devices, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract In this paper, the imaging characteristics of multilayer micropatterns are studied. Micropatterns at micron scale with high light transmittance prepared via photolithography are attached to transparent glass substrates. The patterned glass substrates are in turn stacked together to around 50 layers and imaged by an optical microscope. The final image is clear on the upper layers and fuzzy on the lower layers. Through a light field analysis, the influences of crosstalk caused by adjacent layers and illumination on the imaging results are eliminated. The influence of aberrations is examined through thickness and number variations of the glass substrates. In addition, the object field distribution of interlayer reflection, the main noise in this imaging system, is quantitatively analyzed. Finally, an optimization solution is proposed, namely, to improve the signal-to-noise ratio and thus restore the unclear patterns of the lower layers by reducing interface reflection, enhancing noise absorption, and optimizing image processing. This research can facilitate the backup, imaging, and observation of the growing number of documents and thereby effectively enhance space utilization.

Key words imaging system; photolithography; multilayer imaging; micropattern; imaging analysis; document backup

OCIS codes 110.4280; 100.2960; 110.3960

1 引言

成像技术的发展为人类的生活带来许多便利,

在生物成像、卫星成像、水下成像等^[1-3]领域, 为了提高系统的成像质量, 人们建立和改进了雾气、海水等复杂环境中的传递函数模型^[4-5]。此外, 人们还对成

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-04-22; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51672292, 61627826)

通信作者: *weijingsong@siom.ac.cn

像噪声的来源及图像处理方法进行了研究,如鬼成像领域通过差分概念提高成像信噪比(SNR)^[6]。不同环境下成像系统的效果及噪声来源均不同,可通过增强图像的对比度、突出图像细节或利用深度学习方式增强图像质量,更理想的方法是建立符合实际的物理模型,并依据物理模型对噪声进行处理^[7-8]。

基于光刻技术^[9]可在薄玻璃片上制作特征尺寸在微米量级且具有高透光度的微图案。这些微图案由文档等信息图片微缩而来,可代替传统微缩胶片^[10]对图书馆、档案馆等机构珍贵的文档进行备份保护。制备微图案的方法有多种,其中,激光干涉光刻系统结构简单,采用相干光干涉原理实现曝光,但只能加工出简单光栅、点阵等图形^[11];激光非线性光刻利用材料的非线性吸收效应,可加工制备出微纳尺度的三维结构,但存在刻写速度慢的缺点。此外,聚焦离子束光刻、扫描探针光刻等技术都能制备出高分辨率的微图案,但同样在刻写速度方面存在不足^[12]。而激光直写光刻具有刻写速度快、自由度高的特点^[13],有利于个性化加工制备所需的微图案。为提高空间利用率,可将微图案在空间上堆叠多层,每层均可由光学显微镜直接成像,但目前关于

图案的空间堆叠成像分析还未见详细报道。关于空间堆叠的光场研究多见于传统的反射式光存储方法中,这类方法主要通过高数值孔径的物镜将激光聚焦到坑道里,然后再读取反射回来的点信号强度,容易受邻近层间串扰的影响。可通过改变层间距或膜性质等方法降低后向反射率解决该问题^[14-15],但这些方法在实际应用中的可行性不高。基于荧光双光子吸收的光盘可达到 25 层,但这类技术直接在介质材料中进行刻写,信噪比受材料吸收的影响较大^[16-17]。

针对上述问题,本文先研究了微图案的多层成像特性,明确了导致微图案成像质量退化的原因为多层基片间的来回反射光。然后,结合反射光强度与成像物面的偏移量计算,定量推导出反射噪声在物面上的分布。最后,提出了降噪方案,并结合图像处理方式增强了成像质量。

2 实验仿真

2.1 微图案的制备与成像

通过激光刻写技术在相变材料薄膜上制作微型图案,多层微图案结构的制备流程如图 1 所示。用高功率激光使写入区域受热晶化,从而增强该区域

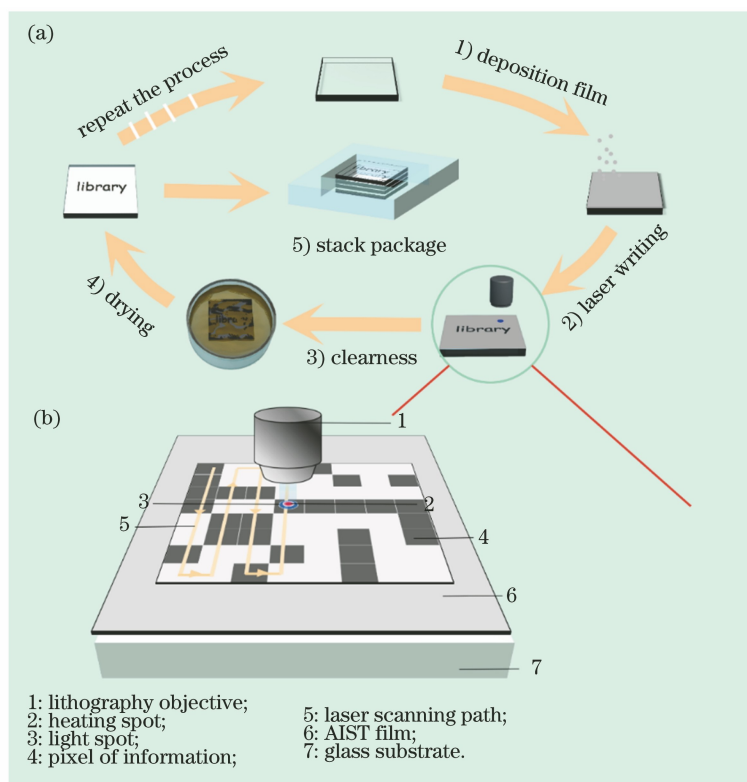


图 1 微图案的制备示意图。(a)工艺流程图;(b)激光刻写系统的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the micropattern preparation. (a) Process flow diagram; (b) schematic diagram of the laser writing system

的抗腐蚀能力,并利用清晰化技术去除未写入区域^[18-19],最终在获得具有高透光率微图案的同时使图案与盖玻片具有较高的对比度。考虑到透光率的要求,薄膜不宜过厚且薄膜过厚会增加清晰化过程的难度,使未写入区域不能完全去除;而薄膜过薄会导致清晰化过程的时间太短,难以控制实验进程,使图案也被腐蚀。因此,综合考虑透光率与工艺要求,最终选择的薄膜厚度为 20 nm。玻璃基底采用市面上常见的盖玻片,厚度为 0.17 mm,该盖玻片的透光率较高、成本较低且各项标准统一。清晰化后附着于玻璃基底上的微图案经简单清洗和吹干后就完成了单片样品的制备。薄膜材料与玻璃的性质比较稳定,且其耐高温、耐酸碱能力较强。因此,用相同

方法制备了 50 多片样品,通过环氧树脂胶将 50 多片样品堆叠起来封装,形成一个高透光率且类似玻璃硬盘的结构,环氧树脂能耐 200 °C 的高温,从而起到保护图案的作用。

测试得到单层微图案的透过率如图 2(a)所示,将多片带有微图案的玻璃片进行堆叠封装,并利用光学显微镜的透射模式进行成像,插图从左至右分别为超白玻璃基片、对薄膜进行刻写和清晰化的单层样品。成像原理如图 2(b)所示,调节载物台就能观察到每层玻璃片上的微图案。单层样品的扫描电子显微镜(SEM)图像如图 3 所示,可以发现,在不同尺度下,SEM 扫描到的微图案结构与原始图像均相符。

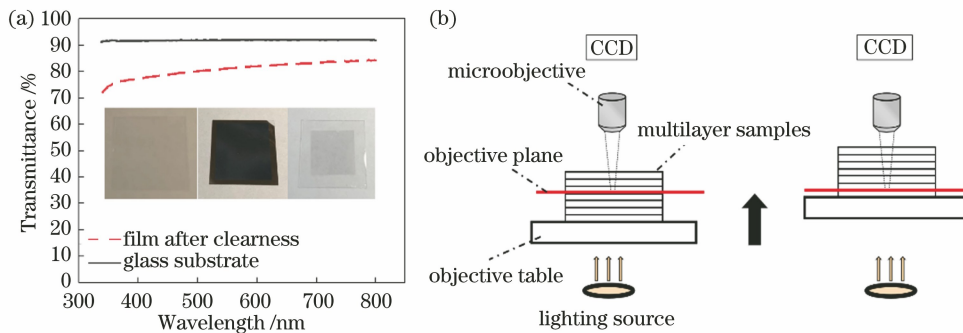


图 2 单层微图案的特性。(a)玻璃基片与微图案的透过率;(b)多层成像的原理

Fig. 2 Characteristics of single-layer micropattern. (a) Transmittances of glass substrate and micro pattern; (b) principle of multilayer imaging

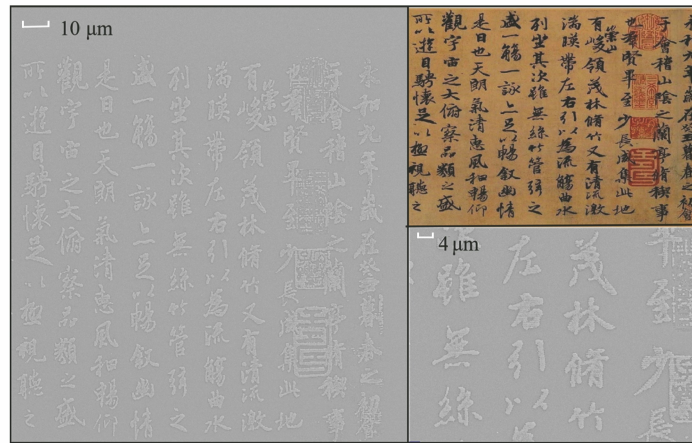


图 3 微图案的 SEM 图像

Fig. 3 SEM image of the micropattern

显微镜观察到的多层成像结果如图 4(a)所示,其中,左下角的数字表示层数,光学显微镜采用 10×物镜(数值孔径 $NA = 0.3$),相机型号为 HTC1600, CMOS 传感器的像素尺寸为 $1.335 \mu\text{m} \times 1.335 \mu\text{m}$ 。可以发现,实验共堆叠了带有相同图案的 55 层基片,最上层的字母图案非常清

楚,层数越往下,图像逐渐变模糊,最底层的字母图案几乎完全不可见。为了进一步明确成像质量的退化原因,在高对比度的分辨率板上堆叠不同层数的空白玻璃基片并进行成像,结果如图 4(b)所示。可以发现,底层图像的对比度和分辨率均较低,即便增加光源强度,也无法提升像质。这种现象与多层

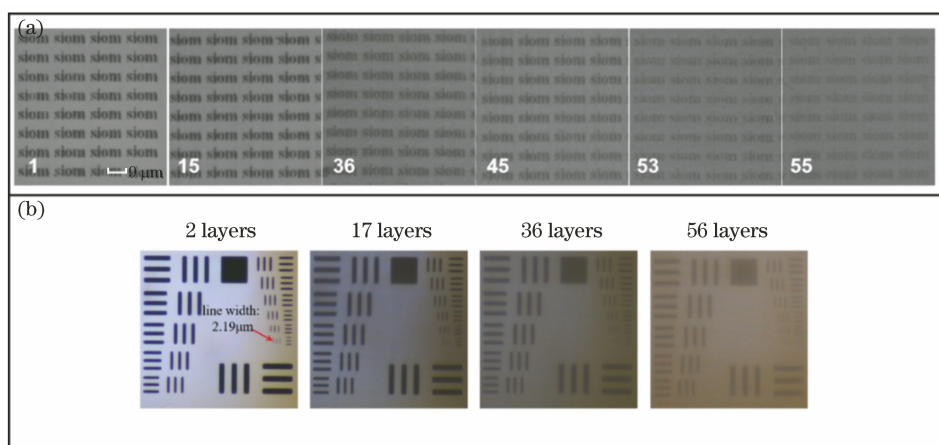


图 4 光学显微镜的成像结果。(a)多层微图案;(b)不同层数玻璃基底下的分辨率板图像

Fig. 4 Imaging results of the optical microscope. (a) Multilayer micropatterns; (b) resolution plate images under glass substrates with different layers

微图案成像的结果一致。

2.2 成像质量分析

实验中,最上层图案受照明光的影响较大,而最底层图案受成像路径的影响较大。因此,采用衍射

理论分析照明光经下层信息传递至上层时对上层信息的串扰,原理如图 5(a)所示。在两个边长 $L = 10 \mu\text{m}$ 的平面上,分别设置代表图案的两个方块(薄膜区域) Ω_1 和 Ω_2 。 Ω_1 的边长为 $2 \mu\text{m}$, Ω_2 的边长为

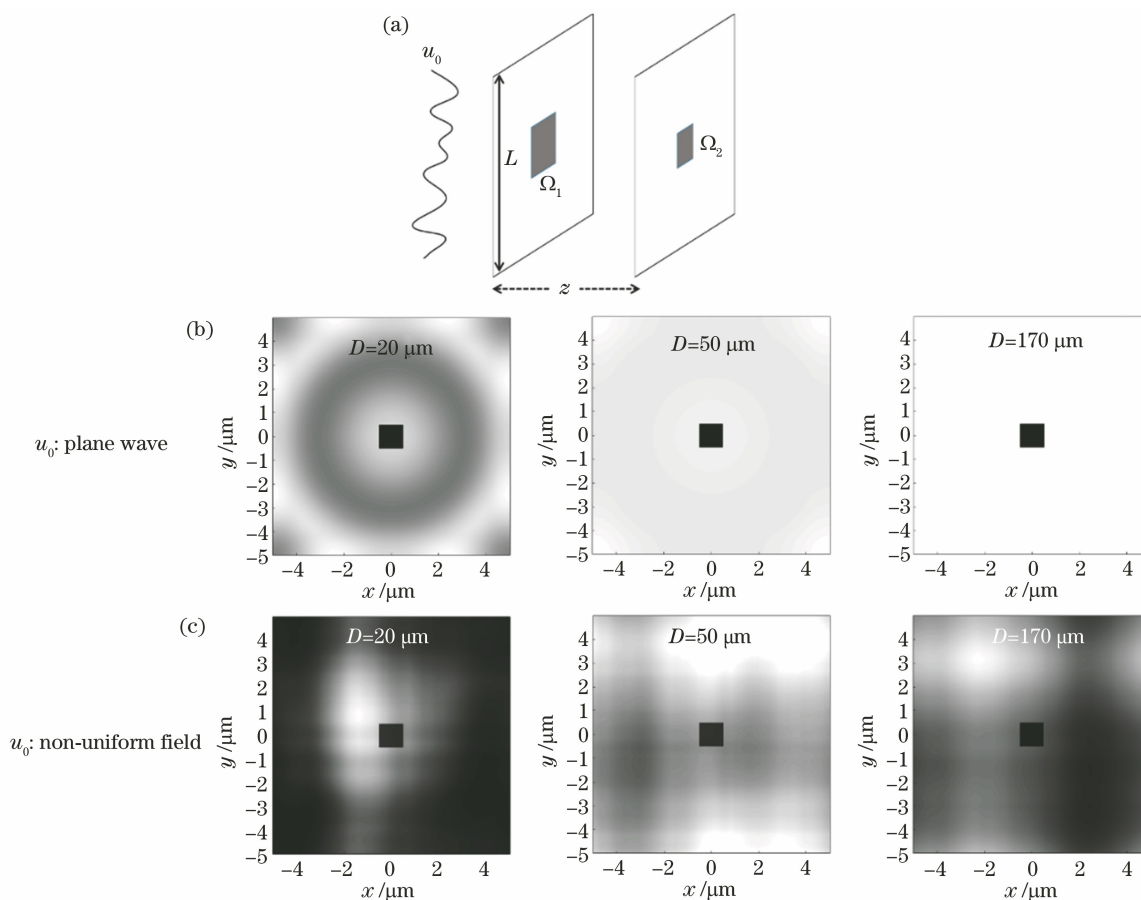


图 5 光场的仿真结果。(a)串扰对模型的影响;(b)平面波入射后的场分布;(c)随机光场入射后的场分布

Fig. 5 Simulation results of the light field. (a) Influence of crosstalk on the model; (b) field distribution after plane wave incident; (c) field distribution after random light field incident

1 μm , 用波长为 550 nm(人眼最敏感的波长)的平面波作为照明光入射, 玻璃厚度 D 分别设置为 20, 50, 170 μm 。平面波从第一平面 (x_1, y_1) 传输至第二平面 (x_2, y_2) 时, 相当于经过两个衍射屏, 衍射屏的透过率函数由实际测量的薄膜和玻璃基板的透过率决定, 玻璃的折射率 n_g 为 1.52, 传输距离 z 可表示为

$$z = n_g D. \quad (1)$$

满足菲涅耳衍射条件时^[20]

$$[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]_{\max} \leq 2(L + L)^2, \quad (2)$$

$$z^3 \gg k(L + L)^2/8, \quad (3)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为光的波长。当薄膜较薄时, 可忽略相位和吸收影响, 平面波从不同厚度的玻璃片入射, 在第二平面场的分布如图 5(b) 所示。可以发现, 当玻璃的厚度为 170 μm 时, 2 层堆叠结构的下层图案基本不会对上层产生严重影响。但在实际多层堆叠的情况中, 每层图案的分布均具有随机性, 在光束传播方向上可能存在某些层有图案而某些层没有图案或每层都有图案且十分密集的情况。此时, 堆叠起来的薄膜总厚度不再远小于波长, 因此, 需要考虑平面波的相位和吸收影响。为了模拟平面波 u_0 穿透下方多层随机图案的情况, 在平面波的相位和振幅上均引入随机因子, 将平面波变为相位、振幅均随机的入射光场, 此时, 对于厚度为

170 μm 的基片, 三次不同随机入射场 u_0 下图案表面的对比度如图 5(c) 所示。极端状况, 如下层的微图案密集且堆叠多层时, 会导致照明光场在射入目标成像层之前变为非均匀光场, 从而影响成像结果的对比度。因此, 实验中的多层图案分布不太密集, 在径向方向上也不完全对准, 且光源面与成像的图案面积相差较大, 相当于图案从多个角度被照亮, 进一步削弱了下方微图案对上层微图案成像质量的影响。当图案结构足够小, 分布不密集时, 非均匀照明对成像结果的影响不大, 且第 1 层成像结果最清晰。

为了分析底层成像不清晰的原因, 给出了物体成像过程的频域关系, 可表示为

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v), \quad (4)$$

$$H(u, v) = X_{\text{Mul}}^{\text{MTF}} \cdot X_{\text{opt}}^{\text{MTF}} \cdot X_{\text{CCD}}^{\text{MTF}}, \quad (5)$$

式中, u, v 为平面上 x, y 方向的空间频率, $G(u, v)$ 为像的频谱, $H(u, v)$ 为多层结构、光学系统、CCD 系统调制传递函数(MTF) $X_{\text{Mul}}^{\text{MTF}}$ 、 $X_{\text{opt}}^{\text{MTF}}$ 、 $X_{\text{CCD}}^{\text{MTF}}$ 的积, $F(u, v)$ 为物场的频谱分布。可以发现, 多层结构会导致物光场在传播方向上发生衰减, 图像对比度下降。由于微图案对光场均匀性的影响较小, 为了分析简便, 单独考虑了多层空白玻璃对成像质量的影响。首先, 用 Zemax 软件构建一个成像光学系统, 以模拟实际显微镜光学系统。单层不同厚度 D 的玻璃对底层成像结果的影响如图 6(a)、图 6(b)、

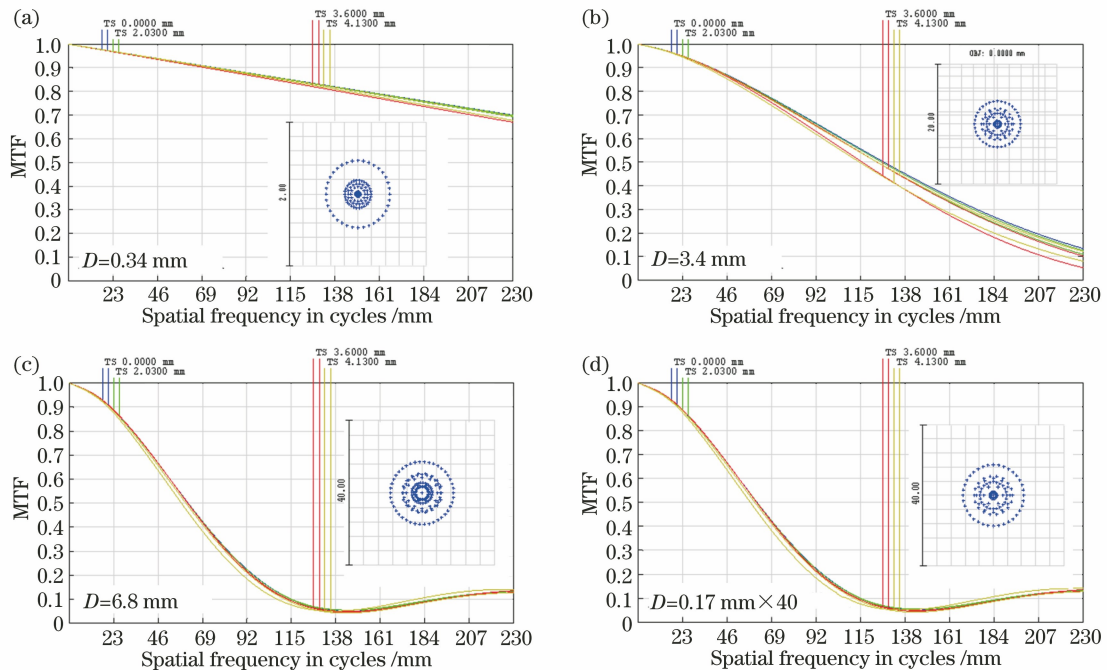


图 6 不同厚度玻璃下系统的 MTF。(a) $D=0.34$ mm;(b) $D=3.4$ mm;(c) $D=6.8$ mm(单层);(d) $D=6.8$ mm(多层)

Fig. 6 MTF of the system under glass of different thicknesses. (a) $D=0.34$ mm; (b) $D=3.4$ mm; (c) $D=6.8$ mm (single layer); (d) $D=6.8$ mm (multilayer)

图 6(c)所示,与图 6(c)中总厚度相同,但每层玻璃厚度为 0.17 mm、共 40 层的玻璃对底层成像结果的影响如图 6(d)所示。其中,沿视场中心到边缘不同位置上子午线与弧矢线的 MTF 用不同线条表示。成像光学系统可以不断优化,但仿真的工作距离需要接近实际物镜的工作距离,且截止频率高于分辨率板的截止频率(228 lp/mm)。图 6 中的插图为中心视场的点阵图,可以发现,模拟系统中的球差随着单层玻璃厚度的增大不断增大,且存在一定程度的场曲。由于光学系统 MTF 中的相位部分会造成高频振荡,在像差较大时,低频信号已不清楚,此时观察高频信号也没有实际意义。因此,相比图 6(a)和图 6(b),图 6(c)和图 6(d)的成像质量是退化的。此外,从图 6(c)和图 6(d)可以发现,在总厚度相同的情况下,增加层数对成像质量的影响不大,这与实际情况不符。实际中通过显微成像系统成像时,像差可以得到优化,继续观察单层厚度为 6.8 mm 空白玻璃下的分辨率板,仍能清晰分辨最小线对,但观察等厚度下 40 层 0.17 mm 玻璃基片时,成像效果较差,这表明 Zemax 软件在光线追迹时未考虑光线来回反射形成的杂光干扰,对反射杂散光的具体分析如下。

1) 杂散光的影响

各层之间相互反射、内部散射及照明光源的分布变化会造成杂散光,使图像对比度下降。忽略多层平板间隙的多次反射和平板吸收,仅考虑平板间的来回反射时,可根据矩阵法和多项式求解验证该

结论^[21-22]。设玻璃界面的透射率为 T_0 ,则透射率与反射率 R_0 的关系为

$$T_0 = 1 - R_0, \tag{6}$$

式中,反射率 $R_0 = \left(\frac{n_g - n_0}{n_g + n_0}\right)^2$ 。设单层玻璃基板的入射光强为 I_0 ,经两个界面多次反射后的总透射光强 I_T 可表示为

$$I_T = I_0 T_0 T_0 + I_0 T_0 R_0 R_0 T_0 + I_0 T_0 R_0 R_0 R_0 R_0 T_0 + \dots = I_0 T_0^2 / (1 - R_0^2) \tag{7}$$

单层玻璃基板的实际透过率 T_1 为

$$T_1 = \frac{I_T}{I_0} = \frac{1 - R_0}{1 + R_0} \tag{8}$$

对于 m 层玻璃基板,其总透过率 T_m 可表示为

$$T_m = \frac{T_1}{m - T_1(m - 1)}, \tag{9}$$

则图像的信噪比可表示为

$$R_{SN} = \frac{T_0^{2m}}{T_m - T_0^{2m}} \tag{10}$$

当层数高于一个定值后,物光场光强的衰减及像面上各种杂散光产生的噪声,导致图像的信噪比下降,图像变得十分模糊。图 7 为实际的光强分布图谱,可以发现,随着 m 的增大,杂散光有明显增加。图 7(a)为从像平面上一条截线截取三条线宽为 $2.19 \mu\text{m}$ 与 $6.2 \mu\text{m}$ 的微结构。图 7(b)为不同层数玻璃基板对应的信号强度,可以发现,随着层数的增加,最终信号光强与噪声会无法分辨。

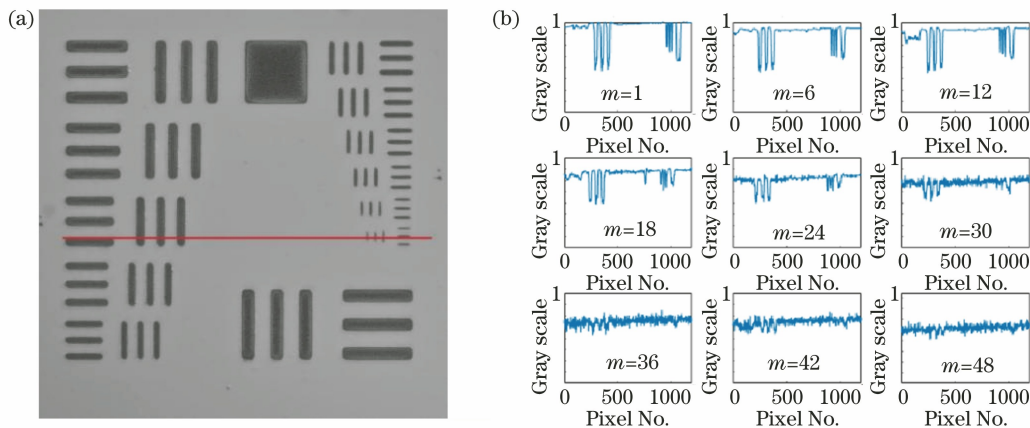


图 7 不同层数下的信号图。(a)光强信号的截取位置;(b)不同层数下的信号图

Fig. 7 Signal diagram under different layers. (a) Interception position of the light intensity signal;

(b) signal diagrams at different layers

2) 平板玻璃间的鬼像影响

多层平板玻璃结构中,反射会使上层对下层结构形成鬼像。因此,将来回反射光场的空间位置和

光场强度结合起来,分析鬼像对成像结果的影响。对于经多次反射后透射进入显微镜的光,由于玻璃基片与空气界面上的反射率远小于透射率,随着反

射次数的增多,光强衰减会越来越严重;且相对于直接透射的成像光来说,光程增大等价于物面偏移距离 Δd 增大,从而降低透射光对像面的干扰。因此,仅需考虑来回反射一次后透射的光束,并计算在来回反射一次过程中多次透射的次数与光程变化量的关系。图 8 为光经过玻璃与空气间隙(厚度约为 $1 \mu\text{m}$)后垂直出射的光场,为了直观表示将其偏移一个角度。将所有光来回反射一次,在反射过程中经不同界面透射后的出射光强度变化公因子为 $T_0^{2m} R_0^2$,其强度变化可表示为 $I_T = I_0 T_0^{2m} R_0^2 T_0^{2q}$ 的

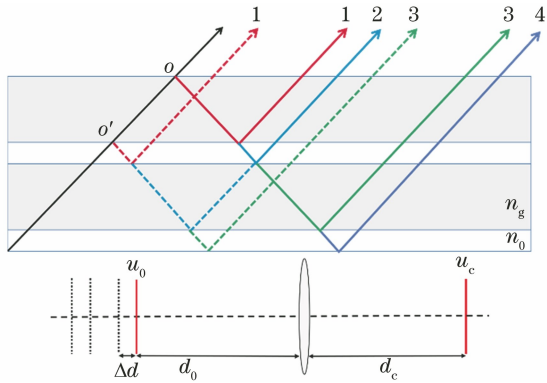


图 8 来回反射中的不同路径及物面的偏移距离

Fig. 8 Different paths in the back and forth reflection and the offset distance of the object plane

形式,其中, q 为第一次反射后及第二次反射前穿透的界面数量。

将 q 值相同的过程定义为同一类反射过程,则同一类反射过程的光强度变化相同,但会出现以玻璃上界面 o 或下界面 o' 为起始点两种路径(实线与虚线),其相对物面的偏移量 Δd 是不同的。将 q 值相同,且起始点也一致的情况出现的次数记为 p 。如图 8 中的实线过程 1,反射过程中光未透过界面 ($q=0$),以玻璃上界面 o 为起始点,偏移量 $\Delta d = 2n_g D$ 。2 层玻璃表明有 2 个玻璃上界面 o ,实线过程 1 会出现 2 次,即 $p=2$ 。对于虚线过程 1,光的强度变化与实线过程 1 一样($q=0$),但其以玻璃下界面 o' 为起始点,偏移量 $\Delta d = 2d$, $p=2$ 。对于图 8 中的实线过程 4,以玻璃上界面 o 为起始点,单次反射过程中穿透 3 个界面($q=3, p=1$)。但以 o' 为起始点不存在出射,光会直接从下方透射出去, $p=0$ 。推广到 m 层玻璃时, o 或 o' 点有很多个,即实线过程 1 的次数为 m ,虚线过程 1 的次数也为 m 。实线过程 4 的次数为 $m-1$,虚线过程 4 的次数为 $m-2$ 。这表明 q 值反映了强度变化, p 值为相同偏移量下同一过程出现的次数。表 1 为不同玻璃层数 m 下,参数 q 与偏移量 Δd 、不同过程次数 p 的关系。

表 1 不同 m 情况下的参数

Table 1 Parameters under different m conditions

$q (q \leq 2m-1)$	Initial point: o		Initial point: o'	
	p	Δd	p	Δd
0	m	$2n_g D$	m	$2d$
1	m	$2n_g D + 2d$	$m-1$	$2n_g D + 2d$
2	$m-1$	$4n_g D + 2d$	$m-1$	$2n_g D + 4d$
3	$m-1$	$4n_g D + 4d$	$m-2$	$4n_g D + 4d$
...
$2k, k=0,1,\dots$	$m - \frac{q}{2}$	$q(n_g D + d) + 2n_g D$	$m - \frac{q}{2}$	$q(n_g D + d) + 2d$
$2k+1, k=0,1,\dots$	$m + \frac{1}{2} - \frac{q}{2}$	$(q+1)(n_g D + d)$	$m - \frac{1}{2} - \frac{q}{2}$	$(q+1)(n_g D + d)$

物面上的反射场为传播偏移量 Δd ,将对应强度变化后的所有光场进行叠加,可表示为

$$u_n(x, y, \Delta d, T) = R_0 \sum p \cdot T_0^q \cdot u'_0(x, y, \Delta d), \quad (11)$$

式中, u'_0 可由物面场 u_0 经菲涅耳衍射传递 Δd 距离后得到,其分布如图 9(a) 所示。可以发现,对于一对线宽为 $2 \mu\text{m}$ 的线对,在较少玻璃片堆叠情况下,物体本身的光场强度比反射场强,成像清晰。随着

叠加层数的增多,反射场累积使鬼像强度远大于原始的直接透射光场,成像的信号光中反射场占主导,其边缘由于偏离距离的增大越来越模糊。物场透过 $2m$ 个界面后的强度如图 9(b) 所示。

在实际情况下,玻璃厚度及玻璃层空气间隙的厚度存在一定误差;且除了反射噪声外,CCD 等设备也会带来各种噪声。而精确推导出整个成像过程的物理模型需要实际参数的误差相当小,往往很难实现。

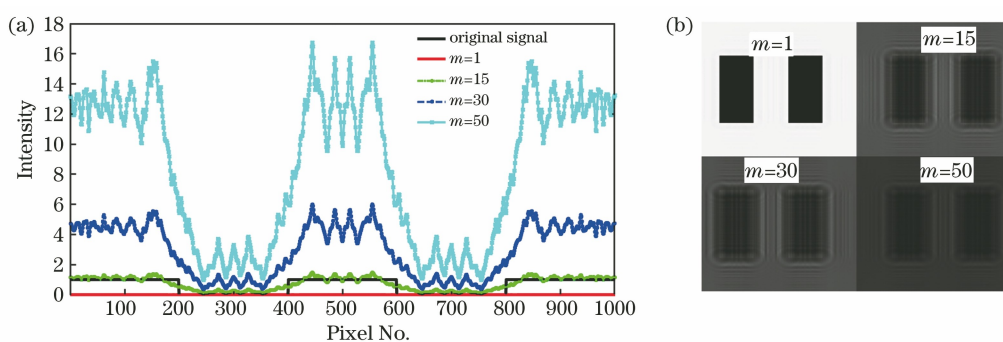


图 9 反射场光强的仿真图。(a)反射场在物面的分布;(b)经所有界面透射后的光场分布

Fig. 9 Simulation diagram of the reflected field light intensity. (a) Distribution of the reflected field on the object surface; (b) distribution of the light field after passing through all the interfaces

3 优化方案

基于上述分析,提出了优化微图案多层成像的方案。想要提升堆叠层数,提高空间利用率,则需要降低界面反射。可以通过改进填充介质,如用乙醇、光学胶水、油性介质等填充空气缝隙,有效减小界面反射。因此,将 60 层玻璃堆叠在分辨率板上,分别在空气和乙醇(完全浸没)中用显微镜进行观察,结果如图 10 所示。

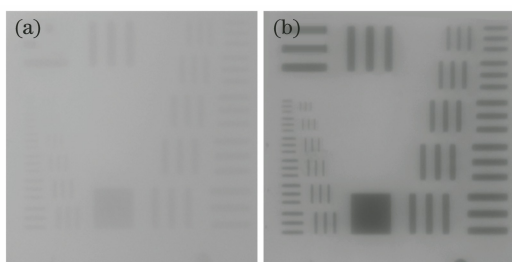


图 10 不同填充介质的底层成像结果。

(a)空气;(b)乙醇

Fig. 10 Bottom layer imaging results of different filling media. (a) Air; (b) ethanol

由于反射噪声的光程比信号光长,当光源强度足够时,用合适的吸收基片也可以消除来回反射噪声对成像结果的影响。减小玻璃厚度能在一定程度上优化像差,从光场仿真结果来看,玻璃厚度降低至 $50\ \mu\text{m}$ 时仍可忽略层间串扰。因此,根据实际光学系统的组成,合理校正像差,在制作每层结构时合理设计微图案排布,且总体图案分布不宜过密。此外,在图像终端上通过图像处理方式适当恢复图像,用自适应滤波降噪及灰度直方图调整后的图像如图 11 所示。可以发现,处理后图像的灰度范围从 $80\sim 129$ 调整到 $0\sim 230$,模糊图像的对比度有了明显提高,这有利于进一步提升堆叠层数,提高空间利用率。

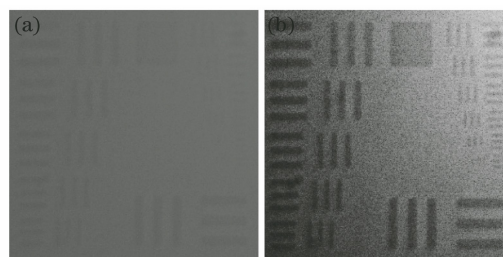


图 11 不同图像的对比度。(a)原始图像;

(b)处理后的图像

Fig. 11 Contrast of different images. (a) Original image; (b) processed image

4 结 论

提出了一种基于激光刻写的高透光率微图案制作方法,该方法制作的微图案尺寸可达到微米量级,与原始图像的结构基本一致,且能多层堆叠起来利用光学显微镜直接成像。该方法可替代比较脆弱的微缩胶卷等媒质,实现对文档信息的备份保护。但在微图案多层读取中发现,位于底层的图案成像质量较低。光场仿真结果表明,邻近层间的串扰对成像质量的影响较小。由于图案尺寸较小、透过率高且每层图案的密度较小,光场经多层传递后未变成光场极度不均匀的情况。因此,在实际情况中上层图案比较清楚。下层成像不清晰的原因可能为厚平板带来的像差与多层界面反射带来的噪声。用 Zemax 软件模拟的光学系统中,增大平板厚度会导致像差,但该软件无法模拟光束的来回反射情况。实际光学系统的实验结果表明,总厚度相同情况下多层成像的质量仍然不如单层成像。原因是层间的来回反射、散射以及照明光场的变化都会形成杂散光分布,使底层图案的对比度下降。对鬼像(反射噪声)在物面上的分布情况进行分析,结果表明,鬼像是导致图案边缘模糊的主要因素。最后,给出了优

化成像质量、减小界面反射的方案,并结合图像处理方式提高了图案对比度。该研究通过结合仿真和实验,阐明了微图案多层成像的性质,提出了优化成像质量的方案,对提升各类文档备份保存的空间利用率具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Zeng Z P. Fluorescence fluctuation-based super-resolution nanoscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0307009.
曾志平. 基于荧光随机涨落的超分辨显微成像[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0307009.
- [2] Roose S, Stockman Y, Derauw D, et al. The challenges for large light-weight diffractive lenses for space telescopes [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10563: 105635Y.
- [3] Zhao M, Wang Y, Tian Z M, et al. Method of push-broom underwater ghost imaging computation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(16): 161101.
赵明, 王钰, 田芷铭, 等. 水下推扫式计算鬼成像的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(16): 161101.
- [4] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C] // 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-8.
- [5] Ge W L, Hua L H, Zhang X H. Simulation and experiment of change rule of water backscattering light energy [J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 756-759.
葛卫龙, 华良洪, 张晓晖. 水体后向散射光能量变化规律的仿真与实验[J]. 激光技术, 2013, 37(6): 756-759.
- [6] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(25): 253603.
- [7] Narasimhan S G, Nayar S K. Interactive (de) weathering of an image using physical models [J]. IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision, 2003: 1-8.
- [8] Meng L, Hu H F, Hu J Z, et al. Image reconstruction of multimode fiber scattering media based on deep learning [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1206005.
孟磊, 胡海峰, 胡金洲, 等. 基于深度学习的多模光纤散射介质成像重建[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1206005.
- [9] Wei J, Zhang K, Wei T, et al. High-speed maskless nanolithography with visible light based on photothermal localization [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43892.
- [10] Kenney A R. Digital-to-microfilm conversion: an interim preservation solution [J]. Library Resources & Technical Services, 1993, 37(4): 691-692.
- [11] Liu Q, Wu J H, Guo P L, et al. Fabrication of convex blazed grating with high diffraction efficiency [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0313001.
刘全, 吴建宏, 郭培亮, 等. 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0313001.
- [12] Wei T. Investigation of laser heat-mode lithography based on Te-based phase change material [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 6-17.
魏涛. 基于碲基相变材料的激光热模光刻技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2018: 6-17.
- [13] Zhang F T, Nie Z G, Qiu J R. Realization of optical modulation in germanium oxide glass by femtosecond laser direct writing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202006.
张芳腾, 聂兆刚, 邱建荣. 飞秒激光直写实现氧化锗玻璃内部光调制[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202006.
- [14] Park S K, Milster T D, Zhang Y. Prospects and limitations for large numbers of multi-layers in optical data storage [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6282: 628210.
- [15] Ushiyama J, Miyauchi Y, Sugiyama T, et al. Interlayer cross-talk reduction by controlling backward reflectivity for multilayer disks [C] // Optical Data Storage 2007, May 20-23, 2007, Portland, Oregon, United States. Washington, D. C.: OSA, 2007: WDPDP3.
- [16] Dvornikov A S, Walker E P, Rentzepis P M. Two-photon three-dimensional optical storage memory [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2009, 113(49): 13633-13644.
- [17] Strickler J H, Webb W W. Three-dimensional optical data storage in refractive media by two-photon point excitation [J]. Optics Letters, 1991, 16(22): 1780-1782.
- [18] Zhang K, Wang Z W, Chen G D, et al. Te-free SbBi thin film as a laser heat-mode photoresist [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(9): 093102.
- [19] Wang Z W, Zhang K, Chen G D, et al. A metal lift-off process through hyperbolic undercut of laser heat-mode lithography [J]. Materials Letters, 2020, 264: 127344.

- [20] Ersoy O K. Diffraction, Fourier optics and imaging [M]. Jiang X Y, Transl. Beijing: China Machine Press, 2018: 40-41.
Ersoy O K. 衍射、傅里叶光学及成像[M]. 蒋晓瑜, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018: 40-41.
- [21] Baumeister P, Hahn R, Harrison D. The radiant transmittance of tandem arrays of filters[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1972, 19(10): 853-864.
- [22] Tuckerman L B. On the intensity of the light reflected from or transmitted through a pile of plates [J]. Journal of the Optical Society of America, 1947, 37(10): 818-825.