

文章编号: 1005-5630(2020)05-0057-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.05.009

单像素复振幅成像及实验分析

张跃华, 隋国荣

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 光场的光强信息和相位信息成像在医学、光学测量、三维成像等领域至关重要。设计了一种无需参考光束即可实现光场复振幅成像的单像素成像系统。该成像系统通过相位型光学掩模对光场信息进行调制, 利用无分辨率的光电探测器探测调制后的光强信息, 应用phaselift算法恢复光场的光强与相位信息。利用单像素成像系统对衍射光场及透明聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 薄膜物体进行了成像实验, 从成像结果中可以清晰看到衍射环的光强信息与相位信息。实验中物体薄膜的相位差为 0.053, 刻线宽度为 220 μm , 实验得到图像相位差为 0.046 和刻线宽度为 256 μm , 与传统检测手段得到的图像信息非常接近。该系统的成像光路无需参考光束, 系统简单便于集成, 促进了便携式成像系统的发展, 可应用于宽光谱成像, 在光场复振幅成像方面具有较大发展潜力。

关键词: 单像素; 光强成像; 相位成像; 空间光调制器

中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A

Single pixel complex amplitude imaging and experimental analysis

ZHANG Yuehua, SUI Guorong

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The imaging of light intensity information and phase information of the light field is very important for medical, optical measurement, three-dimensional imaging etc. We have designed a single-pixel imaging system that can achieve complex amplitude imaging of the light field without a reference beam. The imaging system modulates the light field information through a phase-type optical mask, uses a non-resolution photodetector to detect the modulated light intensity information, and uses the Phaselift algorithm to recover the light intensity and phase information of the light field. We utilized the single-pixel imaging system to perform imaging experiments on diffracted light fields and transparent PDMS thin film objects. From the imaging results, light intensity information and phase difference information of the diffraction ring can be clearly observed. The phase difference is 0.053 and the width of the groove is 220 μm of the object film in the experiment, and the phase difference is 0.046 and the width of the groove is 256 μm of the

收稿日期: 2019-12-21

作者简介: 张跃华(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为计算成像。E-mail: zyshlg@163.com

image obtained by the experiment, which indicates that the imaging system is very close to the image information obtained by the traditional detection method. The imaging optical path of the system does not require a reference beam, and the system is simple and easy to integrate, which has promoted the development of portable imaging systems. It can be applied to wide-spectrum imaging and has great development potential in light field complex amplitude imaging.

Keywords: single pixel image; intensity imaging; phase imaging; spatial light modulator

引 言

光场的光强与相位信息具有重要意义, 光强信息可以确定物体的表面形态, 而相位信息用来确定物体的表面轮廓甚至内部结构, 光场的光强及相位信息在进行生物医学成像^[1-2]、光学成像测量及矫正^[3-4]、三维成像及重建^[5]等领域至关重要。然而光的相位信息不能直接观测, 1949年, Gabor 提出了第一个定量技术, 利用干涉信息恢复复杂的光场^[6], 奠定了现代全息术的基础。目前, 相位成像的检测手段多是基于干涉理论, 将参考光束与待测光束进行干涉, 利用干涉条纹信息解调出待测场相位信息。虽然它们在进行精确相位测量方面非常强大, 但它们对环境扰动(如机械振动和温度变化)的高度敏感性和对参考光束的需求阻碍了其在便携式和紧凑干涉成像系统中的发展^[7]。

近年来, 单像素成像不仅可以对光强成像, 而且可以实现对相位成像^[8-9]。单像素成像系统主要由光学掩模与光电探测器构成。物体的光场信息经过光学掩模调制, 通过透镜汇聚于无分辨率的光电探测器中, 每张掩模对应一个信号, 光场信息经过一系列信号调制后, 可根据每张掩模与其对应信号的相关性求解得出。单像素成像系统可用于宽光谱成像, 只要改变光电探测器的光谱范围, 就可以很容易地改变成像的光谱范围。这一特性对于通常需要昂贵相机的光谱范围内的成像非常方便, 特别是红外成像^[10-12]和太赫兹成像^[13-14]。单像素探测器的灵敏度高于 CCD 阵列面, 适用于微弱信号的成像^[12]。正是由于单像素系统这些不可代替的优点, 引起了科研人员的广泛关注。

本文利用空间光调制器加载相位型光学掩模对光场信息进行调制, 用单像素探测器对光场极

大值进行光强探测, 利用相位提升(phaselift)算法^[15]对探测到的光强信息及其对应的光学掩模信息进行求解, 从而得到待求光场的复振幅。实验中利用该单像素复振幅成像系统分别对衍射环和透明的薄膜物体进行成像, 其中物体的刻线与非刻线的相位差为 0.053, 刻线宽度为 220 μm , 实验得到图像相位差为 0.046 和刻线宽度为 256 μm , 图像信息与传统的检测手段得到的信息非常接近, 该成像系统无需参考光束, 便于成像系统的集成, 促进便携式成像系统发展。

1 成像原理

单像素复振幅成像原理如图 1 所示, 物体信息被一系列复振幅光学掩模调制, 调制后的光束经透镜聚焦, 针孔位于透镜焦点处, 经过滤波后的光强信息被无分辨率的单像素探测器接收。

为简单起见, 物体的光场信息用一维向量 $\mathbf{X}=\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ 表示, 向量总长度为 N , 第 n 个像素的光场信息为 x_n ,

$$x_n = a_n \exp(-i\varphi_n) \quad (1)$$

式中: a_n 为 x_n 的振幅; φ_n 为 x_n 的相位。第 m 张光学掩模为 $\Phi_m=\{\Phi_{m1}, \Phi_{m2}, \Phi_{m3}, \dots, \Phi_{mN}\}$, 光学掩模中每个像素 Φ_{mm} 都由振幅与相位构成, 即

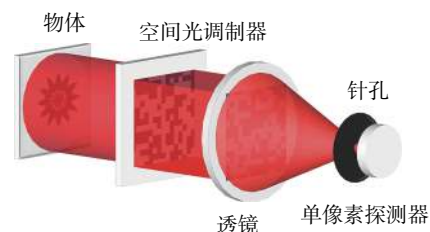


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the system

$$\Phi_{mn} = b_n \exp(-i\theta_n) \quad (2)$$

式中: b_n 为 Φ_{mn} 的振幅; θ_n 为 Φ_{mn} 的相位。当物光光场被第 m 张掩模调制后, 光场信息为 $V_m = \{V_{m1}, V_{m2}, V_{m3}, \dots, V_{mN}\}$, 每个像素的光场信息为

$$V_{mn} = \mathbf{X}\Phi_{mn} = \Phi_{mn}a_n \exp(-i\varphi_n) \quad (3)$$

当光场经过透镜聚焦, 在聚焦平面的主极大强度为

$$y_m = |\langle \mathbf{X}, \Phi_m \rangle|^2 \quad (4)$$

光电探测器可以测量出每张掩模对应的光场强度 y_m , 所以相位恢复问题即已知 y_m 和 Φ_m , 求解未知向量 \mathbf{X} , 根据 Candès 等^[15] 提出的相位提升原理可将式(4)进行求解。相位提升的求解基本思想是将式(4)中待求解的复向量 \mathbf{X} 问题根据 $\mathbf{Z} = \mathbf{X}\mathbf{X}^*$ 提升为一个秩为 1 的矩阵 \mathbf{Z} 的求解问题, 使得一般的非凸的相位检索问题转化为满足二次约束的凸规划问题, 然后利用凸规划问题的求解算出 \mathbf{X} 最优解^[16], 从而求得光场的相位信息及光强信息。

2 实验结果和分析

2.1 实验平台及过程

单像素复振幅成像系统的实验装置图如图 2 所示, 该实验装置由扩束系统, 调制系统与探测系统构成。He-Ne 激光器发出波长 632.9 nm 的光束经过扩束系统扩束, 扩束系统由焦距 $f=25$ mm

的物镜, 针孔 P1 和焦距 $f=125$ mm 的透镜 L1 构成, 对直径为 0.5 mm 左右的激光光束进行 5 倍扩束, 然后光束再经过物体。物体的大小为 2 cm×2 cm, 其中有效成像区域为 2.048 mm×2.048 mm。通过待成像物体后的物光光束经过 4f 系统($f=100$ mm), 4f 系统由两个相同焦距的透镜 L2 和 L3 与针孔 P2 构成, P2 的作用是去除光路中的杂散光束, 提高光束的成像质量。实验中采用的是 Jasper Display 公司的 JD8554N 空间光调制器 SLM, 4f 系统将物件的光强信息与相位信息成像在空间光调制器的列阵面上, 该空间光调制器通过晶体的变化反射出指定相位信息的光束。光束调制后经过分束镜 BS 反射进入聚焦透镜 L4, 该聚焦透镜的焦距 $f=200$ mm, 因此聚焦斑直径大小 $d=2f\lambda/D \approx 10$ μm , 其中 D 为光束直径。该透镜的焦距选择较长的, 以便增大聚焦斑, 便于针孔 P3 选择聚焦光斑的极大值。在焦面上的针孔大小为 10 μm , 单像素探测器 (PDA10A-EC, THORLABS) 位于针孔后方, 探测经过针孔后的傅里叶零级光强。

光学掩模的选择对于单像素成像至关重要, 一个适合的光学掩模可以缩短单像素成像系统的图像恢复时间得到更高的图像质量。随机高斯矩阵构成的掩模曾被证明只要对光场的调制次数大于 $M \log N$ 次 (N 为待恢复光场矩阵的长度), 就可以通过 phaselift 算法恢复光场的光强与相位信息^[17]。本实验采用随机高斯矩阵作为光学掩模, 实验中掩模的像素数目为 32×32, 其中每个像素的尺寸为 64 μm 。首先构造大小为 32×32 的矩阵 Φ , 矩阵 Φ 中每一个元素独立地服从均值

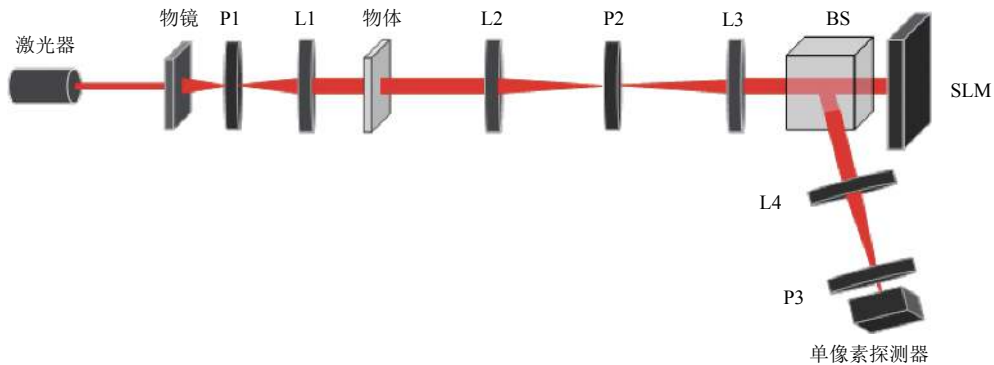


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

为 0，方差为 1/32 的高斯分布，即：

$$\Phi_{i,j} \sim N\left(0, \frac{1}{32}\right) \quad (5)$$

$$\Phi' = \frac{\Phi - \min(\Phi)}{\max(\Phi)} \times 255 \quad (6)$$

然后将根据式(6)将矩阵 Φ 中的数值扩大到 0~255，式(6)中 $\min(\Phi)$ 表示矩阵 Φ 中值最小的元素， $\max(\Phi)$ 表示矩阵 Φ 中值最大的元素，首先将矩阵 Φ 归一化，然后将每个元素乘以 255 扩大到 0~255 范围，因此 Φ' 矩阵就是一个光学调制掩模矩阵 Φ_m 。根据上述原理生成 1024 张光学调制掩模，将其加载到空间光调制器中之后，光学掩模中的 0~255 就对应于相位的 0~ 2π 。实验中采用的是相位调制的方式，光场的光强信息不进行调制，相位信息由空间光调制

器加载的掩模进行调制。

2.2 实验数据及分析

当待测光束为高斯光束经过针孔发生衍射时，利用单像素成像系统恢复的结果如图 3 所示，图 3(a)与(c)为高斯光束衍射后的光强图，图 3(b)与(d)为高斯光束衍射后的相位图，从图中可以明显看到中心原斑与第一衍射环。由于调制区域大小为 2 mm 左右，无法观测到更高级次的衍射环。图 3(b)与(d)中得到的相位图像在第二衍射环外虽有噪点，但是图像轮廓可以清晰看出。在实验中所得图像均为满采样得到的图像，即测量次数为 1024 次，当进行欠采样重构时，得到的图像质量并不好，造成这种现象可能的原因是实际实验中，对傅里叶频谱零级的提取并不精确，并且由于环境光及光路中反射所造成的测

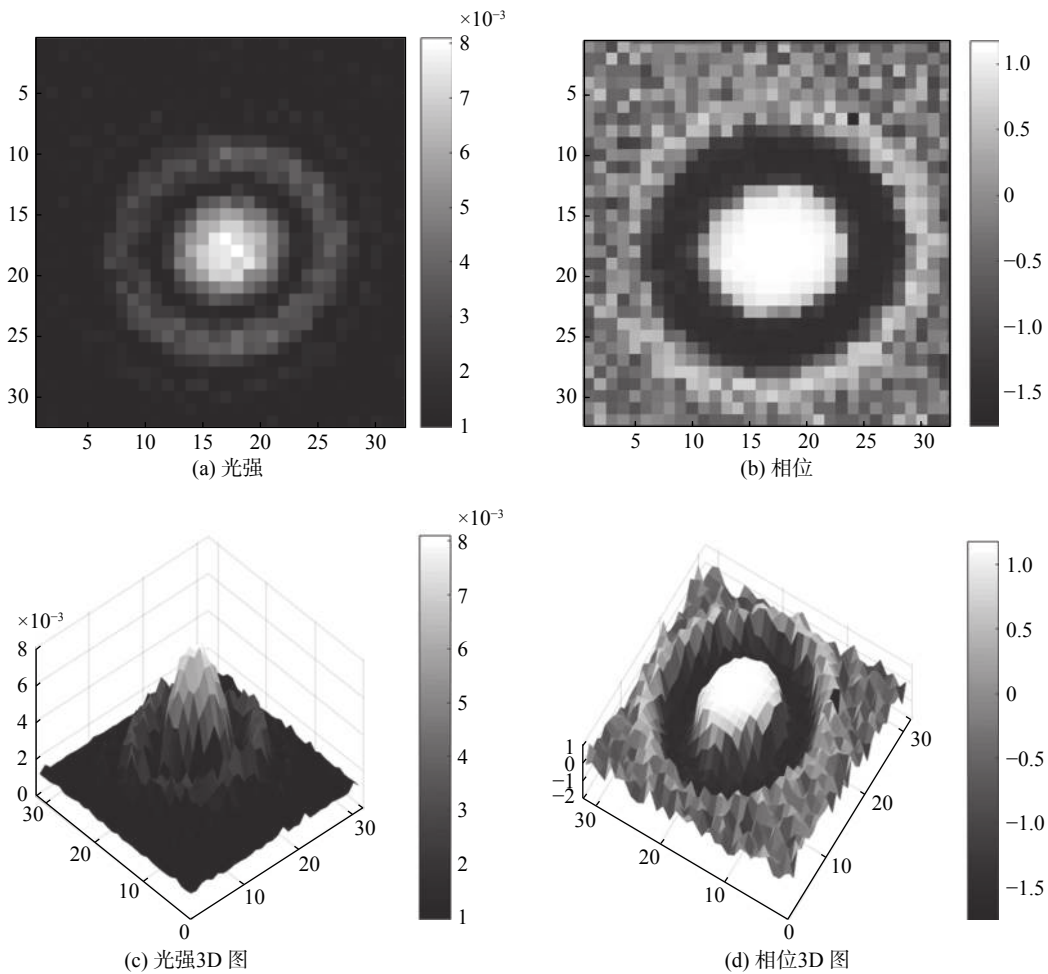


图 3 衍射环图像

Fig. 3 The image of diffraction ring

量误差是无法避免的, 导致单像素探测器测量的信号误差较大, 得到的欠采样重构图像质量较差。

当目标物体换成相位物时, 得到的复振幅图像如图 4 所示。此时的物体为聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 薄膜, 该薄膜具有很好地透光性, 多用于纳米压印、软光刻技术等^[18]。待观测的薄膜厚度约为 1 mm, 在薄膜上方为一个印有“上海”字的商标, 如图 4(a) 所示。本次实验对此商标的部分进行成像, 如图 4(b) 所示, 成像范围为 2.048 mm×2.048 mm。由于该物体的制作是胶体烘干, 所以刻线并不绝对平整, 利用 Phaseview 光束质量分析仪对该物体进行测量, 刻线的线条宽度约为 220 μm, 刻线与非刻线部分的相位差平均约为 0.053。

将图 4 恢复的目标物体图像与光束分析仪得到的结果进行对比。图 4(c) 和图 4(d) 为恢复的图像, 恢复图像的分辨率为 32×32。从图 4(c)

中可以看出线条平均宽度为 4 个像素, 尺寸为 256 μm, 与光束分析仪测量所得结果相差少于一个掩模的像素宽度。实验中采用的图像分辨率为 32×32, 测量误差为 1 个像素, 对应的尺寸为 64 μm, 所以提高图像的测量精度, 提高光学掩模的分辨率是至关重要的。对图 4(d) 物体的相位图中的四个区域的相位求取平均值, 得到的数据如表 1 所示, 从表 1 中得出的刻线与非刻线的相位差平均为 0.046, 与光束分析仪测量所得结果接近。我们的单像素复振幅成像系统为光场的复振幅成像提供了一种有效的测量方式, 该方式无需参考光束, 为便携式、可集成式成像系统提供了参考。

3 结 论

单像素复振幅成像系统可通过相位型光学掩

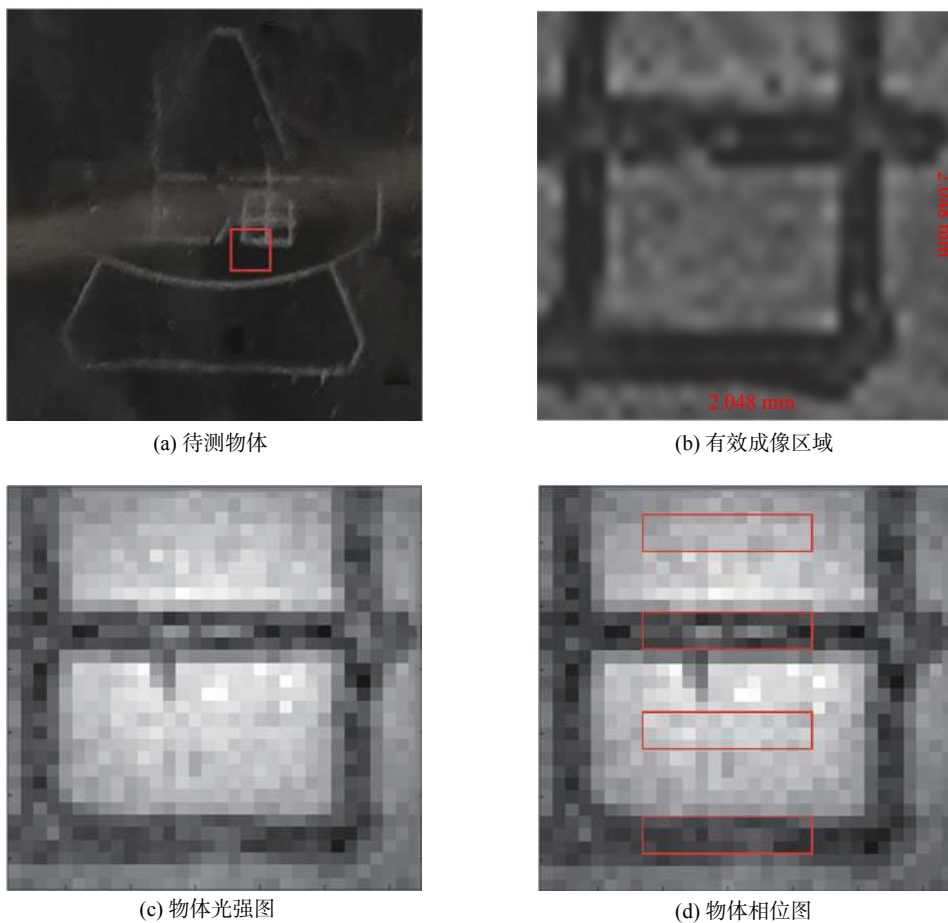


图 4 目标物体图像

Fig. 4 The image of object

表 1 各区域相位的平均值结果
Tab. 1 Average results for the regions

区域	平均值	平均相位差
1	0.026	
2	-0.017	0.046
3	0.029	
4	-0.019	

模调制的方式实现光场的复振幅成像。实验中分别对衍射光场及相位物体进行成像，实验得到的衍射光场的光强与相位图像可以清晰的看到光场的光强信息与相位信息；对相位差为 0.053，刻线宽度为 220 μm 的物体成像，实验得到图像相位差为 0.046 和刻线宽度为 256 μm ，图像信息与传统的检测手段得到的信息非常接近。单像素复振幅成像系统图像的精度受光学掩模分辨率的控制，虽然目前得到的图像质量无法达到基于干涉理论得到的图像质量，但是该系统的成像光路简单不需要参考光束，便于系统集成，促进便携式成像系统的发展，而且该成像方法可应用于宽光谱成像，理论上可减少采样次数，提高成像效率，在光场复振幅成像方面具有较大发展潜力。

参考文献:

- [1] ZERNIKE F. How I discovered phase contrast[J]. Science, 1955, 121(3141): 345 – 349.
- [2] POPESCU G. The power of imaging with phase, not power[J]. Physics Today, 2017, 70(5): 34 – 40.
- [3] LIANG J Z, GRIMM B, GOELZ S, et al. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(7): 1949 – 1957.
- [4] ARTAL P. Optics of the eye and its impact in vision: a tutorial[J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(3): 340 – 367.
- [5] NEHMETALLAH G, BANERJEE P P. Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging[J]. Advances in Optics and Photonics, 2012, 4(4): 472 – 553.
- [6] BRAGG W L. Microscopy by reconstructed wavefronts[J]. Nature, 1950, 166(4218): 399 – 400.
- [7] SOLDEVILA F, DURÁN V, CLEMENTE P, et al. Phase imaging by spatial wavefront sampling[J]. Optica, 2018, 5(2): 164 – 174.
- [8] ZHANG Z B, MA X, ZHONG J G. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6225.
- [9] OTA K, HAYASAKI Y. Complex-amplitude single-pixel imaging[J]. Optics Letters, 2018, 43(15): 3682 – 3685.
- [10] ASPDEN R S, GEMMELL N R, MORRIS P A, et al. Photon-sparse microscopy: visible light imaging using infrared illumination[J]. Optica, 2015, 2(12): 1049 – 1052.
- [11] RADWELL N, MITCHELL K J, GIBSON G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope[J]. Optica, 2014, 1(5): 285 – 289.
- [12] 霍娟, 李明飞, 杨然, 等. 基于单像素探测器的高灵敏度近红外成像系统 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S104001.
- [13] CHAN W L, CHARAN K, TAKHAR D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(12): 121105.
- [14] STANTCHEV R I, SUN B Q, HORNETT S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. Science Advances, 2016, 2(6): e1600190.
- [15] CANDÈS E J, STROHMER T, VORONINSKI V. PhaseLift: exact and stable signal recovery from magnitude measurements via convex programming[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2013, 66(8): 1241 – 1274.
- [16] 张芬. 基于低秩矩阵填充的相位检索方法研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2015.
- [17] CANDÈS E J, LI X D, SOLTANOLKOTABI M. Phase retrieval from coded diffraction patterns[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2015, 39(2): 277 – 299.
- [18] 王晨光, 杨江涛, 康宁, 等. PDMS 梯度光栅结构制备技术研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(12): 3529 – 3533.

(编辑: 张 磊)