基于介质超表面圆偏振复用的全息成像

申加旭, 汪剑波*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年4月16日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

本文设计了一种矩形硅柱的单元结构,该结构在1550 nm波长下可以通过几何相位和传输相位同时调控 达到偏振复用效果。1550 nm波长位于人眼不可见的红外区域,不仅具备较强的抗干扰能力和光学材料 兼容性,在安全需求、设备部署和部件制造等方面也表现出较高的适用性。据此选取波长1550 nm进行 模拟,在右旋圆偏振光和左旋圆偏振光的照射下,均能观测到清晰的全息图,其峰值信噪比分别为10.86 dB和11.03 dB,结构相似性分别为0.673和0.702。该介质超表面具有微弱串扰、结构简单等优点,采用 双通道独立设计,在许多领域表现出更大的应用潜力,如信息编码或存储,防伪,信息复用等。

关键词

介质超表面,偏振复用,全息成像,相位调控

Holographic Imaging Based on Dielectric Metasurface Polarisation Multiplexing

Jiaxu Shen, Jianbo Wang*

School of Physics Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 16th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

A rectangular silicon pillar element structure is designed in this paper, and the dielectric metasurface can be operated by both the transmission and geometric phases at the same time in order to achieve a polarisation multiplexing effect at a wavelength of 1550 nm. The 1550 nm wavelength

*通讯作者。

features an infrared area that is not visible to the human eye; it also has strong anti-interference ability and optical material compatibility; additionally, it has good application in terms of safety requirements, equipment deployment, and component manufacturing. Based on this, the wave-length of 1550 nm was selected for simulation, and a clear hologram could be observed under the irradiation of right-handed circularly polarised light and left-handed circularly polarised light, with peak signal-to-noise ratios of 10.86 dB and 11.03 dB, and structural similarity of 0.673 and 0.702, respectively. The media metasurface features a dual-channel independent design that offers benefits such as minimal crosstalk and a straightforward structure, demonstrating significant potential for applications in areas like information coding and storage, anti-counterfeiting, and information reuse.

Keywords

Dielectric Metasurface, Polarisation Multiplexing, Holographic Imaging, Phase Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

超材料(metamaterial)是一种三维人工结构,具备一些天然材料没有的性质,这些性质主要来自亚波 长结构以及结构不同的排布方式[1][2]。由于超材料是三维的,实际加工应用较为困难,研究者们逐步把 研究重心转移到了超表面。超表面(metasurface)是二维形式的超材料[3],同样由亚波长结构排列而成,相 比于三维超材料,二维的超表面加工更加简单,损耗较低,更易于集成。早期的超表面器件多使用金属 材料[4][5],而金属材料的欧姆损耗限制了超表面器件的调控效率。随着介质材料如硅、二氧化硅、二氧 化钛等在超表面中的应用,从根本上解决了金属超表面调控效率低的问题,并且透射式介质超表面在实 际应用中会比反射式金属超表面更加便利。目前,介质超表面已在不同领域取得应用,如全息显示[6]、 超透镜[7][8]等。其中,超表面凭借其优良的电磁调控能力在全息编码过程中展现出显著的优势,通过合 理设计亚波长单元结构的几何形状和尺寸参数(形状、尺寸、转角等),可以对光波的振幅、相位、偏振等 参数实现精确调控。与传统全息片相比,超表面全息片具有编码方式简单、编码容量大等优势,可以实 现高质量的图像重建[9][10]。

常用的全息超表面主要分为三类:振幅型超表面[11]、相位型超表面和复振幅型超表面。其中相位型 超表面是指,通过亚波长结构产生异常相位突变,对相位进行调控的器件。相位型超表面大致可分为三 类:传输相位超表面[12]、几何相位超表面[13] [14]和电路型相位超表面[15]。这三种相位型超表面尽管 都应用于波前调控,但是上述任何一种单一相位型超表面都存在圆偏振复用困难的难题。传输相位和电 路型相位超表面无手性响应,而几何相位超表面虽具备手性响应,但由于存在共轭关系,导致无法实现 对左右旋圆偏振光波前的任意独立调控。

在这项研究中,利用 Gerchberg-Saxton (GS)优化算法成功捕获目标对象的最优相位配置,并作为构成全介质超表面结构的基本单元引入了硅柱。这种超表面设计可以在工作频率下,独立操纵两个圆极化的正交状态相位。仿真结果展示了超表面对于控制圆偏振光波相位的高精度操控性,实现了圆偏振多路传输复用与全息成像技术融合。通过结合传输相位调控与几何相位调控,该超表面可以独立调控在工作波长下一对圆偏振正交偏振态的相位。通过理论分析和仿真证明,该超表面可以精确且连续地调制圆偏

振光的相位, 实现圆偏振复用全息功能。

2. 超表面相位调控原理

传输相位是指光束在传播过程中产生的相位延迟,可表示为,其中 $n \ n \ d \ D$ 别是折射率(materialrate) 和物质的传播距离(materialradio)。 $\beta = (2\pi/\lambda_0) n d$ 与入射光频率(或波长)有关,但由于传输相位通常与偏振或自旋态无关,故与入射光频率(或波长)无关。需要通过改变等效折射率(即改变亚波长结构的尺寸)来调节传输相位,因为超表面的结构厚度相同。

在光学信号传递过程中,传播光波会经历相位的转换,这一变化过程称作几何相位或者 Pancharatnam-Berry 相位。此一效应根源于光子携带的内在角动量在非即时反应中的演变,进而可以理解为光子自旋与 轨道角动量之间的相互作用效果。采用琼斯矩阵法进行详细分析,以深入探究几何相位的性质。设想一 个拥有方向性依赖性质的结构体,其被假设处于 *u-v* 参考系中,并且设该超表面处于 *x-y* 参考系中,两者 系统之间夹有 θ 角度。基于该预设条件,上述具有方向依赖特征的超表面可通过琼斯矩阵展示如下:

$$\overline{M} = \overline{R} \left(-\theta \right) \begin{bmatrix} t_u & 0\\ 0 & t_v \end{bmatrix} \overline{R} \left(\theta \right)$$
(1)

公式(1)式中 t_u 和 t_v 分别表示特定方向性结构体沿快速轴与慢速轴的复振幅, $\mathbf{\bar{R}}(\theta)$ 为旋转矩阵, 可表示为:

$$\overline{\mathbf{R}}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$
(2)

将(2)式带入(1)式, 化简后就可以得到:

$$\vec{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} t_u \cos^2 \theta + t_v \sin^2 \theta & (t_u - t_v) \sin \theta \cos \theta \\ (t_u - t_v) \sin \theta \cos \theta & t_u \sin^2 \theta + t_v \cos^2 \theta \end{bmatrix}$$
(3)

当圆偏振光[1, $-i\sigma$]^T入射时(其中 σ =±1表示圆偏振光旋向),出射光场(turning field)可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_{x0} \\ E_{y0} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} = \frac{t_u + t_v}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} + \frac{t_u - t_v}{2} e^{-i2\sigma\theta} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix}$$
(4)

其中的 *Exo*和 *Eyo*分别为出射光的 *x*和 *y*偏振分量。由(4)式可知,带有额外几何相位-2σθ的正交偏振分量既产生于出射的光场中,又包含在其中。因此,几何相位只与入光的偏振和结构旋转有关,而与入光的材料和频率并无关系,相反,它与传输相位的特性是相反的。对于古典几何相位理论来说,结构需要有各方向的异性,也就是它的快轴和慢轴(*tu*和 *tv*)的复振幅响应是产生几何相位所必须的,这两个点是不同的。

复合相位超表面物理思想是将几何相位和传输相位同时引入同一个超表面,即结构的大小和旋转角度同时发生变化。为便于理解,假定每个向异性结构振幅为1,而引入的相位延时为沿其快、慢轴方向,则 t_u 、 t_v 均可表示相应的复振幅。 $\beta \pm \delta/2$,相应复振幅即可表示为 $t_u = \exp(i\beta - i\delta/2)$ 和 $t_v = \exp(i\beta + i\delta/2)$ 。 由(4)式可以知道,圆偏振光[1, $-i\sigma$]^T入射时对应的出射光场为:

$$\cos\frac{\delta}{2}e^{i\beta}\begin{bmatrix}1\\-i\sigma\end{bmatrix} - i\sin\frac{\delta}{2}e^{i(-2\sigma\theta+\beta)}\begin{bmatrix}1\\i\sigma\end{bmatrix}$$
(5)

可从公式(5)可知,将具有传输相位和几何相位的同时携带到正交偏振分量中,即可得到复合相位 β-2σθ。常用的结构为高折射率介质柱,以调控几何相位和传输相位同时进行。采用这种结构截断波导

效应,可以将介质柱中的光场束缚住,从而抑制单元结构间的耦合,使串扰的几何相位与传输相位的串 扰可以忽略不计。

3. 单元结构设计

由于 1550 nm 波长位于人眼不可见的红外区域,对人眼安全,利于设备部署;抗干扰能力强;与光 学材料兼容性好,便于制造光学部件等优点,所以工作波长为1550nm。一般的各方向异性结构截面形状 以矩形和椭圆形为主,本文选择的模型结构为矩形,所以要选择折射率比较高的材料作为相位调节的单 元,对光波的损耗比较低的材料,以便使纳米柱具有更低的深宽比。硅料原料简单,加工工艺成熟,透 过率高,在1550 nm 波长下有较大的折射率,因此纳米柱材料选用硅。由于二氧化硅具有透过率较高、 折射率较低的优点,对光波的损耗还比较小,所以选择二氧化硅作为基底的材料。





(a) 超表面单元结构主视图

(b) 超表面单元结构俯视图

Figure 1. Schematic diagram of the metasurface unit (a) Main view of metasurface elements; (b) Top view of metasurface elements 图 1. 超表面单元示意图; (a) 超表面单元主视图; (b) 超表面单元顶视图

如图 1 所示的超表面单元结构由硅纳米柱和二氧化硅基底构成,图 1(a)和图 1(b)分别为超表面单元 结构(TOPVIEW)的主视图和顶视图。其中H1为基底厚度,H2为硅纳米柱高度,L、W分别为单元结构的 长和宽,周期为 P、纳米柱旋转角度为 θ 。按一定顺序排列组合不同旋转角度、不同尺寸的硅纳米柱,可 对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光作波前独立调节,从而达到偏振复用的目的。

平面光入射在 1550 nm 波长下进行,采用时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)在商业 软件 EastFDTD 中进行仿真。需要优化单元结构的周期 P, 基底厚底 H, 单元高度 H2。在 EastFDTD 中 建立一个单元模型,该模型设定为以直接截断边界处的电磁波为主,消除散射等情况对电磁波计算造成 的影响的 x 和 v 方向的周期性边界条件,z 方向的完美匹配层(PML)边界条件。利用 x 方向的线偏振光由 基底垂直入射,最终确定周期 P = 500 nm,基底厚度 $H_1 = 200 \text{ nm}$, $H_2 = 650 \text{ nm}$,通过不断地改变参数, 从而保证在长宽变化的单元结构中,结构相位符合 0~2π的条件,使结构具有较低的深宽比。纳米柱的长 度和宽度在 50 nm~450 nm 进行步长为 10 nm 的仿真,用来获得相位的调控和透射率。

图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)和图 2(d)分别显示了 x 和 y 方向的相位变化和透射率的变化。结果显示,本 文建立的单元结构库在 x 和 y 方向都具有较高的透射率且均满足了 $0 \sim 2\pi$ 的相位变化。



Figure 2. Changes in phase and transmittance of the cell structure under x and y linear polarisation incidence. (a) Phase variation of X-ray polarisation incidence; (b) Phase variation of y-line polarisation incidence; (c) change in transmittance of X-ray deflection incident vibration; (d) Change in transmittance of y-line deflection incidence vibration **图 2.** x 和 y 线偏振入射下单元结构相位和透射率变化(a) x 线偏振入射的相位变化; (b) y 线偏振入射的相位变化; (c)

图 2.x 和 y 线偏振入射下单元结构相位和透射率变化(a) x 线偏振入射的相位变化;(b) y 线偏振入射的相位变化;(c) x 线偏入射振透射率的变化;(d) y 线偏入射振透射率的变化

采用偏振转换效率(PCE)作为评价指标,定量表征超表面对入射圆偏振电磁波的调控能力。PCE 定义 为透射波中与入射波旋向相反的圆偏振分量功率与入射总功率的比值。针对 LCP 入射、RCP 透射的应用 需求,基于图 2 的结构参数数据库,通过严格筛选同时满足以下条件的单元结构: 1) 高透过率特性; 2) 符合半波片相位关系; 3) 最优 PCE 性能。表 1 详细列出了候选单元的结构参数及其光学性能指标,其中 五种矩形纳米柱结构均能实现五阶离散相位调控(相位间隔 2π/5)。值得注意的是,虽然实际选用的单元结 构参数与理论量化值存在微小偏差,但这种差异对最终成像质量的影响可以忽略不计。综合评估表明, 尺寸为 340 nm×210 nm 的纳米柱结构展现出最佳的半波片特性和最高的 PCE 值(透过率 82.4%, PCE 达 79.6%),因此被确定为几何相位调控的优选结构方案。这一选择不仅满足了相位量化的基本要求,同时 保证了优异的偏振转换性能,为高质量偏振成像提供了关键的技术支撑。

系统性地考察了硅纳米柱旋转角度对几何相位调控的影响规律。基于优化后的单元结构参数,通过

设置 22.5°的旋转步进(0°~180°范围),获得了完整的相位调控特性曲线(图 3)。从图中能够看出,在旋转角 发生变化的过程中,透过率存在细微差别,不过均保持在 70%以上。同时,也证实了全硅柱单元结构的 相位变化始终遵循φ=±2α的关系,即相位变化与旋转角紧密关联。

 Table 1. The geometric parameters of the geometrically phase-controlled element structure and the corresponding transmittance and polarisation conversion efficiency

编号	1	2	3	4	5
L (nm)	380	190	350	210	200
W (nm)	270	100	300	340	320
透射率(%)	72.2	74.5	72.8	82.4	78.3
PCE (%)	75.9	72.1	72.3	79.6	78.5
$\phi_{\rm X}/2\pi$	0.136	0.2585	0.525	0.6565	0.7554
ϕ y/ 2π	0.668	0.7521	0.0359	0.1636	0.2468
$\Delta \phi/2\pi$	0.5052	0.4936	0.4891	0.4929	0.5086

表 1. 几何相位调控的单元结构的几何参数以及对应的透过率和偏振转化效率



Figure 3. Geometric phase simulation results 图 3. 几何相位仿真结果

单位结构的相位和透射率被模拟出来后,就需要得到一个相位信息,这个相位信息就会转化为一个 目标图。本文设计为同轴全息,全息距离为10 mm,使用基于 Feniel 衍射的 GS 算法,分别得到两张图 片各像素点的相位信息,它们通过不断迭代得到: *φ*⁺(x,y)和*φ*⁻(x,y)。

算法流程如下所示:

- (1) 先给出估计或随机生成的相位初段分布;
- (2) 进场复幅信息,已知进场振幅信息,按相位分布求乘数;
- (3) 获取输出方的复振幅面信息,通过向输出方传播入射面复振幅面信息;

(4) 将输出的波幅信息替换掉传播所得的实体波幅项,作为波幅分布中已知的约束条件;

(5)为了反复迭代,达到收敛,得到输入平面的相位分布,以修改后的复幅图像向入射面反向传播,得到新的复幅图像,并重复(2)~(5)。

利用上述的 GS 算法, 对如图 4(a)所示的两幅图进行重建, 经过多次迭代后得到输出相位信息, 得到的全息面相位分布示意图如图 4(b)、图 4(c)所示。





Figure 4. Original image and phase distribution map(a) the original image; (b) a phase distribution of "CU"; (c) Phase distribution plot of "ST" 图 4. 原始图片和相位分布图(a) 原始图片; (b) "CU"的相位分布图; (c) "ST"的相位分布图

分别对应于左旋圆偏振光与右旋圆偏振光的分别为: *ϕ*(x,y)和*ϕ*(x,y)。选择单位结构 x 方向和 y 方向 透射率均大于 0.6 的单位结构,在各个方向建立起相位大小和异性结构的关系库。在二氧化硅基底上按 等间隔 P = 500 nm 排列大小合适的各向异性结构,并给出相应的旋转角度,即可完成器件的设计。图 5 为超表面成像示意图,其中左旋圆偏光射入时显示的信息是 "CU",而右旋圆偏光射入时显示的信息则 是 "ST"。



Figure 5. Schematic diagram of metasurface imaging 图 5. 超表面成像示意图

在 EastFDTD 中模拟完成排列后的超表面。如图 6 所示,超表面结构排列示意图。图 6 中 1 个像素 对应的是一个单元结构,整个器件尺寸为 20 μm × 20 μm。



Figure 6. Schematic diagram of metasurface structure 图 6. 超表面结构示意图

这时边界条件不同于单元结构模拟,PML 边界条件被用在 x, y, z3 方向上。分别以左旋圆偏振光和 右旋圆偏振光的光源分别设置在超表面上由基底的垂直照射。在模拟过程中,由于硬件条件不足,超表 面结构被分割成一个个区域,单独模拟电磁场,利用开源 Matlab 软件与 East FDTD 软件进行联合仿真。 利用开源 Matlab 对单元的各个参数、点位和方位角相应编辑排布,再将这段程序翻译成能过被 East FDTD 软件识别的语言,方便编码操作。再通过数据处理拼接出各个区域的模拟数据,通过 Fieniel 衍射推导出 模拟结果。全息图如图 7(a)经过超表面后左旋圆偏振光,全息图如图 7(b)经过超表面后右旋圆偏振光。



Figure 7. Simulation results (a) Left-handed circularly polarised light incidence; (b) Right-handed circularly polarised light incidence 图 7. 仿真结果(a) 左旋圆偏振光入射; (b) 右旋圆偏振光入射

在评价超表面成像结果的过程中,本文用峰值信噪比(PSNR)与结构相似度(SSIM)综合评价仿真结果。

$$PSNR = 10\log_{10}\left(\frac{255^2}{MSE}\right)$$
(6)

$$SSIM = \frac{\left(2\mu_x\mu_y + C_1\right)\left(2\sigma_{xy} + C_2\right)}{\left(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1\right)\left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2\right)}$$
(7)

其中:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - x_i)^2$$
(8)

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \ \mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$
(9)

$$\sigma_x = \left(\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2\right)^{1/2}$$
(10)

$$\sigma_{y} = \left(\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} \left(y_{i} - \mu_{y}\right)^{2}\right)^{1/2}$$
(11)

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \mu_x) (y_i - \mu_y)$$
(12)

n 为像素数量, y_i 为复现图像数据, x_i 为预设图案数据, $C_1 \oplus C_2$ 为常数, 避免 $(2\mu_x\mu_y+C_1)(2\sigma_{xy}+C_2)$ 为 0。两种评价方法中 PSNR、SSIM 值越大, 成像质量越好。

从图 7(a)和图 7(b)中分别可以清晰地观察到 "CU"和 "ST"几个字母,与原始图片一致。左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的峰值信噪比分别为 10.86 dB 和 11.03 dB,结构相似性分别为 0.673 和 0.702。由于单元结构的偏振转换效率达不到百分之百,致使出射光里会有一定比例与入射圆偏振光偏振状态一致的光,而这部分光同样会参与全息成像的过程。在两幅图内,其实都涵盖了由这部分光所生成的全息像,只是其强度过弱,以至于难以被察觉识别出来。

4. 结论

目前相位调控技术在光学领域发展很快,本文采用硅基材料构建相位调节单元,在单元结构设计流 程中将传输相位的调节与几何相位调控有机地融合在一起。在1550 nm 的特定工作波长下,成功获得了 有效实现圆偏振复用全息功能的明晰两幅全息图像。这一技术路径为在多通道全息成像领域应用超表面 创造了条件,使超表面的利用效能得到一定程度的优化,在海量信息存储、偏振光学科学研究和全息数 据加密等方向上有力地促进了超表面的进步,使其发展边界得以拓展。同时,该超表面于光束整形、三 维生物成像以及光学计算等对相位调制有需求的专业领域,展现出极为可观的应用潜力,有望在未来光 学工程实践中发挥重要作用,助力相关技术的进一步发展与突破,为光学产业升级贡献力量。

参考文献

- Shelby, R.A., Smith, D.R. and Schultz, S. (2001) Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science*, 292, 77-79. <u>https://doi.org/10.1126/science.1058847</u>
- [2] Liu, R., Ji, C., Mock, J.J., Chin, J.Y., Cui, T.J. and Smith, D.R. (2009) Broadband Ground-Plane Cloak. *Science*, 323, 366-369. <u>https://doi.org/10.1126/science.1166949</u>
- [3] Yu, N., Genevet, P., Kats, M.A., Aieta, F., Tetienne, J., Capasso, F., et al. (2011) Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction. Science, 334, 333-337. https://doi.org/10.1126/science.1210713
- [4] Liu, Z., Li, Z., Liu, Z., Li, J., Cheng, H., Yu, P., et al. (2015) High-Performance Broadband Circularly Polarized Beam Deflector by Mirror Effect of Multinanorod Metasurfaces. Advanced Functional Materials, 25, 5428-5434. <u>https://doi.org/10.1002/adfm.201502046</u>
- [5] Zhang, Q., Li, M., Liao, T. and Cui, X. (2018) Design of Beam Deflector, Splitters, Wave Plates and Metalens Using Photonic Elements with Dielectric Metasurface. *Optics Communications*, **411**, 93-100. <u>https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.11.011</u>

- [6] Su, X., Ouyang, C., Xu, N., Cao, W., Wei, X., Song, G., et al. (2015) Active Metasurface Terahertz Deflector with Phase Discontinuities. Optics Express, 23, 27152-27158. <u>https://doi.org/10.1364/oe.23.027152</u>
- [7] Meng, Y., Lyu, Y., Yu, Z., Chen, L.L. and Liao, H. (2022) Visible-Light Metalens Far-Field Nanofocusing Effects with Active Tuning of Focus Based on MIM Subwavelength Structures Used in an Integrated Imaging Array. *Applied Optics*, 61, B339-B344. <u>https://doi.org/10.1364/ao.444729</u>
- [8] Gowda, V.R., Imani, M.F., Sleasman, T. and Smith, D.R. (2021) Efficient Holographic Focusing Metasurface. *Electronics*, 10, Article 1837. <u>https://doi.org/10.3390/electronics10151837</u>
- [9] Luo, X., Hu, Y., Li, X., Jiang, Y., Wang, Y., Dai, P., et al. (2020) Integrated Metasurfaces with Microprints and Helicity-Multiplexed Holograms for Real-Time Optical Encryption. Advanced Optical Materials, 8, Article 1902020. <u>https://doi.org/10.1002/adom.201902020</u>
- [10] Wan, W., Qiao, W., Pu, D., Li, R., Wang, C., Hu, Y., et al. (2020) Holographic Sampling Display Based on Metagratings. iScience, 23, Article100773. <u>https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.100773</u>
- [11] Yang, H., Chen, Z., Liu, Q., *et al.* (2018) Near-Field Orbital Angular Momentum Generation and Detection Based on Spin Orbit Interaction in Gold Metasurfaces. *Advanced Theory and Simulations*, **8**, Article 1134.
- [12] 张东辉, 汪剑波, 张文琪, 等. 基于双纳米孔超表面全息成像[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2023, 46(4): 23-30.
- [13] Deng, J., Yang, Y., Tao, J., Deng, L., Liu, D., Guan, Z., et al. (2019) Spatial Frequency Multiplexed Meta-Holography and Meta-Nanoprinting. ACS Nano, 13, 9237-9246. <u>https://doi.org/10.1021/acsnano.9b03738</u>
- [14] Zang, W., Yuan, Q., Chen, R., Li, L., Li, T., Zou, X., et al. (2019) Chromatic Dispersion Manipulation Based on Metalenses. Advanced Materials, 32, Article 1904935. <u>https://doi.org/10.1002/adma.201904935</u>
- [15] Intaravanne, Y. and Chen, X. (2020) Recent Advances in Optical Metasurfaces for Polarization Detection and Engineered Polarization Profiles. *Nanophotonics*, 9, 1003-1014. <u>https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0479</u>