

基于钙钛矿材料的太赫兹频率可调编码超表面研究

李依凡^{1,2*}, 杨贺¹, 杨睿¹, 贾一鸣¹, 胡家敏¹, 娄存广¹,
于宇³, 刘秀玲¹, 姚建铨²

1. 河北大学 电子信息工程学院 河北省数字医疗工程重点实验室, 河北 保定 071000;
2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所, 天津 300072;
3. 河北工业大学 电子信息工程学院, 天津 300131)

摘要: 太赫兹波因其低能性、高透过性、抗干扰能力强、指纹性等独特特性,在探测、成像、雷达、军事防御等领域发挥着至关重要的作用,近年来得到了国内外学者的高度重视。但高成本和高损耗仍然是制约太赫兹调控发展的重要因素。钙钛矿材料具有优异的光电学特性,且制备工艺简单,可大批量生产,成为制备太赫兹探测器最有潜力的材料之一。此外,钙钛矿易于调节的特性弥补了超表面难以调节的缺陷,满足了可调谐超表面的需求。将这两者结合起来,可以在光场下有效地调控太赫兹。本文设计了两种编码超表面,由有机-无机杂化钙钛矿 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 、聚酰亚胺和铝组成,并通过光场控制分别改变两种结构的工作频率,将结果与理论计算进行对比验证其效果。第一种结构可以通过光场调控,在宽带工作频率和高效工作效率之间选取。第二种结构仅工作在 0.1 THz,可以通过光改变相位,使得原有结构相位出现反转,从而控制波束反射方向。在此基础上我们制备了器件并进行了验证。本文一定程度上填补了编码超表面在光场调控领域下的空白,为后续研究提供了一种思路。

关键词: 太赫兹; 钙钛矿; 编码超表面; 光场调控

中图分类号: TN214

文献标识码: A

Research of terahertz frequency tunable coding metasurface based on perovskite materials

LI Yi-Fan^{1,2*}, YANG He¹, YANG Rui¹, JIA Yi-Ming¹, HU Jia-Min¹, LOU Cun-Guang¹, YU Yu³,
LIU Xiu-Ling¹, YAO Jian-Quan²

1. College of Electronic and Information Engineering, Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Hebei University, Baoding 071000, China;
2. Institute of Laser and Optoelectronics, School of Precision Instruments and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. College of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

Abstract: Due to its distinctive traits such as low energy consumption, high transmittance, potent anti-interference capacity, fingerprint, THz flexible regulation assumes a crucial role in detection, imaging, radar, and military defense, and has garnered significant attention from scholars both domestically and internationally in recent years. Nevertheless, high costs and losses remain significant factors restricting the advancement of terahertz regulation. Perovskite materials possess outstanding photoelectric properties, a straightforward preparation process, the capacity for mass production, and thereby become one of the most promising materials for the fabrication of terahertz detectors. Additionally, the facile tunability of perovskite compensates for the difficulty in adjusting the metasurface and meets the requirement for tun-

收稿日期: 2024-05-16, 修回日期: 2024-09-28

Received date: 2024-05-16, Revised date: 2024-09-28

基金项目: 中国科协青年人才托举工程项目 (2022QNRC001); 国家重点研发计划项目 (2022YFA1203502); 河北省自然科学基金项目 (F2023201041); 河北省教育厅青年拔尖人才项目 (BJK2024068); 河北大学高层次人才引进项目 (521100221083); 河北省先进激光技术与装备重点实验室开放课题 (HBKL-ALTE2024002) 和河北大学生命科学绿色发展研究院生物学项目 (513300201004)

Foundation items: Supported by Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2022QNRC001); National Key Research and Development Program of China (2022YFA1203502); Hebei Natural Science Foundation (F2023201041); Hebei Provincial Department of Education youth top talent project (BJK2024068); High-level Talents Program of Hebei University (521100221083); Program of Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment (HBKL-ALTE2024002) and Project of Institute of Green Development of Life Science Hebei University (513300201004)

作者简介 (Biography): 李依凡 (1990-), 女, 河北人, 博士, 副教授, 主要研究领域为太赫兹新型光电调控器件. E-mail: yifanli@tju.edu.cn

*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: yifanli@tju.edu.cn

able metasurface. The combination of the two enables effective regulation of terahertz in the light field. In this paper, we have designed two types of coded metasurface composed of organic-inorganic hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, polyimide, and aluminum, and manipulated the operating frequencies of the two structures through light field control. The results were compared with theoretical calculations to verify the effect. The first structure can be controlled by the light field to select between a broadband operating frequency and high efficiency. The second structure functions only at 0.1 THz and can vary the phase through light, thereby reversing the phase of the original structure to control the direction of beam reflection. On this basis, we fabricated the device and verified it. To a certain extent, this paper fills the void in the field of optical field regulation of coded metasurface and offers a train of thought for subsequent research.

Key words: terahertz, perovskite, coding metasurface, light field regulation

引言

太赫兹 (THz) 是处于微波与红外之间的特殊电磁波, 具有瞬态性、谱信息丰富、宽带性、非电离等优势, 已在基础研究、无损检测、国土安全、安全筛查和医学成像^[1-3]等领域广泛应用。为有效控制太赫兹波, 亟需开发一款经济、高效并稳定的器件^[4-7]。超材料通过亚波长尺度单元设计和独特的空间排列可以实现等效介电常数和磁导率参数的自由调控, 从而产生负介电常数、负磁导率、零折射率或者负折射率等奇异的电磁特性^[8-10]。然而, 三维超材料存在体积庞大、效率低、结构复杂不利于集成等因素, 不利于实际应用^[11-14]。超表面作为超材料的二维平面型结构, 不仅具有超材料的优异特性, 而且可实现对电磁波灵活调控。并且, 与超材料相比, 超表面具有体积小、易于加工和结构简单等诸多优点, 更能满足超薄高性能高集成度系统应用需求^[15-17]。

2014年, 崔铁军院士课题组创新性地将数字编码的概念引入超表面电磁学领域, 从相位和幅度的角度出发, 提出了编码超表面的概念。这一突破改变了超表面的设计思路, 简化了其分析复杂度并且降低了设计难度, 使其成为当前研究工作的热点之一^[18]。然而, 传统超表面在制造完成后, 其调控功能就被固化, 导致其灵活性受到限制。2016年, 李廉林教授课题组利用 1bit 编码超表面和有源器件结合, 在表面单元中加入电子二极管, 构造数字可调控单元, 通过控制偏压来动态调节散射状态, 在此基础上通过外接逻辑控制器件如现场可编程门阵列 (FPGA) 调控系统, 首次实现了对数字超表面的实时可编程设计, 成功构建了具备全息图实时成像的功能^[19]。

打破了传统超表面固化的局限性, 提高了超表面的适用性, 然而这种方法不可避免地增加了系统能耗, 且需要额外的信号源来驱动有源器件。2018年, 程强教授课题组采用可编程和动态调节的方

法, 创新性引入时间维度, 成功研制了动态时域数字编码超表面, 这一创新提高了谐波调控的适用性和准确性。基于该技术构建的新型无线通信系统, 简化了硬件系统的复杂性, 提高了能源利用率, 降低了系统功耗。这些优势使得该技术在实际应用中更具可行性和可持续性, 展示了其在科技创新和能源管理方面的广阔应用前景^[20]。2020年, 李强和 Ranjan Singh 的团队分别提出了在太赫兹波段的石墨烯^[21]与 Fano 谐振超表面和硅超表面^[22], 克服了金属超表面的欧姆损耗问题并通过超材料共振提高了器件整体性能, 然而, 制备过程依然相对复杂, 且可调控的参数较为有限。2022年, 吴耿波团队设计了无边带时空编码超表面天线^[23], 克服了超表面的边带污染问题, 提高通信系统的性能和效率。2023年张俊伟团队将变容管和 PIN 二极管与超表面结合, 开发出双频段相位可调控的智能超表面, 实现了电磁特性的实时可编程操控, 使其在两个独立的频段内高效运行^[24]。因此, 超表面的频率可调与宽波段变得十分关键。

为实现对电磁波的主动调控, 本文引入了新型材料有机-无机杂化钙钛矿 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)。由于钙钛矿材料具备优异的光电特性, 如大的光吸收系数、带隙可调、高折射率以及可以快速响应外部光场的变化等^[25-27]。同时, 由于其材料易于溶液加工、可大批量生产等优点^[28-30], 近年来被广泛关注。在本文中, 一方面利用特定的排列结构的超表面, 通过控制超构表面单元结构的大小、形状、方向等即引入相位梯度, 进而能够有效地调控 THz 电磁波的波前 (振幅、相位和偏振)。另一方面, 利用钙钛矿在无光和有光照状态下的电导率不同, 从而产生的绝缘态到金属态的变换。将钙钛矿材料与超表面结构进行复合, 复合超表面结构器件在无光和有光照状态下, 整体表现出不同相位和频率的变换, 因此, 利用钙钛矿材料光场调控的特性, 设计钙钛矿

编码超表面复合结构,对太赫兹波相位频率进行灵活调控^[31-32]。在本文中,我们选定了 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 作为调节媒介。无光状态 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 介电常数设为 $\epsilon_r=33$,电导率设为 $\sigma=0.08\text{ S/m}$ ^[33]表现为绝缘态当作“0”;在能量是 729.45 mW/cm^2 ,波长为 405 nm 的入射光照射下 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 介电常数设为 $\epsilon_r=60$,电导率设为 $\sigma=1.4\times 10^7\text{ S/m}$ ^[34-36]表现为金属态当作“1”。在编码超表面中引入 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 进行调控,大大提高了超表面对太赫兹调控的自由度和灵活性^[37]。设计了一种基于 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 光电特性的动态超表面基本单元,该单元自下而上分为三层:底层是全金属铝片增加电磁波反射率,中间层为特定厚度的聚酰亚胺(PI)材料,顶层为 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 和金薄膜层的复合结构,利用CST microwave studio(CST)软件进行参数优化实现了四个不同工作频率下的响应。

本文先对编码超表面的反射原理进行了理论分析,分析了波束成因,之后通过仿真与修改设计了一种可变工作频率的编码超表面,其无光状态下在 $0.1\sim 0.14\text{ THz}$ 工作,施加光照后仅在 0.14 THz 状态工作但对于雷达散射截面缩减效果会更佳,并计算了此结构波束数量与偏转角度,将理论同仿真相验证,证实了理论计算的准确性。通过此结构验证了钙钛矿的光电特性,并以此为基础进一步进行研究,设计了一款能够变换工作相位,使得“0”结构与“1”结构可以在光照下进行转换,无光状态下“0”结构在光照下表现出的特性与无光状态下“1”结构相当,可以视为同一结构。通过将这组结构与不可调谐结构单元相组合,即可灵活调控波束数量与方向,实现对电磁波的主动调控。

1 理论分析

本文设计了利用 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 光电特性构建的1 bit 编码超表面结构,即两个结构具有 180° 的相位差。其原理是通过特定的排列组合,使入射平面波被随机分散到各个方向,形成随机散射波。当反射波垂直入射到超表面上时,其表面的远场散射函数 $f(\theta, \varphi)$ 表达式为^[38]

$$f(\theta, \phi) = f_c(\theta, \phi) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \exp \{-i \{ \phi(m, n) + kD \sin \theta [(m - 1/2) \cos \phi + (n - 1/2) \sin \phi] \} \} \quad (1)$$

式(1)中: θ, ϕ 是任意方向的入射角和方位角, $\phi(m, n)$ 为单个单元的相位, K 为传播常数, D 是单元大小;其中

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{NP} \quad , \quad (2)$$

式(2)中: P 是编码序列周期, λ 为自由空间波长, N 表示超级子单元的单元数量,本文取为4,方向函数表达式

$$\text{Dir}(\theta, \phi) = \frac{4\pi |f(\theta, \phi)|^2}{\int_0^{2\pi} |f(\theta, \phi)|^2} \sin \theta d\theta d\phi \quad . \quad (3)$$

在1 bit 编码超表面中, $\phi(m, n)$ 只能是0或 π 。当单元0与1的幅度近似相同时,两单元的散射特性会相消,导致 $f_c(\theta, \phi)$ 辐射特性几乎为0^[39]。根据式(1)和式(3)可以得知,在1 bit 编码超表面中,保证超表面单元幅度相同时,单元相位相差 180° ,即可通过排列组合实现编码超表面的设计。为评估不同序列编码超表面的散射场,设置其为沿 x 轴方向排列的一维编码序列。其中0与1单元可视为偶极子辐射源, A 代表散射波振幅矢量,则垂直平面的远场辐射为 $A^{i(Kr - \omega t)}$,因此, r 处的散射场是全部偶极子辐射源电场总和(忽略 $e^{i\omega t}$),即

$$E = \sum_n A_n e^{iK \cdot (r - r'_n)} = \sum_n A_n e^{i \left(\frac{2\pi \sin \theta}{\lambda} (x - x'_n) + \frac{2\pi \cos \theta}{\lambda} z \right)} \quad , \quad (4)$$

n 为第 n 个偶极子辐射源, x'_n 表示其位置坐标。

2 基于光场调控的可变频率的编码超表面设计和讨论

为实现对电磁波的主动调控,通过引入新型材料 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$,设计了一种可变工作频率的编码超表面如图1所示,其在无光状态下可在 $0.1\sim 0.14\text{ THz}$ 的宽带范围内工作,但无法完美实现雷达散射截面缩减。在有光状态下,雷达散射截面进一步缩减,但仅限在 0.14 THz 下工作。

利用 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的良好导电性,利用CST仿真软件对结构参数进行优化,构建了顶层为 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 和金薄膜层的复合结构,中间层为PI,底层为铝薄膜层的编码超表面,本文模型中无光状态 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 以橙色部分表示,有光状态钙钛矿以红色表示,PI以蓝色表示,金以黄色表示,铝以灰色表示。

图1为编码超表面的结构设计,对于单元“0”,顶层 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 厚度为 $1.6\ \mu\text{m}$,内圆半径 $140\ \mu\text{m}$,外圆半径 $205\ \mu\text{m}$,中间层PI厚度为 $160\ \mu\text{m}$,底层铝金属层厚度为 $1.6\ \mu\text{m}$,结构周期长为 $880\ \mu\text{m}$;对于单元“1”,顶层 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 厚度为 $1.6\ \mu\text{m}$,内圆半径

为 $288.5 \mu\text{m}$, 外圆半径为 $305 \mu\text{m}$, 中间层 PI 厚度为 $160 \mu\text{m}$, 底层铝金属层厚度为 $1.6 \mu\text{m}$, 结构周期长为 $880 \mu\text{m}$ 。

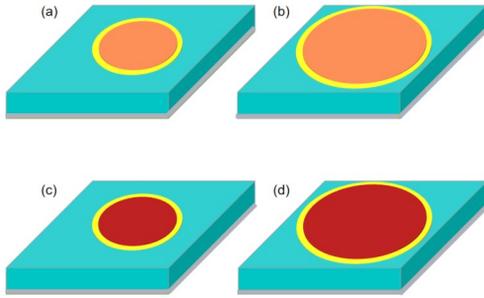


图1 编码超表面结构示意图:(a)无光状态时“0”结构示意图;(b)无光状态时“1”结构示意图;(c)有光状态“0”结构示意图;(d)有光状态时“1”结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the coding metasurface structure : (a) 0 structure in dark state ; (b) 1 structure in dark state ; (c) 0 structure in light state ; (d) 1 structure in light state

单元“0”和“1”的振幅和相位图如图2所示。从图2(a)可以看出,绝缘态“0”和“1”结构的振幅在 0.1 THz 时分别为 0.99 和 0.56 , 在 0.14 THz 时为 0.94 和 0.97 。从图2(c)可以看出,金属态0和1结构的振幅在 0.1 THz 时分别为 0.99 和 0.96 , 在 0.14 THz 时分别为 0.96 和 0.85 。结构的相位如图2(b)和图2(d)所示。绝缘态“0”和“1”结构的相位在 0.1 THz 时分别为 -18.21° 和 161.84° , 在 0.14 THz 时为 -126.64° 和 -54.76° 。两者在 0.1 THz 时的差异为 180.05° , 接近 180° 。金属态“0”和“1”结构的相位

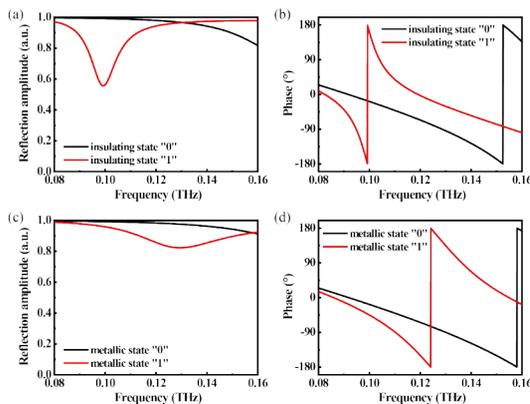


图2 (a)无光反射振幅;(b)无光反射相位;(c)有光反射振幅;(d)有光反射相位

Fig. 2 (a) Insulating state amplitude of reflection; (b) insulating state reflection phase; (c) metallic state amplitude of reflection; (d) metallic state reflection phase

在 0.1 THz 时分别为 -17.66° 和 -15.08° , 在 0.14 THz 时为 -118.20° 和 67.57° 。两者在 0.14 THz 时的差值为 185.77° , 接近 180° 。可以发现,在 0.1 THz , 绝缘态下单元“0”和“1”的相位差接近 180° , 达到了1 bit 编码超表面设计条件, 从而能够实现预期功能; 但在 0.14 THz , 相位差小于 180° , 但在 0.1 THz 和 0.14 THz 之间的频段中, 相位差仍然较大, 能够实现部分功能。因此, 该编码超表面能够在 0.1 THz 至 0.14 THz 的范围内有效工作, 并且在 0.1 THz 时能够完美实现其功能。在金属状态下“0”和“1”的相位差接近 0° , 在 0.14 THz 时为 180° , 编码超表面在 0.1 THz 至 0.14 THz 的范围内不能很好地满足超表面设计要求, 只能在 0.14 THz 实现预期功能, 并完美实现雷达散射截面缩减。然后在不同频率下验证了不同序列编码超表面的远场波束图。通过调控 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的有光和无光状态, 对比两者的波束变化。为了实现不同的调控模式, 将分别仿真编码序列为 $0101/0101$ 和 $0101/1010$ 的周期结构排列。由于编码单元的相位特性受其周围相邻单元耦合效应的影响^[40], 这种单元间的相互耦合可能导致相位的恶化, 进而使实际结构的相位与设计值产生偏差。为了减少相邻单元之间的耦合干扰, 超级子单元采用了 4×4 的排列方式。

设计结构绝缘状态下, 能在 $0.1 \sim 0.14 \text{ THz}$ 频率区间内工作。当平面波垂直入射时, 对于 $0101/0101$ 结构, 利用式(4)计算 $0101/0101$ 序列周期编码超表面的散射特性, 式中“0”和“1”单元间距 $P = 880 \mu\text{m}$, $z = 1 \text{ m}$, 频率 $f = 0.1 \text{ THz}$ 时阵列 $0101/0101$ 结构的反射波束计算结果为三束, $f = 0.14 \text{ THz}$ 时阵列结构的反射波束计算结果也为三束。对于三波束而言, 中心波束入射角 $\theta = 0^\circ$, 其余波束利用式(2)计算 $f = 0.1 \text{ THz}$ 时 $\theta = 58.40^\circ$, $f = 0.14 \text{ THz}$ 时 $\theta = 37.47^\circ$ 。对于 $0101/0101$ 结构仿真结果和计算结果接近如图3(a)、(b)所示, 从图中观察到平面波频率在 $0.1 \sim 0.14 \text{ THz}$ 时, 当编码序列为 $0101/0101$ 结构时, 反射波束被反射到三个不同的方向和理论计算一致, 验证了理论可行性。对于另一种编码序列为 $0101/1010$ 的结构理论计算可以视为 X 与 Y 方向上 $0101/0101$ 的二维周期排布, $f = 0.1 \text{ THz}$ 与 $f = 0.14 \text{ THz}$ 时反射波为五束。

仿真结果和计算结果如图3(c)(d)所示, 从图中观察到平面波频率在 $0.1 \sim 0.14 \text{ THz}$ 时, 当编码序列为 $0101/1010$, 反射波束被反射到五个不同的

方向,且符合计算,电磁波反射后,每束能量非常小,能够降低 RCS,实现波束调控和雷达干扰,从而达到隐身效果。但由于 0.1 THz 时振幅值有一定相差,0.14 THz 时两单元结构相位差与 180° 有一定差距,两个单元的散射特性不能完全抵消,导致都还有明显的中心束,缩减效果并不彻底,但符合设计预期。

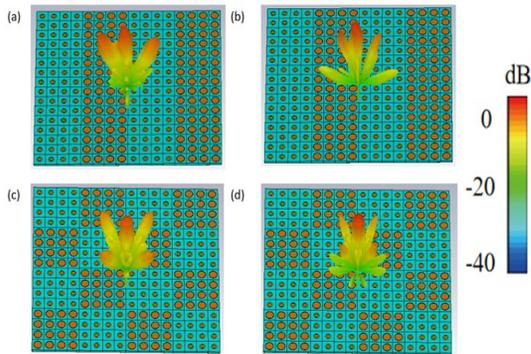


图3 钙钛矿为绝缘态:(a) 0101/0101 在 0.1 THz 远场波束图;(b) 0101/0101 在 0.14 THz 远场波束图;(c)0101/1010 在 0.1 THz 远场波束图;(d)0101/1010 在 0.14 THz 远场波束图
Fig. 3 Perovskite is insulated:(a) beam pattern of the far field for the coding sequence 0101/0101 at 0.1 THz;(b) 0101/0101 at 0.14 THz;(c) 0101/1010 at 0.1 THz;(d) 0101/1010 at 0.14 THz perovskite for insulating state with 0.14 THz far field

从图3中可以看出在绝缘状态下本超表面结构的雷达散射缩减效果不强,无法实现完美雷达隐身,故对结构施加光场进行调控,期望其能更好地缩减雷达散射截面。平面波垂直入射时,对于 0101/0101 结构,计算 0101/0101 序列,频率 $f = 0.1$ THz 时阵列 0101/0101 结构的反射波束计算结果为一束, $f = 0.14$ THz 时阵列结构的反射波束计算结果也为两束。对于两波束而言,利用式(2)计算 $f = 0.1$ THz 时 $\sin \theta = 3.407/N$, $f = 0.14$ THz 时 $\sin \theta = 2.433/N$, 由于 $\sin \theta$ 一定小于 1,且 N 为正整数,所以 N 大于等于 4 且 N 大于等于 3,所以本文中 choice N 为 4,根据 $\sin \theta$ 分别计算出 $f = 0.1$ THz 时 $\theta = 37.47^\circ$, $f = 0.14$ THz 时 $\theta = 58.40^\circ$,其方位角 ϕ 为 0° 和 180° 。

对于编码序列 0101/0101 仿真结果与计算结果基本一致,如图 4(a)、(b)所示,当编码序列为 0101/0101 结构时,反射波束被反射到一个方向,无法有效缩减雷达散射截面。而在 0.14 THz 时,反射波束被反射到两个不同方向,方位角与理论计算一致,与绝缘态相比可以更有效地缩减雷达散射截面。

当编码序列为 0101/0101 结构时, $f = 0.1$ THz 时,反射波束仍被反射到一个方向, $f = 0.14$ THz 时,反射波束被反射到方位角 ϕ 为 45° 、 135° 、 225° 、 315° 的四个方向,与理论计算一致。电磁波反射后,每束能量非常小,能够降低 RCS,实现波束调控和雷达干扰,从而达到隐身效果,达到了设计预期。

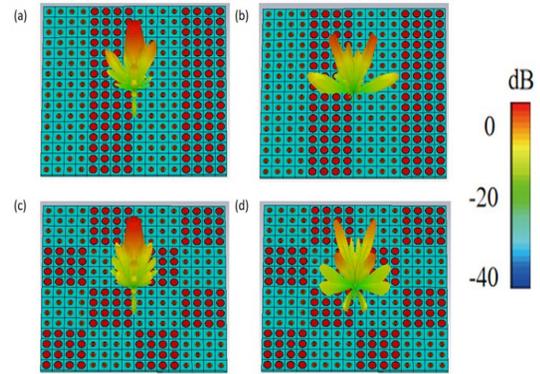


图4 钙钛矿为金属态:(a) 0101/0101 在 0.1 THz 远场波束图;(b) 0101/0101 在 0.14 THz 远场波束图;(c) 0101/1010 在 0.1 THz 远场波束图;(d) 0101/1010 在 0.14 THz 远场波束图
Fig. 4 Perovskite is metallic:(a) beam pattern of the far field for the coding sequence 0101/0101 at 0.1 THz ;(b) 0101/0101 at 0.14 THz ;(c) 0101/1010 at 0.1 THz ;(d) 0101/1010 at 0.14 THz

从图 4(a)和(c)可以看出,在 0.1 THz 时,金属态的编码超表面两种结构均为单波束,都不能实现雷达散射截面的减少。然而,在 0.14 THz 时,与图 3(b)和(d)相比,无论编码序列 0101/0101 还是 0101/1010 周期结构的金属态都没有明显的中心束,显然具有更有效的雷达散射截面减少,如图 4(b)和(d)所示。对比两种状态,金属态工作频率虽窄,但更有效地缩减雷达散射截面。

3 钙钛矿编码超表面器件实验测试

为了进一步测试器件性能,我们制备了编码超表面。首先,对聚酰亚胺基片依次使用丙酮、异丙醇、去离子水进行超声清洗 15 min;然后在聚酰亚胺基片上旋涂光刻胶;接着,将带有编码超表面图形的掩模板对准聚酰亚胺基片,通过紫外曝光使超表面形状固化;之后移除掩模板,将其放入显影液中震荡,利用显影液溶解曝光后的光刻胶,从而把掩模板的图形复制到光刻胶中;随后,采用真空蒸镀系统得到薄膜纯度高的金属材料超表面结构层,如图 5(a)、(b)所示;接着在其底部再次进行蒸镀,得到底层铝金属薄膜,如图 5(c)所示;最后,进行第二

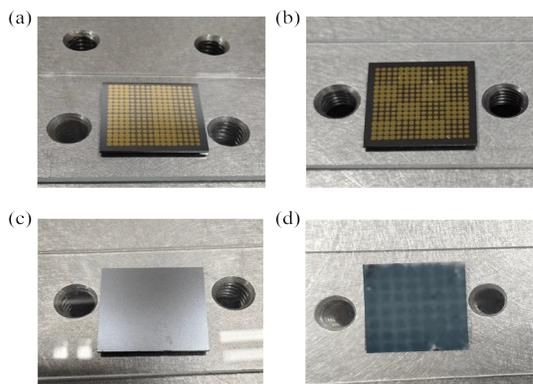


图5 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 编码超表面的器件图: (a) 无 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜的 0101/0101 结构编码超表面器件图; (b) 无 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜的 0101/1010 结构编码超表面器件图; (c) 器件底层金属铝膜; (d) 涂有 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜的器件图

Fig. 5 Device diagram of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ encoding metasurface: (a) 0101/0101 structured encoded metasurface device without $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ thin film; (b) 0101/1010 structured encoded metasurface device without $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ thin film; (c) bottom metal layer of the device; (d) device with $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ thin film.

次曝光,并依次完成钙钛矿的旋涂及高温退火,如图5(d)所示。

图6(a)显示了无编码超表面时钙钛矿在黑暗和光照状态下的吸收率。在0.08~1.3 THz范围时,在无光照状态下,钙钛矿材料吸收率较低,光照状态下钙钛矿吸收率高于黑暗状态下钙钛矿的吸收率,其最大差值出现在0~0.26 THz范围,最高达到0.052,钙钛矿材料编码超表面器件的有效光调控THz范围在0~0.26 THz。图6(b)钙钛矿编码超表面不同频率的反射振幅。器件反射振幅在0.1 THz时分别为0.99和0.6,在0.14 THz时分别为0.92和0.96,其实验结果与仿真结果趋势一致,进一步验证了仿真测试的可行性。因此,将钙钛矿与编码超表面相结合,不仅可以保持光照下的高吸收率,还能灵活调控太赫兹。

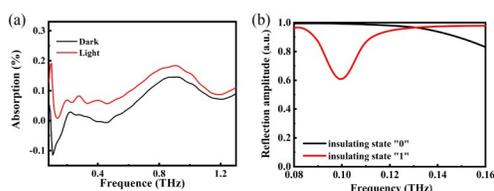


图6 (a) 无编码超表面时黑暗和光照状态下钙钛矿吸收率; (b) 钙钛矿编码超表面器件不同频率的反射振幅

Fig. 6 (a) perovskite absorption under dark and light conditions without a coded metasurface; (b) reflection amplitude of coding metasurface units at different frequencies

4 结语

本文通过将钙钛矿与编码超表面相结合,利用钙钛矿在无光状态下呈现绝缘性,在光照状态下呈现金属性的特性,根据编码超表面的工作频率这一重要参数,设计了一种频率可切换的编码超表面,通过光场调控,可在带宽和缩减效果之间进行取舍。利用CST软件仿真模拟了远场光束图,并通过器件实验测试,进一步验证了钙钛矿超表面器件光场调控的频率可变换的可靠性。构建1 bit可变频编码超表面,但是对于2 bit甚至更多仍然适用,且可以呈现出1 bit无法呈现的形状。根据实际需求,通过选择和调整几种超表面可以对宽带、高效功能进行取舍,使用合适的结构。

References

- [1] Ghafoor S, Boujnah N, Rehmani M H. Tutorials, MAC protocols for terahertz communication: A comprehensive survey [J]. *IEEE Communications Surveys*, 2020, **22** (4): 2236–2282.
- [2] Valušis G, Lisauskas A, Yuan H, et al. Roadmap of terahertz imaging [J]. *Sensors*, 2021, **21** (12): 4092.
- [3] Song H.-J, Lee N. Technology, Terahertz communications: Challenges in the next decade [J]. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2021, **12** (2): 105–117.
- [4] Li Y F, Yang R, Xie P H, et al. Simulation of terahertz metasurface controlled by light field based on novel perovskite materials [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (李依凡, 杨睿, 解佩翰, 等. 基于新型钙钛矿材料的光场调控太赫兹超表面仿真研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2023, **35** (12): 129001–1–129008.)
- [5] Zhou C, Peng X.-q, Li. Graphene-embedded coding metasurface for dynamic terahertz manipulation [J]. *Optik*, 2020, **216**: 164937.
- [6] Wang R, Deng B, Wang H, et al. JApplications, Scattering cross section of rough metallic spheres at terahertz frequencies [J]. *Journal of Electromagnetic Waves*, 2022, **36** (1): 1–17.
- [7] Satapathy A, Sawant K K, Mondal S. Recent progress on MXenes as an attenuator of terahertz radiation [J]. *Electron. Mater.* 2023, **52** (3): 1749–1768.
- [8] Ri K.-J, Kim J.-S, Kim J.-H. Tunable triple-broadband terahertz metamaterial absorber using a single VO_2 circular ring [J]. *Opt. Commun.* 2023, **542**: 129573.
- [9] Wang X, Xiao Z, Wang X, et al. Tunable and switchable common-frequency broadband terahertz absorption, reflection and transmission based on graphene-photosensitive silicon metamaterials [J]. *Opt. Commun.* 2023, **541**: 129555.
- [10] Ni X, Liu Z, Gu F, et al. PhotonicsSHA-2D: modeling of single-period multilayer optical gratings and metamaterials [J]. *Computational program* 2009: 138655379.
- [11] Yu J J, Xie Y, PEI X. State-of-art of Metamaterials with Negative Poisson's Ratio [J]. *Journal of Mechanical Engineering* (于靖军, 谢岩, 裴旭. 负泊松比超材料研究进展

- [J]. *机械工程学报*, 2018, **54** (13): 1-14.)
- [12] Zhang Z, Pang H, Georgiadis A. Wireless power transfer—An overview [J]. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2018, **66** (2): 1044-1058.
- [13] Yan X, Yang M, Zhang Z, *et al.* The terahertz electromagnetically induced transparency-like metamaterials for sensitive biosensors in the detection of cancer cells [J]. *Biosensors*, 2019, **126**: 485-492.
- [14] Bai L, Zhang X G, Jiang W X. Research progress of light-controlled electromagnetic metamaterials [J]. *Journal of Radars* (柏林, 张信歌, 蒋卫祥. 光控电磁超材料研究进展 [J]. *雷达学报*, 2021, **10** (2): 240-258.)
- [15] Li J, Li J, Zheng C, *et al.* Dynamic control of reflective chiral terahertz metasurface with a new application developing in full grayscale near field imaging [J]. *Carbon*, 2021, **172**: 189-199.
- [16] Zhang L, Chen X Q, Zheng Y N, *et al.* Electromagnetic metasurfaces and information metasurfaces [J]. *Chinese Journal of Radio Science* (张磊, 陈晓晴, 郑熠宁, 等. 电磁超表面与信息超表面 [J]. *电波科学学报*, 2021, **36** (6): 817-828.)
- [17] Guo C B, Zhao Z, Xu W K. Research advances of acoustic Metasurfaces [J]. *Science Technology and Engineering* (郭晨冰, 赵铮, 许卫锴. 声学超表面的研究与应用进展 [J]. *科学技术与工程*), 2021, **21** (3): 845-851.
- [18] Yu N, Genevet P, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, **334** (6054): 333-337.
- [19] Li L, Ruan H, *et al.* Machine-learning reprogrammable metasurface imager [J]. *Nature Communications*, 2019, **10** (1): 1082.
- [20] Zhao J, Yang X, *et al.* Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems [J]. 2019, **6** (2): 231-238.
- [21] Li Q, Gupta M, *et al.* Active control of asymmetric Fano resonances with graphene-silicon-integrated terahertz metamaterials [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2020, **5** (2): 1900840.
- [22] Cong L, Singh R, *et al.* Spatiotemporal dielectric metasurfaces for unidirectional propagation and reconfigurable steering of terahertz beams [J]. *Adv. Mater.*, 2020, **32** (28): 2001418.
- [23] Wu G.-B, Dai J Y, *et al.* Sideband-free space-time-coding metasurface antennas [J]. *Nat. Electron.*, 2022, **5** (11): 808-819.
- [24] Saifullah Y, He Y, *et al.* Recent progress in reconfigurable and intelligent metasurfaces: A comprehensive review of tuning mechanisms, hardware designs, and applications [J]. *Adv. Sci.*, 2022, **9** (33): 2203747.
- [25] Yao X, Ding Y L, Zhang X D, *et al.* A review of the perovskite solar cells [J]. *Acta Phys. Sin* (姚鑫, 丁艳丽, 张晓丹, 钙钛矿太阳能电池综述 [J]. *物理学报*, 2015, **64** (3): 038404.)
- [26] Zhang Y, Du J, *et al.* Ultrasensitive photodetectors based on island-structured CH₃NH₃PbI₃ thin films [J]. *ACS Applied Materials*, 2015, **7** (39): 21634-21638.
- [27] Li C, Han C, *et al.* Enhanced photoresponse of self-powered perovskite photodetector based on ZnO nanoparticles decorated CsPbBr₃ films [J]. *Sol. Energy Mater.*, 2017, **172**: 341-346.
- [28] Zhao Y, Li C. Recent advances on organic-inorganic hybrid perovskite photodetectors with fast response [J]. *Info-Mat*, 2019, **1** (2): 164-182.
- [29] Soleimanioun N, Rani M, *et al.* Potential replacement to lead: Alkali metal potassium and transition metal zinc in organo-metal halide perovskite materials [J]. *Journal of Alloys*, 2021, **861**: 158207.
- [30] Tyznik C, Lee J, *et al.* Interfaces, Photocurrent in metal-halide perovskite/organic semiconductor heterostructures: impact of microstructure on charge generation efficiency [J]. *ACS Applied Materials*, 2021, **13** (8): 10231-10238.
- [31] Wu G.-B, Dai J Y, *et al.* A universal metasurface antenna to manipulate all fundamental characteristics of electromagnetic waves [J]. *Nat. Commun.*, 2023, **14** (1): 5155.
- [32] Chen M, Wang Y, *et al.* Monolithic metamaterial-integrated graphene terahertz photodetector with wavelength and polarization selectivity [J]. *ACS Nano*, 2022, **16** (10): 17263-17273.
- [33] Wilson J N, Frost J M, *et al.* Dielectric and ferroic properties of metal halide perovskites [J]. *APL Mater.*, 2019, **7** (1): 010901.
- [34] Li Y, Zhang Y, *et al.* Ultrabroadband, ultraviolet to terahertz, and high sensitivity CH₃NH₃PbI₃ perovskite photodetectors [J]. *Nano Lett.*, 2020, **20** (8): 5646-5654.
- [35] Hong M J, Zhu L, *et al.* Time-resolved changes in dielectric constant of metal halide perovskites under illumination [J]. *Am. Chem. Soc.*, 2020, **142** (47): 19799-19803.
- [36] Awni R A, Song Z, *et al.* Influence of charge transport layers on capacitance measured in halide perovskite solar cells [J]. *Joule*, 2020, **4** (3): 644-657.
- [37] Chen M, Zhao Z, Liu R F, *et al.* Novel Terahertz Spectrum-Measurement Method Based on Spectral Encoding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (陈猛, 赵自然, 刘睿丰, 等. 基于光谱编码的太赫兹光谱测量新方法. *激光与光电子学进展*, 2023, **60** (18): 1811015.)
- [38] Cui T J, Qi M Q, *et al.* Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: Science*, 2014, **3** (10): e218.
- [39] Yan X, Liang L J, Zhang Y T, *et al.* A coding metasurfaces used for wideband radar cross section reduction in terahertz frequencies. [J]. *Acta Phys. Sin* (闫昕, 梁兰菊, 张雅婷, 等. 基于编码超表面的太赫兹宽频段雷达散射截面缩减的研究 [J]. *物理学报*, 2015, **64** (15): 158101.)
- [40] Monticone F, Estakhri N M, *et al.* Full control of nanoscale optical transmission with a composite metascreen [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, **110** (20): 203903.