

引用格式: ZHANG Yuming, FAN Wenhui, WU Qi, et al. Terahertz Polarization Multiplexing Computer-generated Holography Based on All-dielectric Metasurface[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0809001

张育铭, 范文慧, 吴奇, 等. 基于全介质超表面的太赫兹波段偏振复用计算全息成像[J]. 光子学报, 2023, 52(8):0809001

# 基于全介质超表面的太赫兹波段 偏振复用计算全息成像

张育铭<sup>1,2</sup>, 范文慧<sup>1,2</sup>, 吴奇<sup>1,2</sup>, 秦冲<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**提出利用全介质超表面实现太赫兹波段计算全息成像技术方案,采用基于几何相位调控的全介质超表面实现了频率 0.95 THz~1.2 THz 的宽带全息成像。在此基础上,设计了基于几何相位和传输相位同时调控的全介质超表面并实现了偏振复用全息成像。该研究提高了超表面的复用能力和工作效率,有望解决金属超表面存在的固有欧姆损耗和低极化转换效率等问题。同时可以激发 Mie 型电共振和磁共振实现波前调制,为开发高效、轻便、低成本的太赫兹功能器件提供了一种新途径。

**关键词:**太赫兹波;超表面;计算全息;波前调控;偏振复用

中图分类号:O436.1;O436.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235208.0809001

## 0 引言

传统照相术是在底片上将物体自发或散射光波波前的强度分布记录下来的技术。然而,这种技术失去了原始波前的相位信息,呈现出来的图像不能反映目标物体的全部信息。为了解决该问题,GABOR D<sup>[1]</sup>提出全息术概念。全息术是可以记录并再现物体散射和衍射光波的振幅和相位分布的技术,包括干涉记录和衍射再现两个过程。传统的全息术只能对真实存在的目标物体进行观测,无法记录虚拟物体的信息<sup>[2]</sup>。随着全息技术的发展,LOHMANN A W<sup>[3]</sup>提出计算全息术,即利用物理光学理论,通过计算机产生干涉图样,并利用调制器件进行编码实现全息成像。与传统全息术相比,计算全息术具有噪声低、操作简单、重复性高、能够对虚拟物体进行衍射再现等优点,因而逐步取代了传统全息技术,成为新型全息技术。

太赫兹波是频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波,对应的波长范围为 30~3 000  $\mu\text{m}$ ,处于毫米波和远红外波之间。太赫兹波独特的频谱位置使其具有光子能量低、频谱信息丰富、穿透能力强以及带宽大等优点<sup>[4]</sup>。基于上述特性,太赫兹全息技术广泛应用于生物医学成像、安全筛查、无损检测和评估等领域<sup>[5]</sup>。然而,受限于自然材料固有的介电常数和磁导率,传统的透射型和反射型太赫兹功能器件通常由高密度聚乙烯、聚四氟乙烯、聚甲基戊烯、石英和蓝宝石等组成<sup>[6]</sup>,不可避免地导致其体积大、重量重、效率低,阻碍了太赫兹系统小型化、集成化的发展。同时,可见光波段的传统调制器件像素尺寸通常与太赫兹波波长不匹配,这会导致高阶衍射级非预期全息像的产生,从而导致成像质量下降。

超材料是一种电磁特性能够突破自然界材料限制的人工复合材料,可以根据需要对其结构排布和电磁特性进行自由设计。超材料的出现为实现负折射率、隐身材料、超透镜、电磁诱导透明和完美吸收等提供了可能<sup>[7]</sup>。然而,大多数三维超材料体积较大、制造困难、材料损耗也不可忽略。超表面是超材料的二维形式,通常指亚波长量级人工单元结构排布在平面上的二维阵列,具有体积小、易于集成制造的优势。对超表面

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61675230, 61905276),陕西省自然科学基金(No. 2020JQ-437)

第一作者:张育铭, zhangyuming20@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:范文慧, fanwh@opt.ac.cn

收稿日期:2023-01-12;录用日期:2023-03-16

<http://www.photon.ac.cn>

单元结构进行合理的设计可以实现对光场的灵活调控,实现光束聚焦、光束衍射、特殊光束产生、波束整形和全息图像重建等功能<sup>[8]</sup>。

近年来,基于超表面的可见光波段多路复用技术在彩色全息显示、光通信和光学加密等领域已得到广泛应用,例如偏振复用、波长复用、轨道角动量复用和空间复用等<sup>[9]</sup>。太赫兹波段的超表面全息多路复用也出现了一些研究工作。2016年,首都师范大学 WANG Bo等<sup>[10]</sup>设计了一种以亚波长金属天线为单元结构的超表面,在工作频率0.5 THz和0.63 THz分别获得了不同字符的全息像。2018年,天津大学 WANG Qiu等<sup>[11]</sup>设计一种以铝双开口谐振环为单元结构的超表面,实现了反射式相位型圆偏复用超表面全息成像,不同偏振状态的光入射时获得不同的全息像。2022年,空军工程大学 DONG Bowen等<sup>[12]</sup>提出了一种由二氧化钒C型环谐振器和纯金C型环谐振器组成的超表面,在不同温度下呈现不同全息图。但上述设计均涉及金属材料,这类材料不易于成型和加工,易生锈腐蚀且透光性较差。光学器件的效率和多功能操控一直以来都是一个瓶颈问题。究其本质是构建超表面的人工原子既要满足相位覆盖要求,还要具备较高的反射效率或透射效率。鉴于此,本文采用在太赫兹波段透过率较高、折射率为3.45<sup>[13]</sup>的高阻硅矩形柱结构作为超表面的单元结构实现全息成像。不仅解决了由金属制成的超表面在太赫兹波入射下存在固有的欧姆损耗和极化转换效率低的问题,而且可以激发 Mie 型电共振、磁共振和有效波导效应实现波前调控,为开发高效、轻便、低成本的太赫兹功能器件提供一种新途径。2020年,LEE S H等<sup>[14]</sup>将太赫兹成像与超材料相结合,利用太赫兹波段的纳米槽共振为导致痴呆的淀粉蛋白在小鼠大脑中积累的特定区域提供了真实生物样本和图谱信息的光学特性。同年,ABDELAZEEM R M等<sup>[15]</sup>提出一种新的全息成像装置系统观察并定量评估胶质细胞瘤患者的肿瘤情况。2022年,TORNARI V<sup>[16]</sup>提出一种交互式的全息干涉条纹信息推理方法分割和识别艺术品的缺陷。本文方法可作为一种有效的光学方法显示病变细胞的三维结构,突出病变区域,评估疾病进展,同时记录多个物体的信息,并使用不同的调控方式将记录的物体信息同时再现。

本文首先使用 Gerchberg-Saxton (GS) 算法获得目标物体相位的最优解分布,然后使用全硅矩形柱作为基本单元结构排布超表面调控太赫兹波,实现了基于几何相位调控的超表面全息成像并验证获得的全息像具有一定的宽带性,在0.95~1.2 THz频率范围内可以实现全息成像。在此基础上,通过合理设计超表面单元结构,实现了基于几何相位和传输相位同时调控的圆偏复用功能,在不同偏振态入射时可获得不同的全息像。这样的设计在一定程度上解决了太赫兹波段传统功能器件体积大、重量重、效率低的缺点,促进了集成化、多功能化太赫兹技术的发展,在太赫兹波段全息成像及波前调控的应用中表现出较大应用潜力。

## 1 基础理论

基于全介质超表面的太赫兹波段计算全息成像研究过程包括:1) 建立计算全息模型。借助计算机模拟瑞利索墨菲衍射过程获取目标物体的相位信息。2) 设计合适的超表面单元结构,合理地改变单元结构的结构参数,建立单元库。3) 从单元库中挑选合适的单元结构,与全息板上各个像素的相位信息进行匹配,在每个像素处安排合适的单元结构调控相位信息,排布超表面。4) 按照既定入射波的特点,设置入射波的波长和偏振态模拟全息过程中的衍射再现部分,获得全息像。

### 1.1 计算全息成像模型

计算全息成像不需要实际存在的物体,而是使用计算机借助数学方法对全息过程中的干涉记录部分进行建模,记录物光波的全部波前信息并使用调制器件将物体的波前信息再现。计算全息成像同样包括干涉记录和衍射再现两个过程,它们是光路互逆的,对应衍射公式中的波矢大小互为相反数。衍射再现部分使用的衍射公式是在太赫兹波段适用性极强的瑞利索墨菲(Rayleigh-Sommerfeld, RS) 衍射公式<sup>[17]</sup>,其表达式为

$$g(u, v) = \frac{1}{i\lambda} \iint u(x, y) \cos \langle \mathbf{n}, \mathbf{r} \rangle \frac{\exp(ikr)}{r} dx dy \quad (1)$$

式中, $g(u, v)$ 和 $u(x, y)$ 分别表示成像面上 $(u, v)$ 处和超表面上 $(x, y)$ 处的光场分布,成像面和超表面相距 $z$ , $r = \sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2 + z^2}$ , $\cos \langle \mathbf{n}, \mathbf{r} \rangle = \frac{z}{r}$ 是倾斜系数。为了计算方便,假设目标物体具有一致的振幅和相位分布,因此可将 $u(x, y)$ 看做常数 $C$ ,式(1)可简化为



## 1.2 相位调控理论

利用超表面相位梯度的变化可以控制出射光的传播特性。最常用的超表面相位调制类型可分为三类<sup>[18]</sup>,即共振相位、传输相位和几何相位。

传输相位调控原理是入射光在具有各向异性的超表面单元结构内传播时存在附加相位。基本思想是通过改变超表面单元结构的几何结构参数(矩形硅柱的长和宽)实现对有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的调制,使得附加相位  $\varphi$  实现  $0 \sim 2\pi$  的相位覆盖,从而实现对入射波波前的相位调制。

几何相位调控原理是两个不同旋转角度的单元结构在庞加莱球中的演化轨迹不同而产生附加相位<sup>[18]</sup>,如图2。改变单元结构的旋转角  $\alpha$  可以改变附加相位值  $\varphi$ ,且两者始终存在  $\varphi = \pm 2\alpha$  的关系<sup>[18]</sup>。“+”和“-”分别代表左旋圆偏振(Left-handed Circularly Polarized, LCP)光入射和右旋圆偏振(Right-handed Circularly Polarized, RCP)光入射。

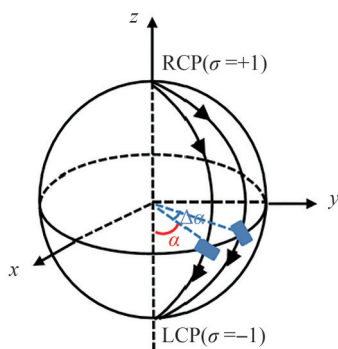


图2 庞加莱球面的几何相位示意

Fig.2 Schematic of the geometric phases of the Poincaré sphere

设计了一种具有圆偏振复用功能的超表面,即改变入射光的偏振状态并设置不同偏振方向检偏时会产生两种完全不同的全息像,功能实现如图3。右旋圆偏振光入射时,透射光是左旋圆偏振光,呈现字母E的全息像;左旋圆偏振光入射时,透射光是右旋圆偏振光,呈现字母F的全息像。仅使用几何相位或传输相位调控原理无法实现偏振复用,这里采用几何相位和传输相位共同调控的方式<sup>[19]</sup>实现圆偏振复用下的全息成像。

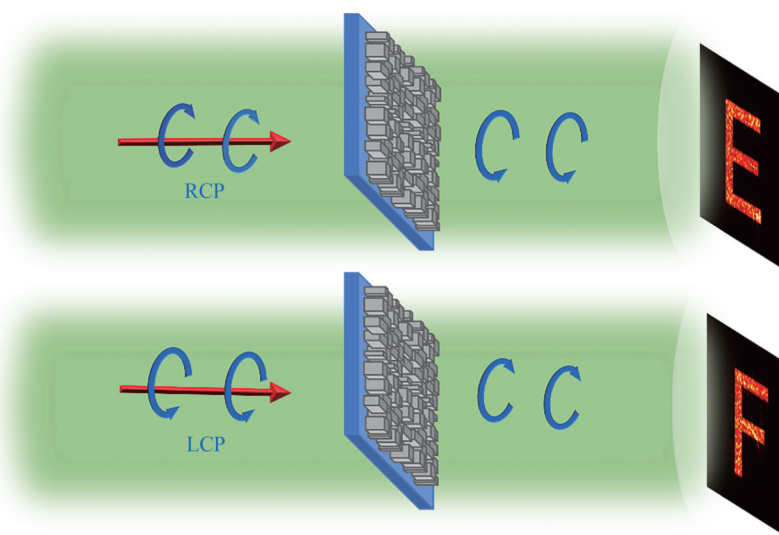


图3 可实现偏振复用的超表面示意

Fig.3 Schematic of the polarization multiplexing metasurface

对于一个各向异性的单元结构,对应的琼斯矩阵可表示为

$$T_1 = R(-\alpha)T_0R(\alpha) = \begin{pmatrix} t_1 \cos^2 \alpha + t_w \sin^2 \alpha & t_1 \sin \alpha \cos \alpha - t_w \sin \alpha \cos \alpha \\ t_1 \sin \alpha \cos \alpha - t_w \sin \alpha \cos \alpha & t_1 \cos^2 \alpha + t_w \sin^2 \alpha \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中,  $t_1 = T_1 \exp(i\varphi_1)$ ,  $t_w = T_w \exp(i\varphi_w)$  表示结构在两个正交方向上的复振幅分布,  $T_1$ ,  $T_w$ ,  $t_1$ ,  $t_w$  分别是长  $l$ , 宽  $w$  方向上的透过率和相位延迟。其中  $T_0 = \begin{bmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & T_w \end{bmatrix}$  是单元结构在不发生旋转时对应的琼斯矩阵,

$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$  是单元结构旋转  $\alpha$  角度时的旋转矩阵。当单元结构旋转  $\alpha$  角度时, 对应的琼斯矩阵

$T_1$  可由式(5)表示。当圆偏振光入射时, 入射光可以表示为  $\hat{E}_{in} = \hat{e}_{in}^{L/R}$ , 出射光可以表示为

$$\hat{E}_{out} = T_1 \cdot \hat{E}_{in} = \frac{(t_1 + t_w)}{2} \hat{e}_{in}^{L/R} + \frac{(t_1 - t_w)}{2} \exp(\pm i2\alpha) \hat{e}_{in}^{R/L} \quad (6)$$

透射光的电场分布包括两部分, 即没有任何相位调制的同偏振分量和具有共轭相位调制  $\pm\alpha$  的交叉偏振分量。使用与单元结构旋向相关的几何相位调控和与结构参数相关的传输相位调控相结合的方式可以有效调控太赫兹波实现自旋解耦。这里考虑单元结构是无损的 ( $T_1 = T_w = 1$ ) 并具有半波片的性质  $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_w| = \pi$ 。那么  $t_1 = \exp(i\varphi_1)$ ,  $t_w = \exp[i(\varphi_w \pm \pi)]$ , 将上述条件带入式(6), 则出射光可表示为

$$\hat{E}_{out} = \exp[i(\varphi_1 \pm 2\alpha)] \hat{e}_{in}^{R/L} \quad (7)$$

假设自旋解耦时的目标相位分布为  $\varphi_R(l, w)$  和  $\varphi_L(l, w)$ , 由式(7)可得

$$\varphi_R(l, w) = \varphi_1(l, w) + 2\alpha(l, w) \quad (8)$$

$$\varphi_L(l, w) = \varphi_1(l, w) - 2\alpha(l, w) \quad (9)$$

式中,  $\varphi_1(l, w)$  表示传输相位调控的相位值, 由单元结构的材料和几何参数决定,  $\pm\alpha(l, w)$  表示几何相位调控的相位值, 由单元结构的旋转角度决定。由式(8)和(9)可得

$$\varphi_1(l, w) = \frac{\varphi_L(l, w) + \varphi_R(l, w)}{2} \quad (10)$$

$$\alpha(l, w) = \frac{\varphi_R(l, w) - \varphi_L(l, w)}{4} \quad (11)$$

即得到每个位置处单元结构需要的本征相移和旋转角度。通过改变单元结构的几何参数和旋转角度, 排布超表面。

图4为超表面的目标相位分布和目标理论全息像。目标物体有  $90 \times 90$  个像素, 像素尺寸是  $130 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$ , 全息成像距离设置为  $3 \text{ mm}$ 。几何相位和传输相位共同调控时, 由式(10)和(11)计算出两种调控方式下分别需要满足的相位值。通过改变单元结构的旋转角和结构参数即可满足目标物体的相位分布。按照既定入射波的特点, 设置入射波的波长和偏振态全波模拟全息过程中的衍射再现部分, 获得全息像。

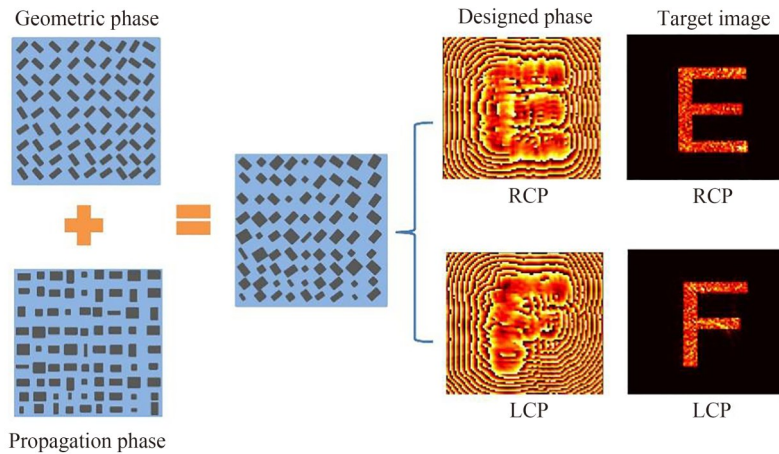


图4 超表面的目标相位分布和目标理论全息像

Fig.4 Designed phase distribution and target academic holographic image of the metasurface

## 2 超表面单元结构设计

### 2.1 全硅矩形柱单元结构设计

图5(a)、(b)分别是全硅矩形柱单元结构的主视图和顶视图。考虑到后期加工超表面的便利性,设置超表面单元结构的周期 $P=130\ \mu\text{m}$ ,高度 $h=200\ \mu\text{m}$ ,基底厚度为 $300\ \mu\text{m}$ (基底厚度在仿真时几乎无影响)。使用有限时域差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法建立单元结构库。首先,在 $x$ 、 $y$ 方向设置周期性边界条件, $z$ 方向设置完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)边界条件,光源设置为平面波光源。随后,将单元结构的长和宽从 $25\ \mu\text{m}$ 到 $129\ \mu\text{m}$ 范围内以步长 $1.3125\ \mu\text{m}$ 变化,建立含有 $80\times 80$ 个全硅矩形柱的单元结构库。最后,从单元结构库中挑选出具有较高透过率( $>70\%$ )且满足半波片关系 $\Delta\varphi=|\varphi_l-\varphi_w|=\pi$ 的单元结构。

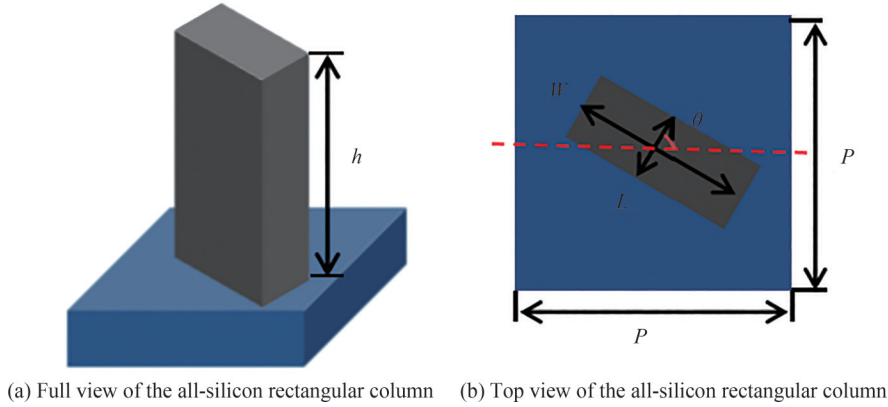


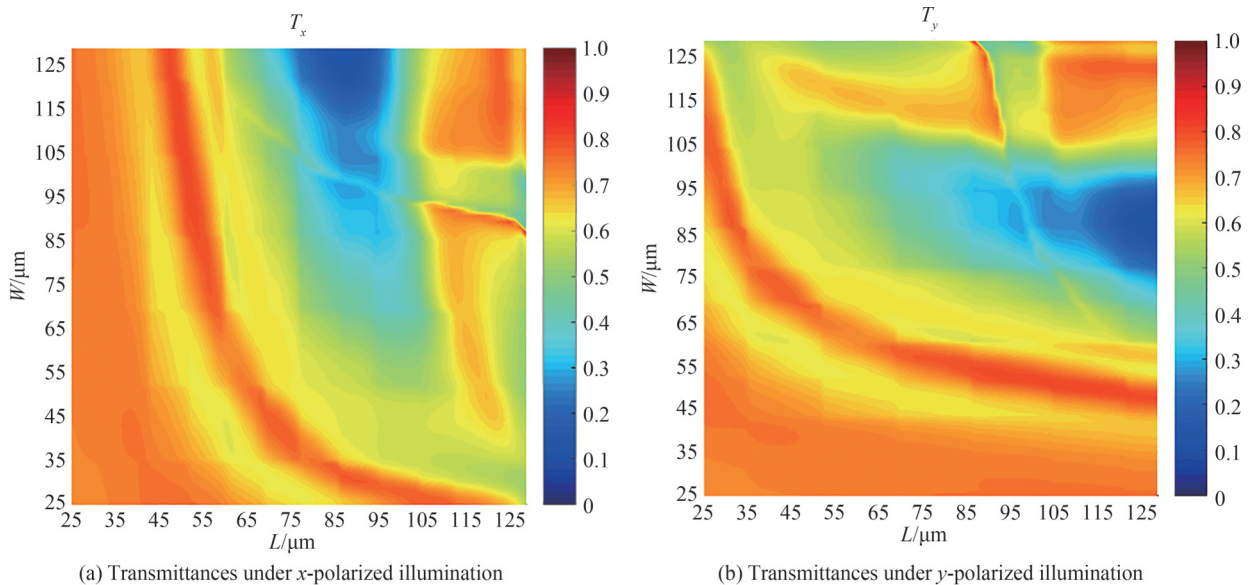
图5 全硅矩形柱单元结构示意图

Fig.5 Schematic of the all-silicon rectangular column element structure

### 2.2 相位调控理论验证

选择频率为 $1.0\ \text{THz}$ 的 $x$ 方向的线偏振光和 $y$ 方向的线偏振光分别入射,根据2.1节全硅矩形柱单元结构设计原理建立如图6所示的单元结构库。图6(a)、(b)为单元库中各个单元结构分别在 $x$ 方向和 $y$ 方向的透过率分布,图6(c)、(d)为单元库中各个单元结构在 $x$ 方向和 $y$ 方向的相位分布。建立的单元结构库在 $x$ 、 $y$ 方向具有较高的透过率且均满足 $0\sim 2\pi$ 的相位分布。

单元结构的偏振转换效率(Polarization Conversion Efficiency, PCE)定义为与入射光螺旋度相反的透射光功率与总入射功率的比值<sup>[20]</sup>。从单元库中选取高透过率且满足半波片关系的单元结构,计算其偏振转换



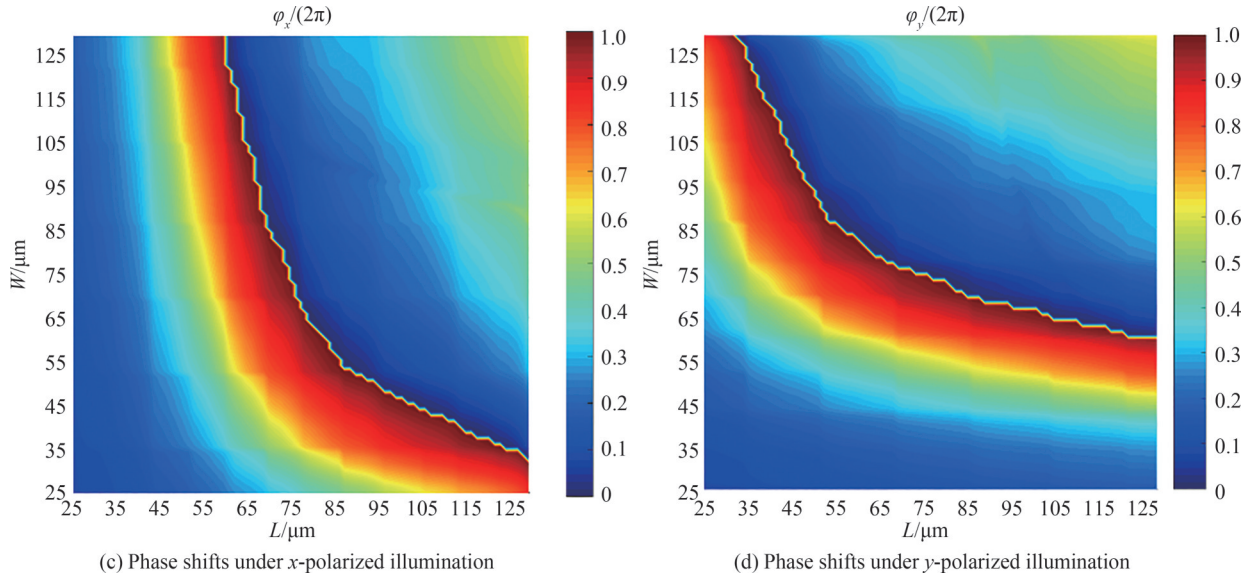


图6 超表面单元的透过率和相移分布

Fig.6 Transmittances and phase shifts of the metasurface elements

效率。选出的单元结构的几何参数以及相应的透过率和偏振转换效率如表1。表1选出的五个单元矩形柱满足五阶相位调控,即将单元库的相位量化为 $(0, 2\pi/5, 4\pi/5, 6\pi/5, 8\pi/5)$ 的分布。表1中不同结构参数的单元结构对应不同的透过率和偏振转换率。从单元库中挑选出一个满足半波片关系且透过率和偏振转换效率最高的单元结构,选定长和宽分别为 $25\ \mu\text{m}$ 和 $110.57\ \mu\text{m}$ 的单元结构作为几何相位调控下的基本单元结构。该单元结构对应的透过率和偏振转换效率分别为77.4%和76.8%。

表1 所选超表面单元的几何参数以及对应的透过率和偏振转换效率

**Table 1 Geometric parameters and the corresponding transmittances and polarization conversion efficiency of the selected metasurface elements**

Element	1	2	3	4	5
$L/\mu\text{m}$	110.57	80.29	80.29	25.00	38.16
$W/\mu\text{m}$	25.00	38.16	39.48	110.57	81.61
Transmittance/%	75.9	72.3	71.3	77.4	70.2
PCE/%	76.8	73.6	71.2	76.8	72.4

将选出的基于几何相位调控下的单元结构旋转角从 $0^\circ$ 到 $180^\circ$ 以 $22.5^\circ$ 为步长变化,计算其附加相位值,仿真结果如图7(a)。结果表明设计的全硅矩形柱单元结构在旋转角变化时,透过率存在微小差异,但均在

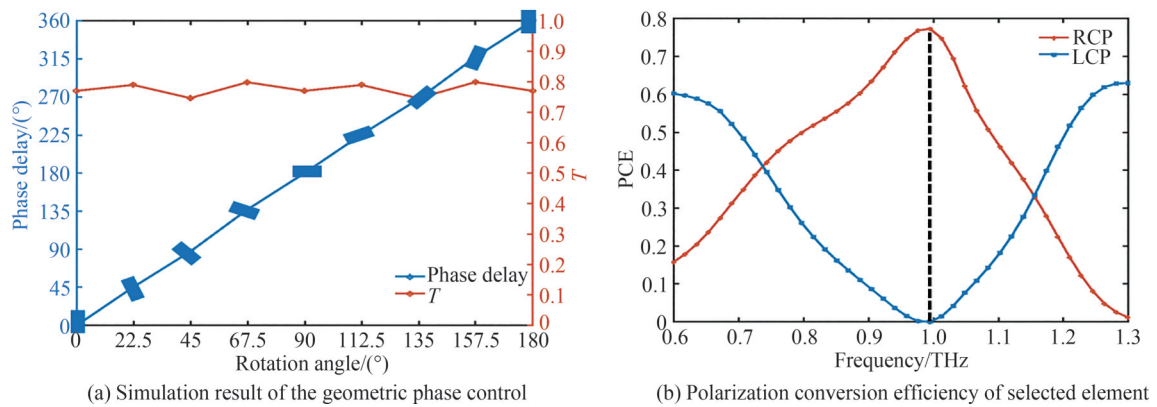


图7 几何相位调控和偏振转换效率的仿真结果

Fig.7 Simulation results of geometric phase control and polarization conversion efficiency of the selected element

76%以上。设置LCP光入射时,全硅柱单元结构的附加相位值 $\varphi$ 始终与旋转角 $\alpha$ 存在 $\varphi = 2\alpha$ 的关系。设置不同入射波长的LCP光,记录单元结构的偏振转换效率,如图7(b)。单元结构在1 THz处具有极高的偏振转换效率(可达76.8%)。在1 THz的临近频率范围(0.75~1.15 THz)内,RCP光的偏振转换效率均高于LCP光,即在该频率范围内,大部分LCP光转换为RCP光。虽然1.2 THz处的偏振转换效率较低,但仍然可以看到相似结果。因此设计的单元结构具有一定的宽带性。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 基于几何相位调控的全息成像结果

基于几何相位调控时,设置1.0 THz的LCP光入射,在成像面( $z=3$  mm)处获得RCP检偏态下的强度、相位及在 $y$ 方向 $x=0$ 处的归一化强度分布,如图8(a)~(c)。同时在成像面获得LCP检偏状态下的强度、相位及在 $y$ 方向 $x=0$ 处的归一化强度分布,如图9(a)~(c)。从图中可以看出,所选单元结构不是一个完美的半波片,单元结构的偏振转换效率为76.8%,所以透射光中不但包含交叉偏振分量,同时也包含少量的同偏振分量。从图8(c)可以看出,在设置RCP检偏时透射光的能量大多集中在字母E所在区域内,其他区域内强度基本趋于0。相对于RCP检偏,在设置LCP检偏时,归一化强度在非字母E区域分布较多,如图9(c)。这是因为单元结构的透过率和转换效率只有76.8%和77.4%,LCP无法全部转换为RCP,会有部分LCP残留。此外,全息像的衍射效率定义为目标像区域内探测得到的正交偏振分量积分与入射光能量之比<sup>[17]</sup>。使用几何相位调控时,全波模拟获得的全息像衍射效率为13.19%。

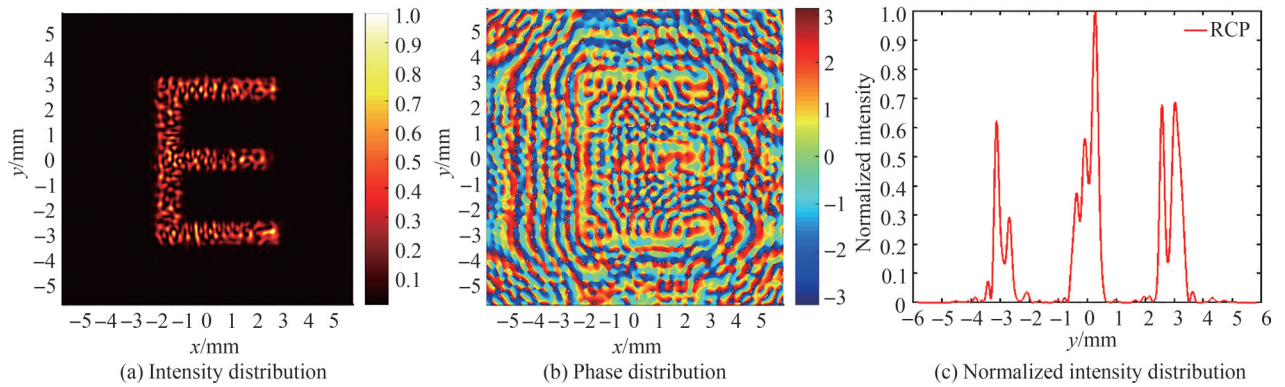


图8 基于几何相位调控设置RCP检偏时的强度、相位以及在 $y$ 方向 $x=0$ 处的归一化强度分布

Fig.8 Intensity and phase and normalized intensity distribution at  $x=0$  in  $y$ -direction under RCP analysis of geometric phase control

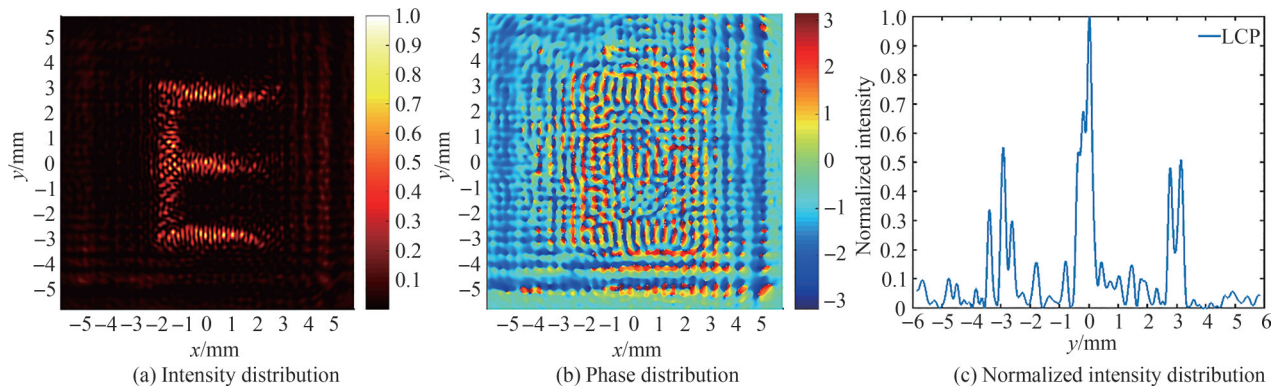


图9 基于几何相位调控设置LCP检偏时的强度、相位以及在 $y$ 方向 $x=0$ 处的归一化强度分布

Fig.9 Intensity and phase and normalized intensity distribution at  $x=0$  in  $y$ -direction under LCP analysis of geometric phase control

在此基础上,设置其它三种不同频率(0.95 THz、1.1 THz、1.2 THz)的LCP光入射到基于1.0 THz特定频率下设计的超表面上,分别在2.9 mm、3.1 mm、3.2 mm的成像面获得RCP检偏态下的强度、相位以及在 $y$ 方向 $x=0$ 处的归一化强度分布,如图10(a)~(i)。从仿真结果看,基于1.0 THz频率设计的超表面在



0.95 THz、1.1 THz、1.2 THz的频率下获得的全息像和相位分布与1.0 THz下获得的全息像和相位分布具有相似效果。此外,三种不同频率下在不同成像面处的归一化强度的分布趋势和1 THz下保持一致,如图10(c)、(f)、(i)。光场能量大多集中在字母E区域内,在非字母E区域内的强度分布基本趋于0。此外,为了更好地说明宽带范围,使用结构相似性指数<sup>[21]</sup>(Structural Similarity Index Measure, SSIM)从亮度、对比度、结构三个方面综合度量两幅图的相似性,其值越大越好,最大为100%。这里设定SSIM值大于80.00%时,两幅图较为相似。频率0.95 THz、1.1 THz和1.2 THz获得的全息像与中心频率1 THz获得的全息像之间的SSIM值分别为82.06%、80.27%、82.07%,说明设计的全硅矩形柱超表面具有良好的宽带特性。因此,宽带特性指的是基于中心频率1 THz设计的超表面在0.95~1.2 THz的频率范围内仍具有较好的成像效果。从仿真结果看,不同频率对应不同的最佳成像位置,且成像距离与入射光频率成正比。这是因为不同频率在不同的传播距离时会有不同程度的相位累积。

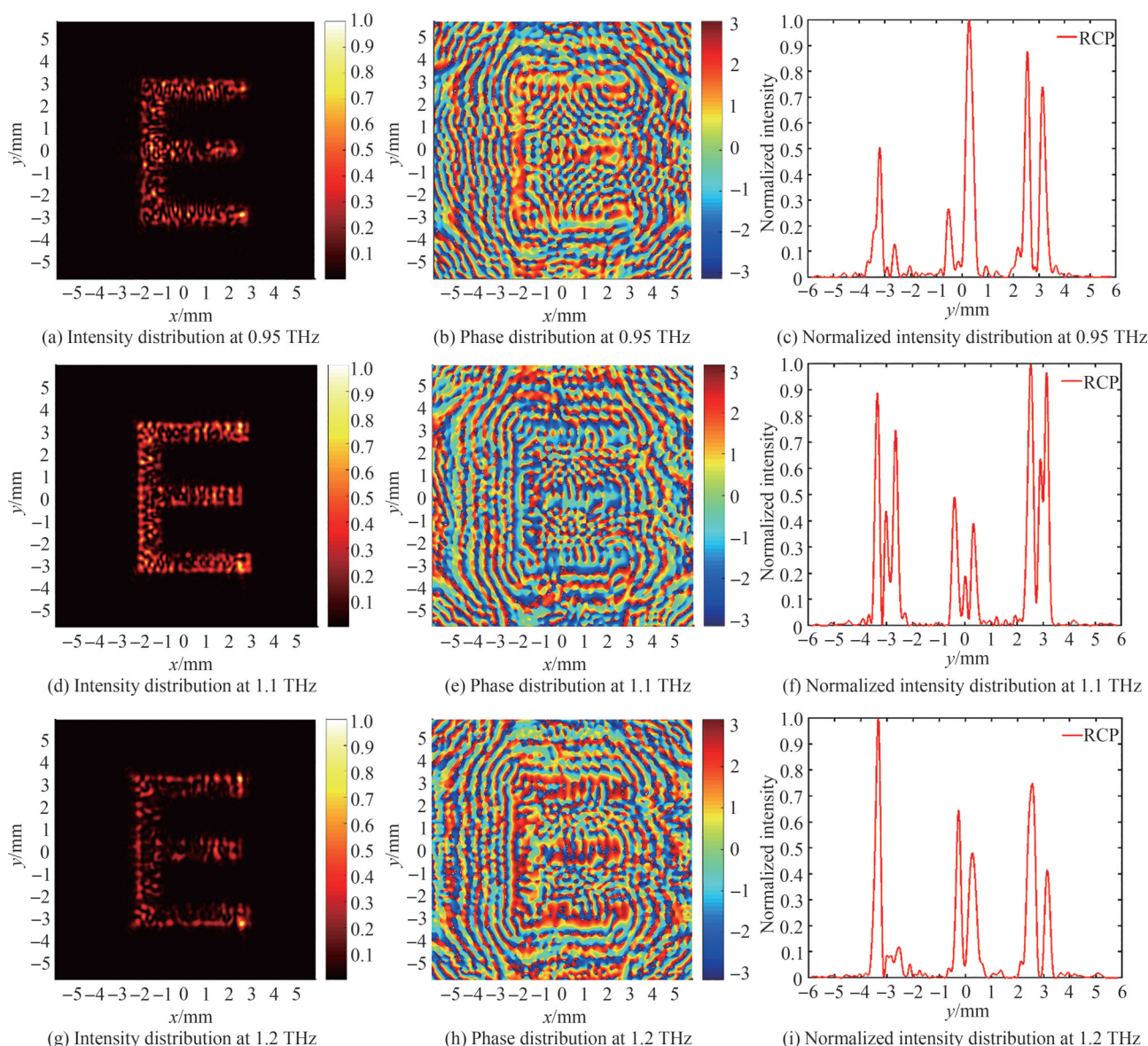


图10 不同入射频率下基于几何相位调控设置RCP检偏时的强度、相位以及在 $y$ 方向 $x=0$ 处的归一化强度分布  
Fig.10 Intensity and phase and normalized intensity distribution at  $x=0$  in  $y$ -direction at different incident frequencies under RCP analysis of geometric phase control

### 3.2 偏振复用全息成像结果

基于几何相位和传输相位共同调控时,设置中心频率 1.0 THz 的 RCP 光入射,在成像面获得 LCP 检偏态下的强度、相位以及在  $y$  方向  $x=0$  处的归一化强度分布,如图 11(a)~(c)。该偏振态下全息像的衍射效率为 6.97%。设置 1.0 THz 的 LCP 光入射,在成像面获得 RCP 检偏态下的强度、相位及在  $y$  方向  $x=0$  处的归一化强度分布,如图 12(a)~(c)。该偏振态下全息像的衍射效率为 6.63%。为了同时满足两通道下的相位分布,选择高透过率且满足五阶相位分布的单元结构作为超表面的基本单元结构。基于几何相位和传输相位调控下获得的全息像衍射效率和几何相位调控时获得的全息像衍射效率相比略低。这是因为在涉及传输相位调控时,采用五阶相位调控,这时每个位置处的相位值被人为地更改为设定的五个相位值,无法精准地满足目标相位分布。此外,涉及双通道全息成像时,两个通道之间会存在微小串扰,但能较为清晰地看到不同偏振状态下的入射光入射时呈现不同的全息像,验证了该超表面的偏振复用全息成像功能。通过设计更高透过率且相位分布覆盖  $0\sim 2\pi$  的单元结构库并设置更高阶相位分布可以改善这种微小串扰。此外,设计具有高反射率的反射式超表面调控太赫兹波相位实现全息成像。后续将在超表面单元结构优化设计上继续改进,更好地验证基于全介质超表面实现太赫兹频段全息成像的优越性。

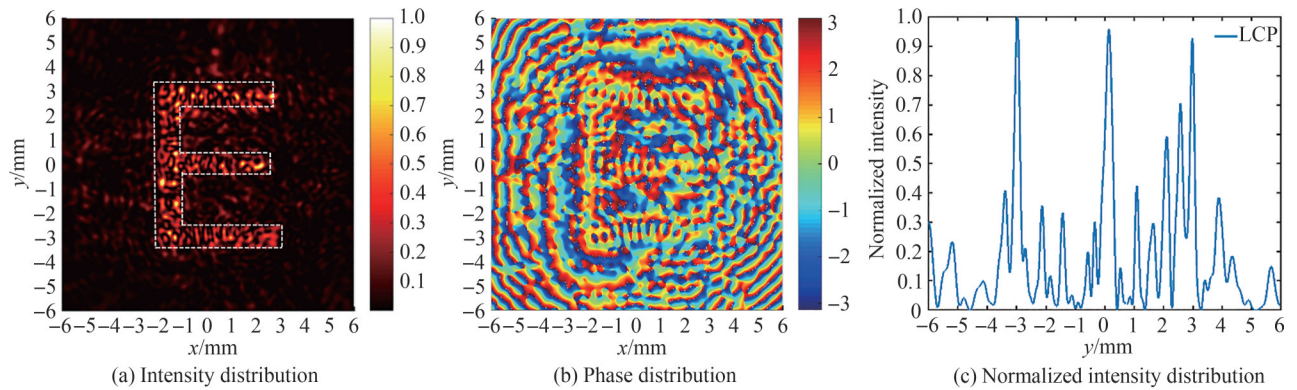


图 11 基于几何相位和传输相位调控设置 LCP 检偏时的强度、相位以及在  $y$  方向  $x=0$  处的归一化强度分布

Fig.11 Intensity and phase and normalized intensity distribution at  $x=0$  in  $y$ -direction under LCP analysis of geometric phase and propagation phase control simultaneously

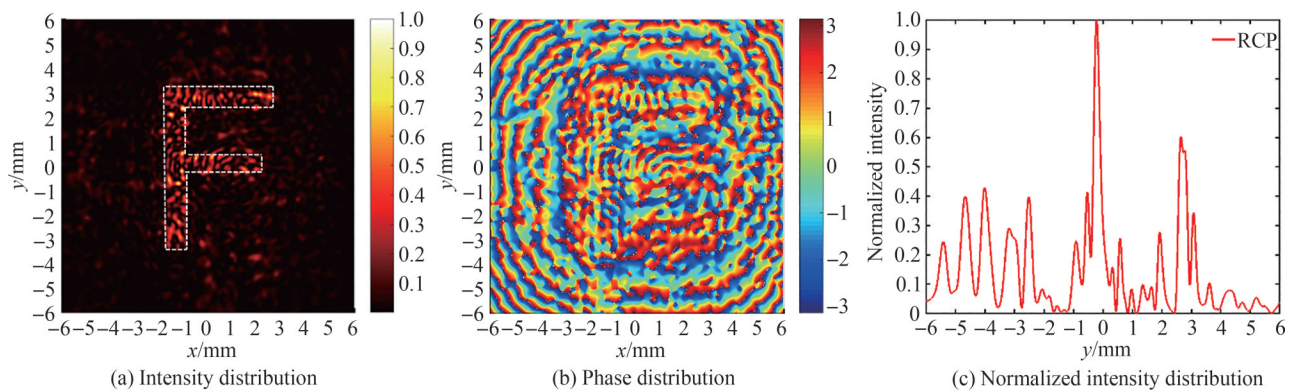


图 12 基于几何相位和传输相位调控设置 RCP 检偏时的强度、相位以及在  $y$  方向  $x=0$  处的归一化强度分布

Fig.12 Intensity and phase and normalized intensity distribution at  $x=0$  in  $y$ -direction under RCP analysis of geometric phase and propagation phase control simultaneously

## 4 结论

基于几何相位调控设计的全硅矩形柱超表面可以有效调控太赫兹波实现全息成像且具有一定的宽带性。在此基础上,基于几何相位和传输相位共同调控设计的全硅矩形柱超表面可以有效地调控太赫兹波在

不同的圆偏振状态下呈现不同的全息像,实现圆偏振复用全息成像。在右旋圆偏振光入射时,设计的超表面可以将右旋圆偏振的入射光转换为左旋圆偏振的透射光,在成像面呈现字母E的全息像;在左旋圆偏振光入射时,相同的超表面可以将左旋圆偏振的入射光转换为右旋圆偏振的透射光,在成像面呈现字母F的全息像。本文提出使用全介质超表面实现全息成像显著地提高了全息像的衍射效率,提出的偏振复用全息成像方法可以将多个信息存储于一个载体,设置不同偏振状态的入射光获得不同的信息。该方法可以将超表面应用于多通道全息成像,在一定程度上提高超表面的利用效率,促进超表面在大量信息存储、偏振光学、全息数据加密等方面的发展。该超表面在光束整形、三维生物成像、光学计算等需要调制相位的领域中具有广阔的应用前景。由于当前实验条件的限制,本文只对基于全介质超表面的太赫兹计算全息成像研究进行了数值仿真,后续将逐步开展实验验证工作。除了本文提出的具有圆偏振复用功能的太赫兹超表面器件外,具有线偏振复用、位置复用、频率复用等功能的超表面器件也陆续出现,在后续的工作中将继续开展相关研究。

### 参考文献

- [1] GABOR D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [2] PI Dapu, LIU Juan, WANG Yongtian. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 231.
- [3] LOHMANN A W, PARIS D P. Binary Fraunhofer holograms, generated by computer[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(10): 1739-1748.
- [4] E Yiwen, ZHANG Liangliang, TCYPKIN A, et al. Broadband THz sources from gases to liquids[J]. *Ultrafast Science*, 2021, 2021: 9892763.
- [5] GEORGES M, ZHAO Yuchen, VANDENRIJT J F. Holography in the invisible. From the thermal infrared to the terahertz waves: outstanding applications and fundamental limits[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(2): 14.
- [6] HE Jingwen, DONG Tao, CHI Baihong, et al. Metasurfaces for terahertz wavefront modulation: a review[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, 41(6): 607-631.
- [7] HE Jingwen, HE Xunjun, DONG Tao, et al. Recent progress and applications of terahertz metamaterials[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2022, 55(12): 123002.
- [8] ULLAH N, ZHAO Ruizhe, HUANG Lingling. Recent advancement in optical metasurface: fundament to application[J]. *Micromachines*, 2022, 13(7): 1025.
- [9] XU Ke, WANG Xinger, FAN Xuhao, et al. Meta-holography: from concept to realization[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2022, 49(10): 220183.  
许可,王星儿,范旭浩,等.超表面全息术:从概念到实现[J].*光电工程*, 2022, 49(10): 220183.
- [10] WANG Bo, QUAN Bangang, HE Jingwei, et al. Wavelength de-multiplexing metasurface hologram [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 35657.
- [11] WANG Qiu, PLUM E, YANG Quanlong, et al. Reflective chiral meta-holography: multiplexing holograms for circularly polarized waves[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 25.
- [12] DONG Bowen, ZHAO Ruizhe, WEI Qunshuo, et al. Terahertz switchable VO<sub>2</sub>-Au hybrid active metasurface holographic encryption[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 20750-20761.
- [13] LIU Wanying, YANG Quanlong, XU Quan, et al. Multifunctional all-dielectric metasurfaces for terahertz multiplexing [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(19): 2100506.
- [14] LEE S H, SHIN S, ROH Y, et al. Label-free brain tissue imaging using large-area terahertz metamaterials[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2020, 170: 112663.
- [15] ABDELAZEEM R M, YOUSSEF D, EI-AZAB J, et al. Three-dimensional visualization of brain tumor progression based accurate segmentation via comparative holographic projection[J]. *Plos One*, 2020, 15(7): e0236835.
- [16] TORNARI V. A symmetry concept and significance of fringe patterns as a direct diagnostic tool in artwork conservation [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(2): 236-257.
- [17] WANG Qiu, ZHANG Xueqian, XU Yuehong, et al. Broadband metasurface holograms: toward complete phase and amplitude engineering[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 32867.
- [18] PAN Meiyuan, FU Yifei, ZHENG Mengjie, et al. Dielectric metalens for miniaturized imaging systems: progress and challenges[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 1-32.
- [19] MUELLER J P B, RUBIN N A, DEVLIN R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [20] KHORASANINEJAD M, CHEN Weiting, DEVLIN R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.

- [21] WANG Zhou, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

## Terahertz Polarization Multiplexing Computer-generated Holography Based on All-dielectric Metasurface

ZHANG Yuming<sup>1,2</sup>, FAN Wenhui<sup>1,2</sup>, WU Qi<sup>1,2</sup>, QIN Chong<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

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

**Abstract:** Compared with using the light interference of two actual beams to obtain holograms, computed holography has the advantages of low noise, simple operation, high repeatability, and holographic reproduction of virtual objects. Meanwhile, computer-generated holography technology is commonly used to reconstruct arbitrary images and is widely used in virtual reality, advertising and anti-counterfeiting systems. Terahertz wave refers to the electromagnetic wave between 0.1 THz~10 THz, between millimeter wave and far infrared wave. The unique spectral position of terahertz waves gives it the advantages of low photon energy, rich spectral information, strong penetration ability, and large bandwidth. Based on the above characteristics, terahertz holographic technology is widely used in biomedical imaging, safety screening, non-destructive testing, and evaluation fields. However, limited by the inherent refractive index of natural materials, traditional propagation and reflective terahertz functional devices are usually composed of High-density Polyethylene (HDPE), Polytetrafluoroethylene (PTFE), Polymethylpentene (TPX), quartz and sapphire, which inevitably leads to their large size, heavy weight and low efficiency, which hinders the development of miniaturization and integration of terahertz systems. Metasurface refers to a two-dimensional array of sub-wavelength artificial unit structures arranged on a plane. It can flexibly adjust the wavefront amplitude, phase, polarization, and orbital angular momentum through ease of integration and manufacturing, with the potential to control electromagnetic waves flexibly. It retains the advantages of electromagnetic regulation of three-dimensional metamaterials, and its preparation difficulty and propagation loss are significantly reduced due to its planar structure characteristics. The design of a suitable metasurface element structure can afford the capability to modulate the optical field flexibly, thereby enabling the realization of diverse functionalities, such as beam focusing, beam diffraction, generation of specialized beams, beam shaping, and holographic image reconstruction.

Based on the above research background, this paper uses the GS algorithm to obtain the optimal solution distribution of the target object's phase. Then it uses the all-silicon rectangular column as the basic unit structure to arrange metasurface-regulated terahertz waves to achieve holographic imaging. This research proposes a new type of meta-atom structure, the all-silicon rectangular column, as the fundamental building block for the terahertz metasurface. This design overcomes the drawbacks of traditional metal-based metasurfaces, such as high ohmic losses and low polarization conversion efficiency, by implementing Mie-type electrical resonance and magnetic resonance or an effective waveguide effect. These phenomena result in the modulation of wavefronts at terahertz frequencies. Different phase regulation methods are used to design metasurfaces to achieve holographic imaging with different functions. Metasurfaces based on geometric phase control can realize holographic imaging and verify that the obtained image has a specific broadband.

On this basis, the rational design of the metasurface element structure realizes a circular-bias multiplexing function based on the simultaneous regulation of the geometric phase and propagation phase. The specific function realized is to obtain holographic images of the letter E when right-handed circularly polarized light is incident light. When left-handed circular polarized light is incident, a hologram of the letter F is obtained. Compared with the holographic diffraction efficiency obtained by using metasurfaces made of metal, the diffraction efficiency of holograms can be effectively improved by using the all-silicon column structure. To a certain extent, this design solves the shortcomings of considerable size, heavy weight and low efficiency of traditional functional devices in the terahertz band and promotes the

development of integrated and multifunctional terahertz technology in the terahertz band. It shows excellent potential for holographic imaging and wavefront regulation applications. The polarization multiplexed holographic imaging proposed in this paper can store multiple pieces of information in one carrier, set the incident light in different polarization states to obtain different information, and present different holograms. The implementation of this approach utilizing the metasurface can result in the enhancement of multi-channel holographic imaging, thereby significantly increasing the utilization efficiency of the metasurface technology. This not only has significant potential in terms of large-scale information storage but also has potential applications in polarized optics and holographic data encryption.

**Key words:** Terahertz waves; Metasurface; Computer-generated holography; Wavefront regulation; Polarization multiplexing

**OCIS Codes:** 090.1760; 300.6495; 160.3918; 110.7348; 060.4230