



DOI: 10.12086/oe.2020.190674

太赫兹超表面计算全息

刘星博, 王 球, 许 全*, 张学迁, 许悦红, 张伟力, 韩家广

天津大学精密仪器与光电子工程学院太赫兹研究中心, 天津 300072

摘要: 全息术是一种三维成像技术, 它已经被应用于多种实际场景。随着计算机科学与技术的迅猛发展, 计算全息由于其方便和灵活的特性, 已经成为一种广泛应用的全息成像方法。本文回顾了我们近期基于超表面的太赫兹计算全息研究进展。其中, 作为全息板的超表面展示出了超越传统光学器件的独特性能。首先, 利用超表面实现了对全息板每个像素的相位振幅同时且独立的调控, 进而实现了高质量全息成像。这种新的电磁波操控能力也带来了新的全息成像效果, 如利用介质超表面实现了全息像沿传播方向上的连续变化。其次, 对超表面在不同偏振态下的响应进行设计, 分别实现了线偏振态与频率复用、圆偏振态复用、以及基于表面波的偏振复用超表面全息术。此外, 本文提出了依赖于温度变化而主动可控的超表面全息术, 为今后计算全息术的设计与实现提供了新的方案, 也推动了超表面在实际应用方面的发展。

关键词: 太赫兹; 计算全息; 超表面; 多路复用

中图分类号: TB877; O438.1

文献标志码: A

引用格式: 刘星博, 王球, 许全, 等. 太赫兹超表面计算全息[J]. 光电工程, 2020, 47(5): 190674

Metasurface-based computer generated holography at terahertz frequencies

Liu Xingbo, Wang Qiu, Xu Quan*, Zhang Xueqian, Xu Yuehong, Zhang Weili, Han Jianguang

Center for THz Waves, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Holography is a kind of technique enabling 3D imaging which has been applied in many practical fields. With the rapid development of computer science and technology, computer generated holography (CGH) has become a common holography design method due to its high convenience and flexibility. Herein, we present a review of our recent progress in metasurface-based terahertz CGH. In these demonstrations, the metasurfaces acting as the holograms have shown the novel capabilities beyond the conventional counterparts. We first present a meta-hologram with simultaneous and independent phase and amplitude control over each pixel, which enables high-quality holographic imaging. Such new characteristic also predicts new holographic imaging performances including holographic images transforming continuously along the propagation direction realized by dielectric metasurface. Then different responses under different incident polarization states are designed. A linear polarization and frequency multiplexed meta-hologram, a reflective circular polarization multiplexed meta-hologram, and a surface-wave-based polarization multiplexed meta-hologram have been achieved respectively. Furthermore, a

收稿日期: 2019-11-05; 收到修改稿日期: 2020-01-09

基金项目: 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金项目(YQ18205)

作者简介: 刘星博(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事超表面全息的研究。E-mail: 2017202011@tju.edu.cn

通信作者: 许全(1990-), 男, 博士, 助理教授, 主要从事太赫兹超表面的研究。E-mail: quanxu@tju.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

thermally dependent dynamic meta-hologram which can change the holographic image actively is also given. The proposed method paves a novel way to the design and realization of CGH functional devices in the future and contributes to the development of metasurfaces towards practical applications.

Keywords: terahertz; computer generated holography; metasurface; multiplexing

Citation: Liu X B, Wang Q, Xu Q, et al. Metasurface-based computer generated holography at terahertz frequencies[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 190674

1 引言

太赫兹(Terahertz, THz, $1 \text{ THz}=10^{12} \text{ Hz}$)波是一种特定波段的电磁辐射,位于电磁波谱中微波与红外波段之间,一般指频率在 $0.1 \text{ THz} \sim 10 \text{ THz}$ 范围^[1],波长在 $0.03 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$ 范围的电磁波。1974年, Fleming 为了描述实验中一个迈克尔逊干涉仪的频段,首次提出了“太赫兹”一词^[2]。由于大气中水蒸气对太赫兹波强烈吸收的问题,以及长期以来缺少有效且便捷的太赫兹源、探测器,以及功能器件,这一频段的相关研究和数据很少,因此太赫兹波段一度被称为“太赫兹空隙(THz gap)”。太赫兹技术的发展对于太赫兹源、探测器,以及功能器件提出了更高的要求。

超材料(Metamaterial)也被称作人工电磁媒质,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。超材料的电磁性质来源于自身单元结构的种类与排列方式。通过结构种类的选取以及在空间结构上的特殊设计,可以突破现有自然界材料的限制,获得不同寻常的材料功能,例如负折射率和零折射率^[3-6]、隐身材料^[7-9]、超分辨成像^[10-11]、电磁诱导透明^[12-13]、拓扑绝缘体^[14-15]等。但是超材料的加工难度比较大,材料损耗也不可忽略,实际应用中存在诸多的问题。后续的研究发现,单层结构的超材料,又被称为超表面(Metasurface),同样具有强大的调控电磁波的能力而且可以较好地解决以上两个问题。目前超表面已经吸引全世界各国科研工作者的强烈兴趣,由于其加工简单、损耗较小,具有良好的波前调制功能,超表面已被用于实现超分辨全息^[16-23]、超薄平面透镜^[24-26]、四分之一波片等功能^[27-28]。

全息术是一种三维成像方法,最初由伽柏(Gabor)于1948年提出^[29]。传统全息术中的全息板通过记录物体散射光和参考光束的相干图样来存储物体散射光波前的振幅和相位信息,当用与之前参考光束完全相同的光再次照明全息板时,它能够重现物体的像,该像也被称为全息像^[30]。随着计算机科学的发展和空间光

调制器(spatial light modulators, SLMs)的发明,计算全息(computer-generated holography, CGH)已经成为目前广泛应用的全息方法^[31]。

尽管空间光调制器拥有大量的像素、高度的调节灵活度和快速调节速度等优异性质,但是其像素尺寸远大于工作波长,这样会引起其他衍射级次的产生,最终导致低下的成像效率以及受限的成像视场角。而由特殊设计的亚波长单元结构构成的超表面可以完美地解决这一问题。因为超表面的工作原理本质上由基本结构单元的电磁谐振与排布方式决定,所以可以用灵活的方式编辑与设计界面处的振幅、相位、偏振分布。超表面已用于实现多种有趣现象,比如光束偏转、透镜、特殊光束产生、表面等离子体耦合等^[25,32-35]。此外,超表面还可以用于实现诸如全息术这样的复杂波前控制。超表面上亚波长的像素大小可以有效地避免空间光调制器的上述问题。利用超表面的独特性质,目前已经被证明可以产生高效^[17,36]、高成像质量^[37]、多功能^[21,38-43]的全息术。

本文将回顾最近在基于超表面的太赫兹计算全息术领域的进展。首先,介绍了C形开口谐振环同时调制太赫兹波的振幅和相位从而提高成像质量的新的全息成像设计方法^[37]。此种方式还可同时还原虚拟像的相位振幅信息,通过对虚拟像的相位振幅信息设计,利用全介质超表面实现了对于全息像的纵向操控^[44]。其次,提出了偏振和频率多路复用的太赫兹计算全息术^[45]以及基于圆偏振光复用的反射式手性全息术^[41]。此外,提出了偏振复用太赫兹表面波计算全息成像^[46]。最后,展示了可以通过温度主动控制的太赫兹超表面动态全息成像^[47]。

2 太赫兹超表面全息

C形开口谐振环是太赫兹超表面设计中常用的单元结构之一,如图1(a)所示。图中:C形谐振环结构, r 是外径, ω 是线宽, 2α 是开口角, θ 是对称轴与 x 轴的夹角,通过合理设计其形状、尺寸可实现 2π 范围的正交偏振调控。2016,首都师范大学张岩教授课题组

以 C 形环为单元结构, 结合模拟退火算法(simulated annealing algorithm)进行超表面全息设计, 实现了在 0.5 THz 和 0.63 THz 处分别实现了字母“C”和“N”的太赫兹全息成像^[48]。C 形环对于入射太赫兹波的电磁响应比较特殊: 出射波振幅与 C 形环的旋转角度有关, 即遵循 $A \propto |\sin 2\theta|$, 其中 A 是出射波振幅, 且当 θ 是 C 形环对称轴与 x 轴的夹角变化时, 出射波振幅可以被连续控制, 而相位保持不变; 而出射波相位相对于入射波的变化量则与 C 形环的几何参数(环的内外径以及环的开口大小)有关。如图 1(b)为振幅 5 阶调制和相位 8 阶调制, 选取了 8 种不同形状的 C 形环, 对于 0.8 THz 的 x 方向线偏振平面波入射, 出射的 y 方向线偏振的太赫兹波分量的相位刚好覆盖 $0 \sim 2\pi$ 的范围, 即可以实现对于波前的高自由度控制。利用上述两个性质, 实现了超表面上每个像素点的相位与振幅同时且独立的操控。

根据光路可逆原理, 假想目标像在全息板上的场分布同时包含振幅和相位信息。遵循计算全息术的设计原理, 计算出超表面全息板所需的振幅和相位分布, 将各个形状的 C 形环以特定角度制作在所对应的位置处, 即可获得最终的全息板。相位振幅同时调控全息术的设计原理如图 1(c)所示。图中 r_0 表示全息板上的一点, r_1 表示目标像上的一点, d 表示目标像平面和全息板平面之间的距离。 r_{01} 表示全息板上的一点 r_0 指向目标像上的一点 r_1 的向量的模。采用瑞利-索墨菲衍射公式(Rayleigh-Sommerfeld diffraction formula)计算

全息板上的某一点的复振幅与目标像的关系^[37]:

$$U(r_0) = \frac{Ad}{i\lambda} \iint_{\Sigma} \frac{\exp(ikr_{01})}{r_{01}^2} ds, \quad (1)$$

其中: $U(r_0)$ 表示全息板上某一点处的复振幅, A 表示目标像的振幅, d 表示目标像平面和全息板平面之间的距离, λ 表示工作波长, k 表示波矢, r_{01} 表示全息板上的一点 r_0 指向目标像上的一点 r_1 的向量的模, ds 表示目标像上的一个面元。对于逆过程, 则全息像上的某一点的复振幅与全息板的关系:

$$U'(r_1) = \iint_{\Sigma} U(r_0) \frac{d \exp(-ikr_{01})}{i\lambda r_{01}^2} ds, \quad (2)$$

其中 $U'(r_1)$ 表示全息像上某一点处的复振幅。

从式(1)和式(2)中可以看出, 它们表达的作用都属于线性变换, 并且互为逆变换, 这也表示着光路的可逆性。瑞利-索墨菲衍射公式又被称为平面屏幕衍射公式, 适用于描述近场衍射过程, 非常契合我们的应用场景(工作频率 0.8 THz, 成像距离 6 mm)。这与可见光波段通常采用的菲涅尔衍射公式或夫琅禾费衍射公式并不相同。应当指出的是, 由于对不同衍射场景所关心的方面不同, 在不同的近似条件下才有了对应的不同的衍射公式; 上述衍射公式本质上也都是基于标量衍射理论推导得到的, 也只是近似地描述了相应的衍射过程, 本身并不完全准确, 事实上, 用一个线性变换来描述衍射过程就已经简化了很多因素, 但是在我们的研究范围内是可行的。上述 C 形环构成的超表面充当着全息板的角色。目标像是“TJU”, 模拟结果中全息板重建的像非常接近于目标像。

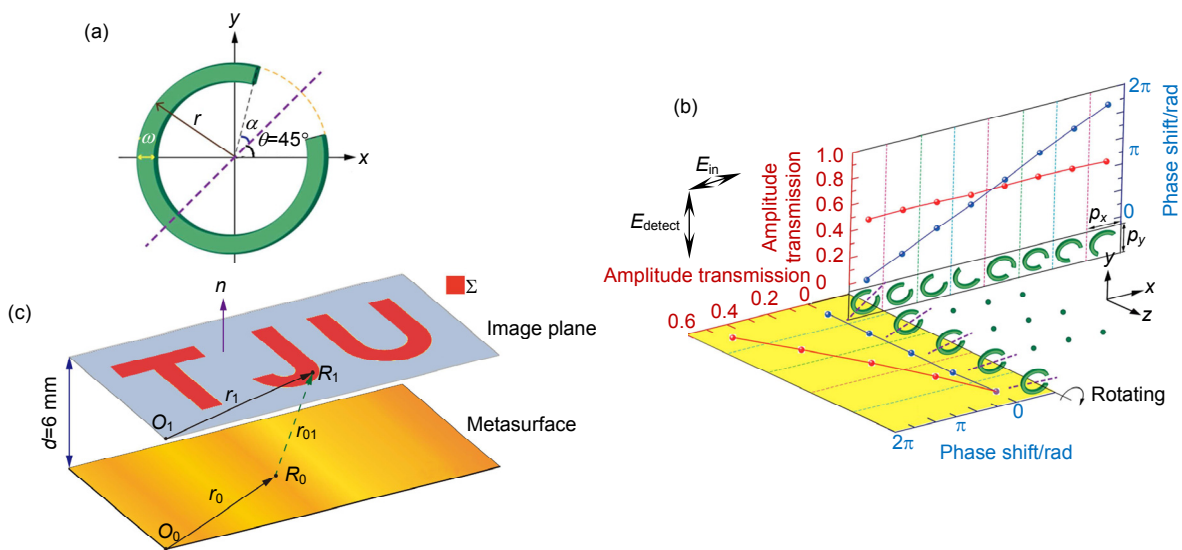


图 1 C 形谐振环结构单元和成像原理^[37]

Fig. 1 Basic functional units and the design of hologram^[37]

利用 C 形环,可以有效地调制入射太赫兹波的振幅和相位,实现该波段下的同时调制振幅和相位的计算全息成像。这种全息成像的效果明显优于只调制相位方式的成像效果。相位振幅同时调控的方法也可以同时还原目标像的相位振幅信息。而由于人眼以及探测器直接观测得到的信息均为强度信息,通常在设计中由于目的或其他技术上的限制,相位信息往往被忽略。在此,通过对目标像的相位与振幅分布的同时设计,得到了目标像在传播方向上的连续控制。此工作中,不同于金属谐振器超表面,采用了更高效的全介质超表面作为全息板。在硅片上刻蚀出设计好的长方体柱子可以制成全硅介质的全息板,其单元结构如图 2(a)所示。图中 a, b, h 分别表示长方体柱子的宽,长和高, P 表示单元结构的周期尺寸。

在图 2(c), 2(d)中,图 2(b)为长方体柱子以慢轴为轴心进行旋转, θ 为慢轴与 x 轴的夹角。图 2(c)为振幅调制和相位调制的仿真结果,1 THz 的 x 方向线偏振太赫兹波入射,对出射太赫兹波探测 y 方向的结果。图 2(d)为对第一种形状的长方体柱子进行仿真得到振幅、相位与 θ 的关系。可以看出,与 C 形环对太赫兹波的调制效果类似,出射太赫兹波的 y 方向分量与 x 方向偏振的入射太赫兹波之间的相位变化量与柱子的形状相关,而振幅变化量与柱子的摆放方向 θ 相关。于是,先计算出全息板每一像素位置的相对复振幅,然后合理地安排每一像素位置上的柱子的形状和方向。这样就可以获得同时调制入射太赫兹波振幅和相

位的全硅介质全息板。这里,设计的全硅介质超表面的工作频率为 1 THz。全硅介质超表面比上述金属超表面的能量损失更少,效率更高。

这里,提出的另一个亮点在于全息板所成的全息像会随着成像距离而发生形变,这种形变包括:平移、缩放、旋转。图 3 展示了全息像随着成像距离的变化而发生平移的效果,图 3(a), 3(b) 6 mm 处全息像的振幅和相位分布。图 3(c), 3(d)设计好的全息板的振幅和相位分布。图 3(e)全息板的扫描电子显微镜照片。图 3(f), 3(g)仿真和实验的 1 THz 处 x 方向偏振的入射太赫兹波激发全息板产生的 y 方向探测结果。从中可以看出“T”字母的上下两部分随着成像距离的由近及远分别朝着相反的方向做平移运动。这样的平移效果的产生本质上来源于对目标像的相位振幅同时编辑,而这又是通过全息板的相位振幅同时调控能力得以实现的。目标像的相位振幅分布设计:

$$E(x, y) = \begin{cases} \exp(ik_1x), & x \in [-2, 2], y \in [1.5, 2.5] \\ \exp(-ik_1x), & x \in [-0.5, 0.5], y \in [-2.5, 1.5) \text{ (mm)} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $E(x, y)$ 表示目标像的复振幅, x, y 分别表示目标像的横纵维度, $k_1=2\pi/\text{mm}$ 。式中可以看出,“T”字母的上下两部分的相位分别与成像距离 x 存在线性关系。这意味着,全息板对入射波前除了具有成像所包含的调制作用外,还具有这种对相位面的线性调制作用,这种距离上的线性调制作用使得全息像随着距离

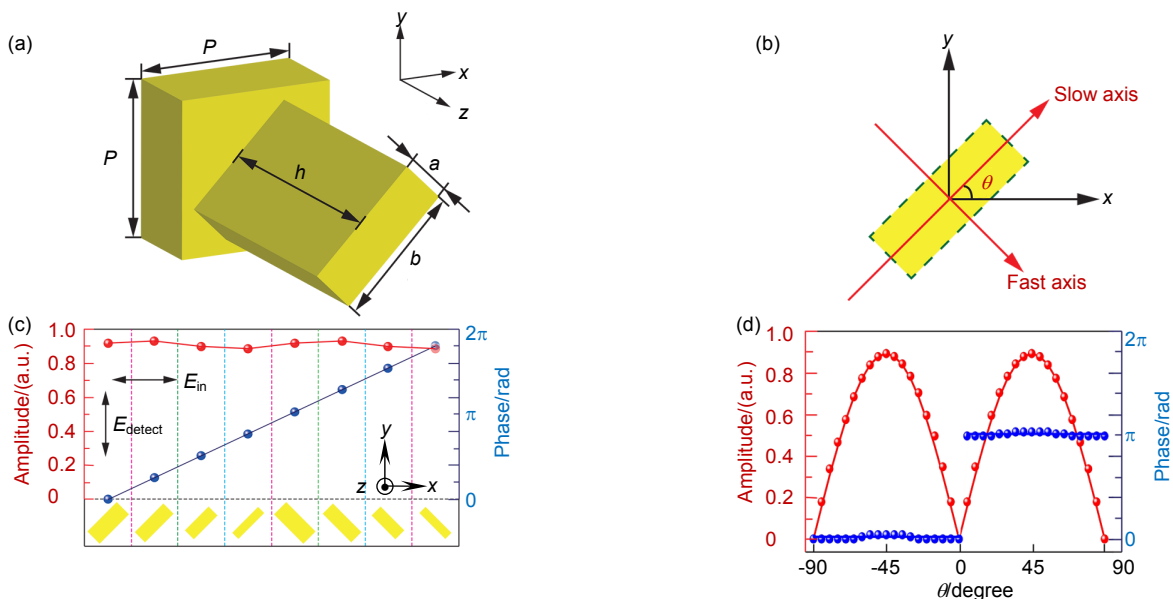


图 2 全介质单元结构和振幅相位调制原理^[44]
Fig. 2 Illustration of the basic functional unit cells^[44]

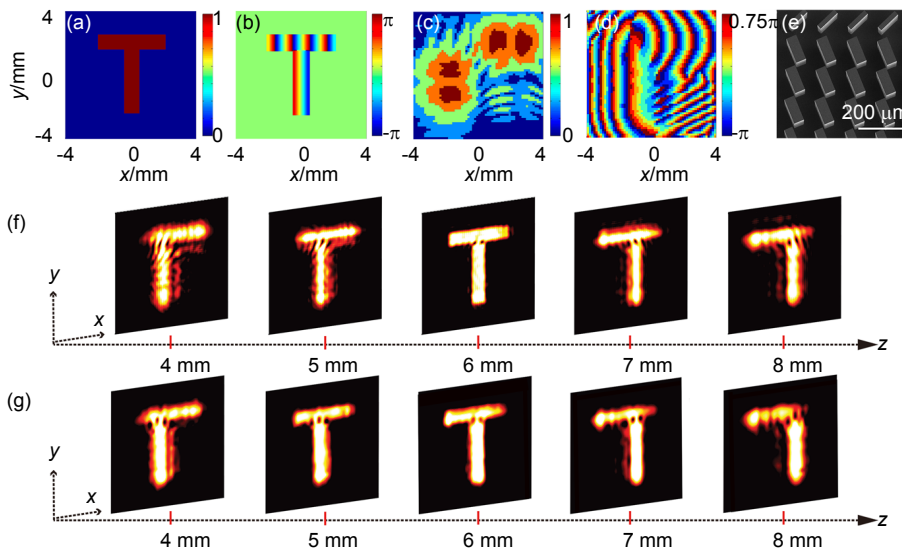


图3 含有平移效果的全息板和对应的全息像^[44]

Fig. 3 Illustration of the meta-hologram with controlled shifting along the z-axis^[44]

变化发生平移。放缩和旋转与之类似。如此一来，单块全息板就可以在不同成像距离上显示出更多的像。这为复用全息板提供了一种简单有效的实现方式，可以轻易地提高单块全息板的使用效率。

如果C形环的对称轴与入射线偏振太赫兹波的振动方向平行，即 $\theta=0$ ，则出射波的振幅为0。利用这一性质通过精巧的设计可以实现超表面对不同入射光偏振态的开关特性，从而设计出偏振复用的全息板。如图4所示，图中 r ， ω ， β ， 2θ 分别表示谐振环的外径，线宽，朝向与 x 轴的夹角以及开口角。在偏振复用的同时，该全息板还做到了频率复用。单元1和单元4结构相同，工作在0.6 THz，但是朝向相差了 45° ；单元2和单元3与之类似，但是它们工作在0.8 THz。由于单元1和单元4的朝向相差 45° ，单元2和单元3

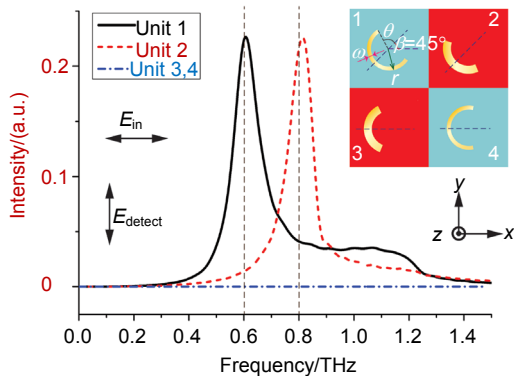


图4 偏振和频率复用全息板的单元结构与仿真出射波强度分布^[45]

Fig. 4 Illustration of the four basic functional subpixels and their simulated electric field responses^[45]

的朝向相差 45° ，所以使单元1和单元2工作的入射线偏振光可以让单元3和单元4不工作，反之亦然。四种单元结构呈棋盘状分布在全息板上。这就是全息板的偏振复用原理。而它的频率复用原理在于单元1和单元4工作在0.6 THz，在该频率下，它们的透过率很高，而在0.8 THz频率下，它们的透过率很低，而单元2和单元3的情况正好与它们相反，因此该全息板又可以实现频率复用。即四种单元分别在四个不同通道下工作，且不同通道之间串扰很小。

偏振与频率复用的全息成像设计如图5所示。图5(a)单元1或单元2工作，单元3和单元4不工作，在0.6 THz和0.8 THz成像分别为字母“C”和“F”。由于单元3和单元4的对称轴与入射波偏振方向平行，所以此状态下它们对应的透过率振幅为0。若入射波的频率是0.6 THz，则只有单元1工作，成像为字母“C”；若入射波的频率为0.8 THz，则只有单元2工作，成像为字母“F”。图5(b)中的情况类似，单元4或单元3工作，单元1和单元2不工作，在0.6 THz和0.8 THz成像分别为字母“T”和“W”。此时在两个频率处分别成像“T”和“W”。需要指出的是，实验中入射波的偏振方向没有变，而把全息板顺时针旋转了 45° ，正如图中所展示的那样。这块全息板的设计也是同时调控每一个像素的振幅和相位。但是，如图4所示，振幅的调控仅限于0和1，因为一种C形环在一个频率处只能表现为透射或近似不透射；而相位的调控仅限于0和 π ，因为一种C形环朝向的选取只能是 45° 或 -45° 。这样的限制意味着其成像效果没

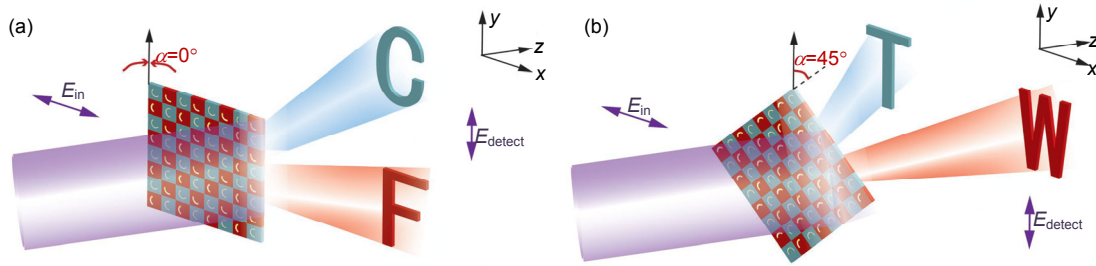


图 5 全息板在不同偏振入射和不同频率的情况下成像^[45]

Fig. 5 Schematic illustration of the polarization and frequency selective meta-hologram's functionality^[45]

有上述 8 阶相位调制和 5 阶振幅调制的全息成像的效果好,但这也是为了实现偏振和频率复用所做的牺牲,尽管如此,可以清晰地分辨出“C”,“F”,“T”,“W”四个字母像。

除了基于线偏振态复用的全息板之外,还设计了基于圆偏振态复用的全息板。如图 6 所示,图 6(a)在左旋圆偏振光入射时,探测反射电磁波中左旋圆偏振光分量,成像为字母“L”。图 6(b)在右旋圆偏振光入射时,探测反射电磁波中右旋圆偏振光分量,成像为字母“R”。该全息板上分布着两种不同的双开口环结构,即 L 型(L-type)和 R 型(R-type),它们分别只对左旋圆偏振光(left-handed circular polarization, LCP)或右旋圆偏振光(right-handed circular polarization, RCP)响应。利用几何相位,简单地旋转该结构便可调制对应圆偏振光的相位。两种单元结构呈棋盘状分布在全息板上。

该全息板与以上全息板不同之处在于,它只对入射太赫兹波的相位有调制作用,而不是对振幅和相位同时调制。所以应该引入 GS 算法(Gerchberg-Saxton algorithm)^[49]计算这块全息板。该算法于 1972 年提出,最初用于解决传统全息板只能调制振幅或只能调制相位造成的成像质量不佳的问题。但是最原始的 GS 算法中的线性变换核是傅里叶变换,这是因为传统的全息成像应用于远场情况,其对应的合适的线性变换是

傅里叶变换。正如前面提到的那样,近场的线性变换应该是瑞利-索墨菲公式。由于瑞利-索墨菲公式和傅里叶变换本质上都是线性变换,所以将 GS 算法的线性变换核由傅里叶变换直接替换成瑞利-索墨菲公式是合理的,并不影响 GS 算法的外层框架。这就是我们提出的适合近场全息成像的改进型 GS 算法。最终良好的成像结果也佐证了我们的思路,同时观察到了傅里叶变换和瑞利-索墨菲公式在数学上的一致性即直接替换线性变换核的想法是可行的。

计算全息术不仅可以应用于空间光的成像,也可以应用于表面波的全息成像。如图 7 所示,图 7(a)~7(c)为表面波全息板设计,其中(a),(b)为全息板生成,其中(b),(c)为目标像重现。围绕一圈的金属缝对扮演着全息板像素的角色。这种全息成像比较特殊,全息板和全息像位于同一平面上。其原理为

$$E_M = \frac{i\sqrt{2}/2C\text{sign}(l)e^{ik_{sp}l}|e^{i\sigma(\theta_1+\theta_2+\pi/2)}\sin(\theta_1-\theta_2)\hat{a}}{\sqrt{|l|}}, \quad (4)$$

其中: C 为入射圆偏振光转换为表面波的效率, $E_{in} = \sqrt{2}/2(l, i\sigma), \sigma \in \{+, -\}$ 代表 LCP 或 RCP; k_{sp} 表示表面波的波矢。 $\hat{a} = [-ik_z, 0, k_{sp}\text{sign}(l)] / \sqrt{|k_z|^2 + |k_{sp}|^2}$, 其中, $k_z = \sqrt{k_0^2 - k_{sp}^2}$, k_0 为真空中的波矢。

每对缝可激发出表面波,一圈波源激发的表面波在该平面上干涉叠加,可以实现成像。而平面上某一点的复振幅与一对缝摆放角度 θ_1, θ_2 的关系可以从式

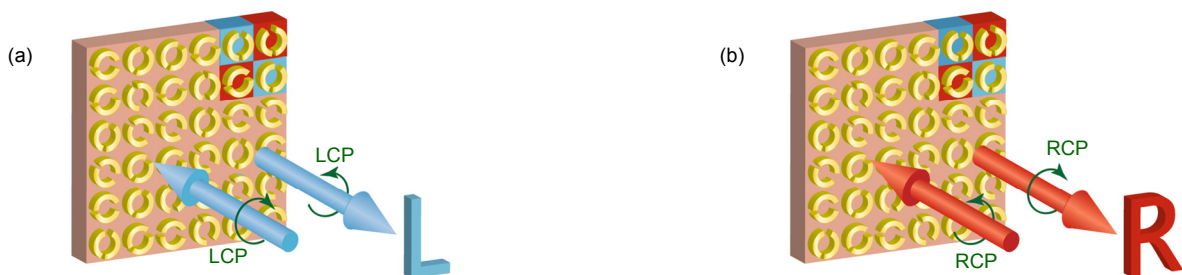


图 6 反射式手性圆偏振复用全息成像^[41]

Fig. 6 Reflective chiral meta-holography^[41]

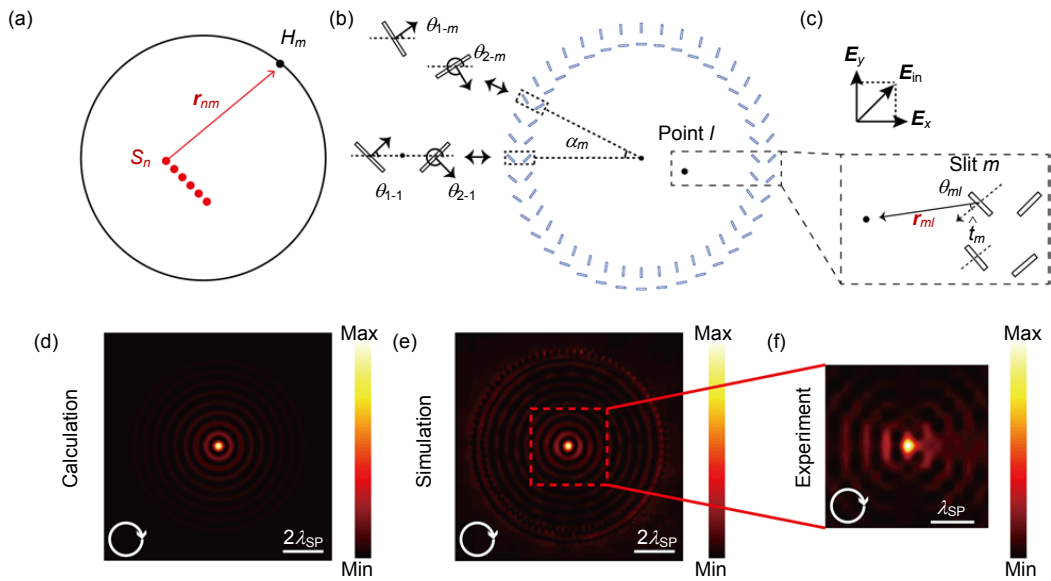


图 7 表面波全息板设计与点全息像呈现^[46]

Fig. 7 Surface plasmon hologram designing scheme and holographic results of an exemplary single-point profile^[46]

(4)中得出。于是，我们就可以合理地调整每对缝的摆放角度从而控制空间中的电磁场分布。图 7(d)~7(f)左旋圆偏振光入射时的计算、仿真、实验的表面波强度图像，展示了使用这一方法在平面中心成一个点的全息像的效果。全息板被圆偏振态的入射太赫兹波激发，缝对产生一系列特定复振幅的表面波，这些表面波在平面上干涉叠加，最终形成了一个点的全息像。不仅如此，缝对产生的表面波的初始相位还与入射波的偏振方向相关，基于此，可以设计出偏振态复用的全息成像。如图 8 所示，图 8(a)，8(c)，8(e)为左旋圆偏振光入射时的计算、仿真、实验的表面波强度图像，成像为字母“V”。图 8(b)，8(d)，8(f)为右旋圆偏振光入射时的计算、仿真、实验的表面波强度图像，成像为字母“N”。

用相反旋向的圆偏振光分别激发一块偏振依赖的全息板可以获得不同的像。除了圆偏振光复用的表面波全息成像，我们还设计了基于线偏振光复用的表面波全息成像。如图 9 所示，图 9(a)~9(i)为 90° ， 45° ， 0° 的线偏振光入射时的计算、仿真、实验的表面波全息强度图像。 y 方向线偏振光对应一个三角形，而 x 方向线偏振光对应字母“V”，图中展示出了全息像从三角形到字母“V”的转变效果。

以上的全息板中有很多多路复用的设计，但是每一块全息板一旦制作好，所成的像大多依赖于入射波的性质，诸如频率、偏振等，并不涉及主动控制方式。近期，首都师范大学张岩教授课题组利用空间光调制

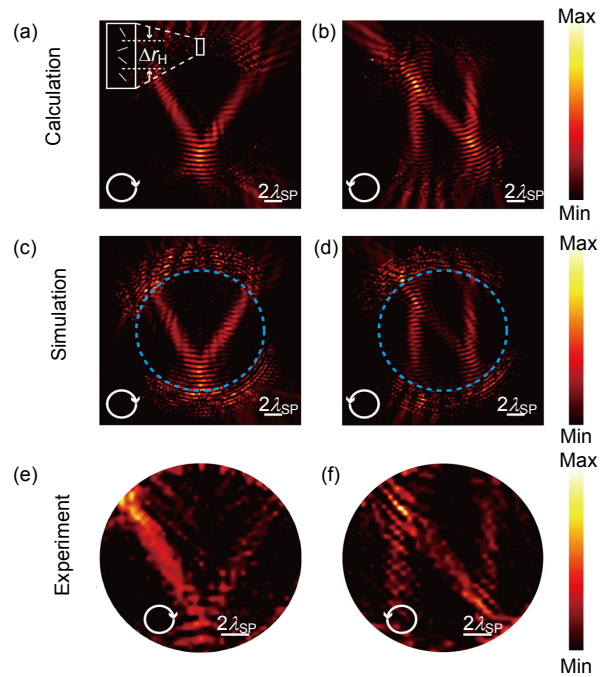


图 8 圆偏振光表面波全息成像^[46]

Fig. 8 Spin-switchable surface plasmon holography^[46]

器将飞秒激光整形并入射到具有薄硅层的基片上，硅层由入射泵浦光激励出光生载流子可等效为几何相位超表面，从而实现了动态可控的太赫兹全息成像^[50]。沿着另一个思路，我们基于二氧化钒设计了一种随着外界温度的变化可以成不同全息像的全息板，实现了一种主动控制的动态超表面全息成像。该全息板工作在 0.8 THz，单元结构总体分为两种，一种由金属和二

氧化钒构成；另一种则只含有金属，基底都为蓝宝石，如图 10(a)所示。其中黄色部分表示金属谐振环，红色部分表示二氧化钒，蓝色部分表示蓝宝石基底。二氧化钒是一种相变材料，当温度低于相变温度时，表现为介质状态，而当温度高于相变温度时，则表现为金属状态。实验中测得的相变温度约为 $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，高于这一温度时，图 10(a)中所示的 C 形谐振环被二氧化钒短接，近似成为一个金属圆环，此时透射波的振幅为 0。

图 10(b), 10(c)为单元结构在不同温度下的仿真透

射振幅和相位谱。从图 10(b), 10(c)中可以看出，对于同一单元结构，当 x 方向偏振的太赫兹波入射时，随着温度的升高，出射太赫兹波的 y 分量的振幅逐渐降低，而相位则基本不因温度的升高而改变。其中，不含有二氧化钒的单元结构作为参考，透过它的太赫兹波的 y 方向偏振分量的振幅是最大的。所以含有二氧化钒的结构可以随着温度的变化主动调节对入射波振幅的调制强度，从而具有类似开关特性。我们一共选择了两种形状的 C 形开口谐振环，把它们各自沿着 x

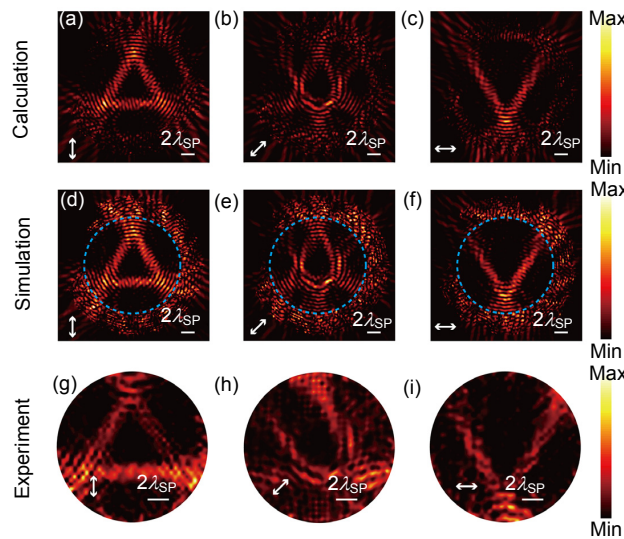


图 9 线偏振光表面波全息成像^[46]

Fig. 9 Linear polarization switchable surface plasmon holography^[46]

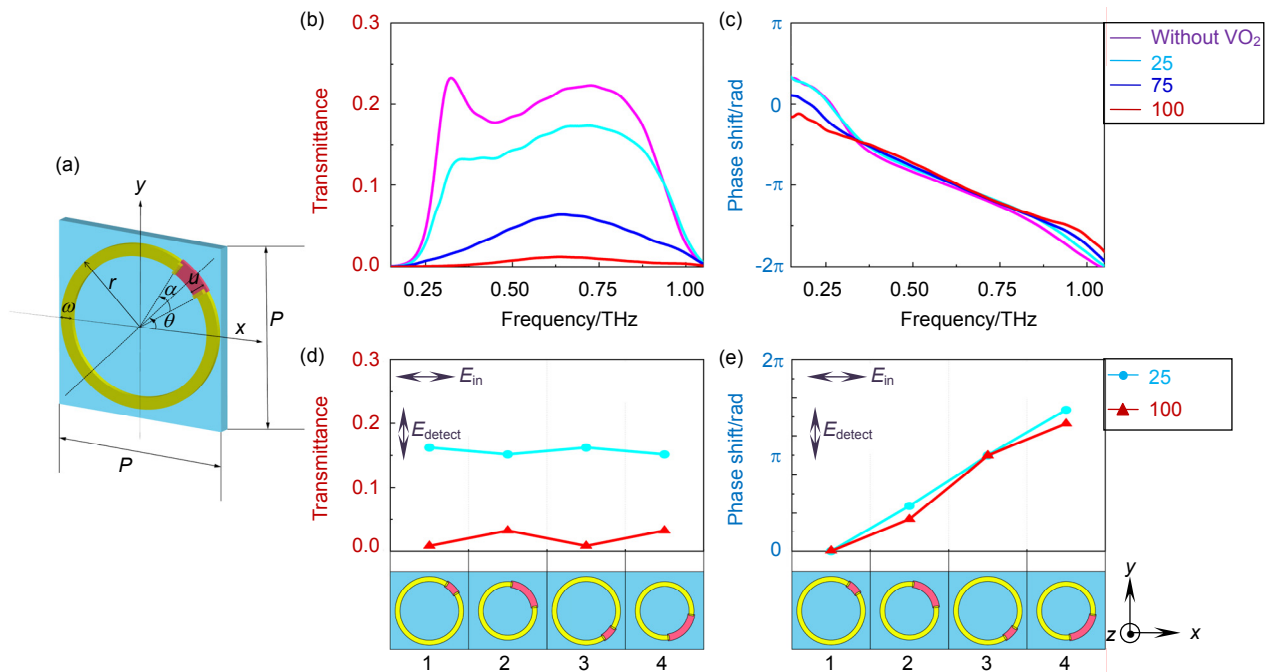


图 10 温度主动可控全息板的单元结构及其透射响应^[47]

Fig. 10 Schematic of the metasurface unit cells and their transmission responses^[47]

轴做对称变换,得到四种不同的基本结构单元,它们对入射太赫兹波的调制作用随温度的变换规律都符合以上描述。图 10(d),10(e)为含有二氧化钒的一套像素在低温和高温时的透射振幅和相位分布。由它们组成的一套像素可以保持在相同温度下对入射太赫兹波的透射率基本持平,而各自在低温和高温下对入射太赫兹波的透射率有显著变化,并且相位调制可以覆盖 $0 \sim 2\pi$ 的范围。

如图 11 所示,图 11(a)为全息板的一部分。图 11(b),11(c)为不含二氧化钒的像素与含有二氧化钒的像素。图 11(d),11(e)为不含二氧化钒的像素产生的振幅和相位分布。图 11(f),11(g)为含有二氧化钒的像素产生的振幅和相位分布。图 11(h),11(i)为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时仿真的全息像。整体的全息板设计依然遵循棋盘状分布,含有和不含有二氧化钒的单元结构交替摆放。其中,给不含二氧化钒的单元结构设计的目标像是字母“G”,给含有二氧化钒的单元结构设计的目标像是“H”-“G”。这里的两个字母“G”,它们具有相同振幅分布,但是后者每一个像素的相位都与前者的相位相差 π 。于是,在低温($25\text{ }^\circ\text{C}$)时两种像素同时发挥作用,两个字母“G”相互抵消,最终的全息像为字母“H”;而在高温($100\text{ }^\circ\text{C}$)时,含有二氧化钒的单元结构对入射太赫兹波的透射振幅为 0,此时只有不含二氧化钒的单元结构起作用,所以全息像为字母“G”,即实现了不同温度下两种可独立设计的全息像的主动切换。

3 总结

利用超表面的小型性与灵活性的优点,我们设计并通过实验验证了多种传统计算全息术无法实现的新类型全息成像效果,如基于相位振幅同时调控的全息术、

偏振复用全息成像、频率复用全息成像,表面波全息成像、以及基于温控的动态全息成像等。其中,相位振幅同时调控方法为计算全息术的设计提供了新的方案;多路复用技术对于全息术在信息存储中的应用增添了新的可能性;表面波全息成像展现了全息术的新形式;基于温控的动态全息成像则为超表面全息术向可主动连续调控的动态全息术方向发展做出了阶段性的贡献。如何提高调制能力以及响应速度将会是接下来超表面领域的最重要挑战之一,这对于基于超表面的全息术的实际应用将具有重大意义。

参考文献

- [1] Mittleman D. *Sensing with Terahertz Radiation*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 117-153.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 910-928.
- [3] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(18): 3966-3969.
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77-79.
- [5] Zhang S, Park Y S, Li J S, et al. Negative refractive index in chiral metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2009, **102**(2): 023901.
- [6] Silveirinha M, Engheta N. Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(15): 157403.
- [7] Ergin T, Stenger N, Brenner P, et al. Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths[J]. *Science*, 2010, **328**(5976): 337-339.
- [8] Liang D C, Gu J Q, Han J G, et al. Robust large dimension terahertz cloaking[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(7): 916-921.
- [9] Valentine J, Li J, Zentgraf T, et al. An optical cloak made of dielectrics[J]. *Nature Materials*, 2009, **8**(7): 568-571.
- [10] Liu Z W, Lee H, Xiong Y, et al. Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects[J]. *Science*, 2007, **315**(5819): 1686.
- [11] Casse B D F, Lu W T, Huang Y J, et al. Super-resolution imaging using a three-dimensional metamaterials nanolens[J]. *Applied*

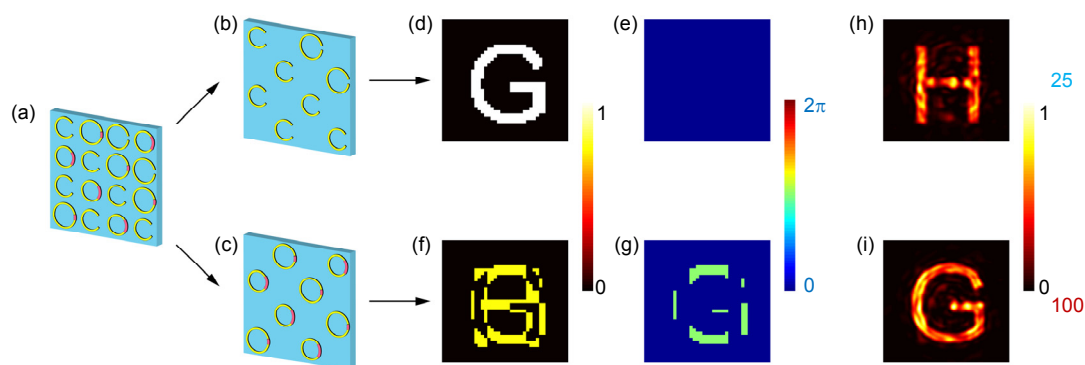


图 11 主动可控全息板设计^[47]

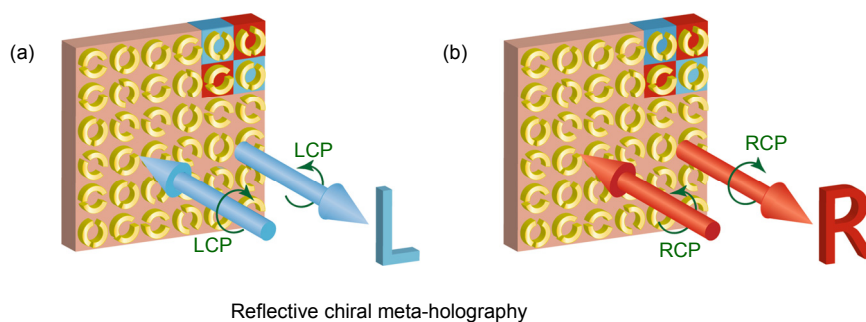
Fig. 11 Design mechanism of the proposed thermal dynamic meta-hologram^[47]

- Physics Letters*, 2010, **96**(2): 023114.
- [12] Safavi-Naeini A H, Alegre T P M, Chan J, *et al.* Electromagnetically induced transparency and slow light with optomechanics[J]. *Nature*, 2011, **472**(7341): 69–73.
- [13] Gu J Q, Singh R, Liu X J, *et al.* Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 1151.
- [14] Chen Y L, Analytis J G, Chu J H, *et al.* Experimental realization of a three-dimensional topological insulator, Bi₂Te₃[J]. *Science*, 2009, **325**(5937): 178–181.
- [15] Chang C Z, Zhang J S, Feng X, *et al.* Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator[J]. *Science*, 2013, **340**(6129): 167–170.
- [16] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2807.
- [17] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, *et al.* Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(4): 308–312.
- [18] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, *et al.* Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2808.
- [19] Zheng J, Ye Z C, Sun N L, *et al.* Highly anisotropic metasurface: a polarized beam splitter and hologram[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 6491.
- [20] Genevet P, Capasso F. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2015, **78**(2): 024401.
- [21] Chen W T, Yang K Y, Wang C M, *et al.* High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(1): 225–230.
- [22] Huang Y W, Chen W T, Tsai W Y, *et al.* Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram[J]. *Nano Letters*, 2015, **15**(5): 3122–3127.
- [23] Yifat Y, Eitan M, Iluz Z, *et al.* Highly efficient and broadband wide-angle holography using patch-dipole nanoantenna reflectarrays[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(5): 2485–2490.
- [24] Aieta F, Genevet P, Kats M A, *et al.* Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(9): 4932–4936.
- [25] Chen X Z, Huang L L, Mühlenbernd H, *et al.* Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 1198.
- [26] Wang Q, Zhang X Q, Xu Y H, *et al.* A broadband metasurface - based terahertz flat - lens array[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(6): 779–785.
- [27] Cong L Q, Xu N N, Gu J Q, *et al.* Highly flexible broadband terahertz metamaterial quarter - wave plate[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, **8**(4): 626–632.
- [28] Yu N F, Aieta F, Genevet P, *et al.* A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(12): 6328–6333.
- [29] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, **161**(4098): 777–778.
- [30] Leith E N, Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, **52**(10): 1123–1130.
- [31] Lohmann A W, Paris D P. Binary fraunhofer holograms, generated by computer[J]. *Applied Optics*, 1967, **6**(10): 1739–1748.
- [32] Zhang X Q, Tian Z, Yue W S, *et al.* Broadband terahertz wave deflection based on C - shape complex metamaterials with phase discontinuities[J]. *Advanced Materials*, 2013, **25**(33): 4567–4572.
- [33] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, *et al.* Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(11): 937–943.
- [34] Zhang H F, Zhang X Q, Xu Q, *et al.* High - efficiency dielectric metasurfaces for polarization-dependent terahertz wavefront manipulation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, **6**(1): 1700773.
- [35] Xu Q, Zhang X Q, Wei M Q, *et al.* Efficient metacoupler for complex surface plasmon launching[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, **6**(5): 1701117.
- [36] Devlin R C, Khorasaninejad M, Chen W T, *et al.* Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(38): 10473–10478.
- [37] Wang Q, Zhang X Q, Xu Y H, *et al.* Broadband metasurface holograms: toward complete phase and amplitude engineering[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 32867.
- [38] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, *et al.* Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. *Nano Letters*, 2018, **18**(5): 2885–2892.
- [39] 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.
- [40] Wen D D, Yue F Y, Li G X, *et al.* Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 8241.
- [41] Wang Q, Plum E, Yang Q L, *et al.* Reflective chiral meta-holography: multiplexing holograms for circularly polarized waves[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, **7**(1): 25.
- [42] Ye W M, Zeuner F, Li X, *et al.* Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 11930.
- [43] Almeida E, Bitton O, Prior Y. Nonlinear metamaterials for holography[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 12533.
- [44] Wang Q, Xu Q, Zhang X Q, *et al.* All-dielectric meta-holograms with holographic images transforming longitudinally[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(2): 599–606.
- [45] Wang Q, Zhang X Q, Plum E, *et al.* Polarization and frequency multiplexed terahertz meta - holography[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, **5**(14): 1700277.
- [46] Xu Q, Zhang X Q, Xu Y H, *et al.* Polarization - controlled surface plasmon holography[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, **11**(1): 1600212.
- [47] Liu X B, Wang Q, Zhang X Q, *et al.* Thermally dependent dynamic meta - holography using a vanadium dioxide integrated metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**(12): 1900175.
- [48] Wang B, Quan B G, He J W, *et al.* Wavelength de-multiplexing metasurface hologram[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 35657.
- [49] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237–246.
- [50] Guo J Y, Wang T, Zhao H, *et al.* Reconfigurable terahertz metasurface pure phase holograms[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**(10): 1801696.

Metasurface-based computer generated holography at terahertz frequencies

Liu Xingbo, Wang Qiu, Xu Quan*, Zhang Xueqian, Xu Yuehong, Zhang Weili, Han Jianguang

Center for THz Waves, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China



Overview: We review our recent progress in metasurface-based terahertz computer generated holography in which metasurfaces act as the holograms and show novel advantages.

To get better quality of holographic image, the unit should modulate both amplitude and phase of incidence rather than just one of them. Based on the different resonance modes caused by parallel polarization incidence and perpendicular polarization incidence, a series of different C-shape split-ring resonators (CSRRs) are designed which have different modulating effects with each other in y -polarized transmittance and phase shift spectra under x -polarized normal incidence.

Although a fine hologram can be composed by CSRRs, its energy efficiency is low. To solve this problem, we resort to the all-dielectric metasurface. Its units are silicon pillar resonators which not only own the high energy efficiency but also can modulate both amplitude and phase of incidence like CSRRs.

To improve utilization efficiency of holograms, the multiplexed metasurface is one of the ideal solutions. The multiplexed holograms can increase information capacity of imaging system and make it more simplified. For these reasons, some multiplexed meta-holograms emerged in our works.

Firstly, a meta-hologram which is a linear polarization and frequency multiplexed one is designed. On the hologram, two sets of CSRRs which work at different frequencies are arranged and a pattern like checkerboard formed. Due to special design some CSRRs do not work when others do. Based on CSRRs working at different frequencies and the special arrangement, the linear polarization and frequency multiplexed hologram is achieved.

Secondly, a circular polarization multiplexed hologram is realized. There are two types of units on it which are L-type DSRRs (double-split ring resonators) and R-type DSRRs respectively and they response to the left-handed or right-handed circular polarization only. Based on the Pancharatnam-Berry phase and a modified Gerchberg-Saxton algorithm, the hologram shows different holographic images under left-handed and right-handed circular polarization incidence, respectively.

Thirdly, a surface plasmon holography which is polarization multiplexed is also achieved. On these holograms, slit-pair resonators act as the pixels. The holographic images are composed by a series of surface plasmon which excited by different pixels. The initial phase of surface plasmon from pixels is depended on the origin of the slit-pair resonator and the polarization of incidence.

Finally, a thermally dependent active control meta-hologram is also designed and demonstrated in experiment. There are two sets of units on it which are passive units and active units. They are CSRRs and V-CSRRs (vanadium dioxide integrated CSRRs) which are CSRRs contained vanadium dioxide in their gaps. Based on the phase transition effect of vanadium dioxide and reasonable arrangement of passive and active units and destructive interference images showed by them, the hologram shows different holographic images in low and high temperatures, respectively.

Citation: Liu X B, Wang Q, Xu Q, *et al.* Metasurface-based computer generated holography at terahertz frequencies[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 190674

Supported by Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments (YQ18205)

* E-mail: quanxu@tju.edu.cn