



·前沿技术与交叉科学·

基于新型钙钛矿材料的光场调控 太赫兹超表面仿真研究*

李依凡^{1,2}, 杨睿¹, 解佩翰¹, 杨贺¹, 娄存广¹, 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)

摘要: 为实现高效太赫兹调控, 迫切需要一种高效且成本低廉的材料。新型钙钛矿材料由于其优异的光电特性, 加上钙钛矿制备工艺简单、可大批量生产等优点, 非常适合作为太赫兹超材料的活性材料, 通过外部激励改变活性材料的属性, 可灵活调控太赫兹波。因此, 选择新型钙钛矿材料外加光场调控太赫兹, 分析在光场作用前(绝缘态)和在光场作用后(金属态)两种状态对单元结构太赫兹宽波段下幅值和相位的影响。设计出光场灵活调控的钙钛矿基 1 bit 太赫兹编码超表面结构, 该结构由有机无机杂化钙钛矿 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3)、聚酰亚胺和铝构成。通过 CST 仿真结果显示, 该超表面结构在光场的调控下能够实现宽谱 (0.1、1、2、6 THz) 太赫兹波的 180° 相位差变化, 经过超表面编码结构的设计, 同一编码序列实现远场波束的变换。研究表明, 基于光场操控钙钛矿材料的编码超表面为实现灵活的太赫兹波调控提供了新的思路, 在太赫兹通信、安检、生物医学成像等方面具有巨大的应用潜力。

关键词: 太赫兹; 钙钛矿; 光场调控; 编码超表面; 相位

中图分类号: TB333

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230128

Simulation of terahertz metasurface controlled by light field based on novel perovskite materials

Li Yifan^{1,2}, Yang Rui¹, Xie Peihan¹, Yang He¹, Lou Cunguang¹, Liu Xiuling¹, Yao Jianquan²

(1. Hebei Key Laboratory of Digital Medical Engineering, College of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Hebei Baoding 071000, China;

2. Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In recent years, the terahertz control technology has shown a good application prospect in the fields of detection, imaging, wireless network communication and so on, and has attracted the attention of scholars at home and abroad. To achieve efficient terahertz regulation, an efficient and low-cost material is urgently needed. New perovskite materials have become one of the most promising candidates for high stability optoelectronic devices due to their excellent photoelectric properties. At the same time, perovskite has the advantages of simple preparation process and mass production, thus it is very suitable to be used as the active material of terahertz metamaterials. The properties of active materials can be changed by external excitation, and terahertz waves can be adjusted flexibly. Therefore, this paper selects a new perovskite material with external optical field to regulate terahertz waves, and analyzes the influence of two states-before the optical field action (insulating state) and after the optical field action (metallic state) on the amplitude and phase of the unit structure in the wide band of terahertz. A perovskite-based 1bit terahertz coding metasurface structure with flexible light field regulation was designed. The structure is composed of organic and inorganic hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3), polyimide and aluminum. The simulation results of CST show that the metasurface structure can realize 180° phase difference change of wide spectrum (0.1, 1, 2, 6 THz) terahertz waves under the control of light field. After the design of metasurface coding structure, the same coding sequence can

* 收稿日期: 2023-05-11; 修订日期: 2023-10-13

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); 国家自然科学基金项目 (2022YFA1203502); 河北大学人才引进项目 (521100221083); 河北省自然科学基金项目 (F2023201041)

联系方式: 李依凡, liyifan_an@163.com。

通信作者: 刘秀玲, liuxiuling121@hotmail.com。

realize the transformation of far-field beam. The results show that the encoding metasurface based on optical field manipulation of perovskite materials provides a new idea for realizing flexible terahertz wave regulation, and has great application potential in terahertz communication, security check, biomedical imaging and so on.

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

近年来,太赫兹技术的应用也在不断扩展到波谱、成像、通信、雷达、天文、气象、石油、化工、军事、安全、国防、航空航天等各个领域,由于太赫兹波具有独特的瞬态性、高穿透性、宽带性、相干性和低能性等特性^[1-3],且是宏观电子学与微观光子学研究的交叉领域,因此,太赫兹科学技术受到各国政府、科研机构、高等院校和高科技企业等部门的广泛关注,成为众多学者研究探讨的焦点。太赫兹是指频率在 0.1~10 THz、波长为 30 μm ~3 mm 的电磁波。从频率上看,太赫兹波在微波与红外线之间,其长波段与亚毫米波段相重合、短波段与红外光相重合;从能量上看,太赫兹波的能量为 10^{-3} eV,能量在电子和光子之间。太赫兹波段两侧的红外和微波技术已经非常成熟,而太赫兹基于其瞬态性、宽带性等多种优点,在通信、安检、生物医学、军事应用等方面有着广阔的发展前景^[3-4]。

超表面是指一种厚度小于波长的人工层状材料,自超材料发展而来^[5-7]。超材料的微结构尺度小于它作用的波长,因此得以对入射波束施加影响。在 2011 年,广义斯涅耳定律的提出极大推动了超表面的发展^[8]。相比于传统三维体结构的超材料,二维形式的超表面凭借其超薄、低损耗、易加工、单元设计灵活、满足亚波长等优势引起了国内外学者的广泛关注^[9-10]。超表面可实现对电磁波偏振、振幅、相位、极化方式、传播模式等特性的灵活有效调控。而相位是电磁波的一个核心属性,等相位面决定了电磁波的传播方向,一副图像的相位则包含了其立体信息。通过超表面来控制电磁波的相位,可以实现光束偏转、超透镜、超全息、涡旋光产生、编码、隐身、幻像等功能^[11]。

2014 年,东南大学崔铁军院士在微波波段提出了数字超表面,即编码超表面。通过数字编码方法替代等效媒质理论来表征超表面,不仅有效简化了超表面设计,而且建立了数字信息与超材料物理的联系^[12]。在微波频段,构建数字编码超表面的常用方法是在超表面单元中加载半导体器件,然而这种方法一般需要大量导线、外部电源和复杂控制电路提供直流控制信号来驱动超表面,且外部电源和控制器必须通过导线和超表面相互连接,会增加系统体积,也会带来直流和微波信号间的串扰^[13-14]。使用光调控可以有效避免上述缺点,因而成为当今学者研究的热点。本文选择钙钛矿 MAPbI_3 作为调控材料,是由于其结构特殊,在光照条件下其电导率比无光情况下高 9 个量级,已经成为高稳定光电器件最有前途的候选材料之一,可灵活调控太赫兹波,适合做太赫兹超材料的活性材料^[15-17]。本文通过使用 CST 软件利用钙钛矿来设计 1 bit 编码超表面,通过设计基本单元“0”与“1”,使其相位差为 180° ,使两单元散射特性相消,进行远场雷达散射截面仿真,通过仿真经典序列将入射的电磁波散射到各个方向形成漫反射,在外加光场激励下本结构可以对电磁波进行调控,为太赫兹主动控制编码超表面提供了一种新的设计思路。

1 理论分析

编码超表面分为 1、2、3 bit 等,本文设计为 1 bit,即两单元相位差约为 180° 。其原理与反射阵天线相似,通过合理排布,将入射的电磁波打散到不同方向上,形成杂乱无章的散射波。对于垂直入射的反射波,表面的远场散射表示为^[12]

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

式中: N 为超级子单元中单元数量,由于 $\sin\theta$ 取值范围为 $0 \sim 1$,所以本文取 N 为 4; k 为任意整数; $f_e(\theta, \varphi)$ 代表单个单元的远场函数; D 是单元尺寸; θ, φ 是任意方向的仰角和方向角; $\varphi(m, n)$ 表示位置 (m, n) 的单个单元的相位。

方向函数 $d(\theta, \varphi)$ 表示为

$$d(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} |f(\theta, \varphi)|^2} \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

对于 1 bit 编码而言, $\varphi(m, n)$ 只能为 0 或者 180° ,两单元的散射特性相消, $f_e(\theta, \varphi)$ 的辐射特性基本为 0 。由式 (1)、(2) 可以看出,保证相位相差为 180° 就可以通过不同的编码阵元来控制编码超表面的远场散射特性^[18-22]。

为实现对电磁波的主动调控, 本文选择钙钛矿 MAPbI_3 作为调控材料。在无光状态下, 钙钛矿表现为绝缘态, 绝缘态下介电常数 $\epsilon_{ii}=33$, 电导率 $\sigma_i=0.08 \text{ S/m}$; 在波长为 405 nm、能量为 729.45 mW/cm^2 的光入射下, 钙钛矿表现为金属态, 金属态下介电常数 $\epsilon_{im}=60$, 电导率 $\sigma_m=1.4 \times 10^7 \text{ S/m}$ ^[23-24]。本文利用光照下钙钛矿良好的导电性设计了以铝为底层、PI 为衬底 (蓝色)、钙钛矿为顶层 (红色) 的四个不同工作频率的编码超表面, 通过 CST 软件合理调整结构参数。编码超表面结构设计示意图如图 1 所示。

不同频率下单元“0”和“1”的结构分别如表 1 和表 2 所示。利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 使用六面

体网格结构划分, 初步绘制网格后通过自适应网格多次迭代进行仿真, 分别计算频率为 0.1、1、2、6 THz 的反射振幅与反射相位, 结果如图 2~图 5 所示。可以看到, 在本文所设计的 4 个工作频率下, 两结构反射振幅均超过 0.66, 且相位差约为 180° , 满足编码超表面设计条件, 特别是图 2、图 3、图 4 中单元“0”与单元“1”反射振幅相差无几, 因此把图 1(a) 结构视作单元“0”, 把图 1(b) 结构视作单元“1”。

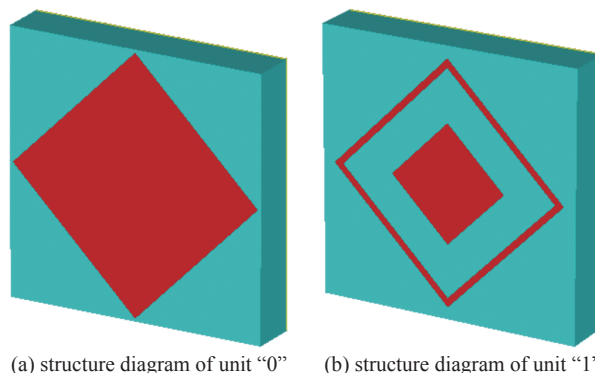


Fig. 1 Structure diagram of unit “0” and “1”

图 1 单元“0”与“1”的结构示意图

表 1 “0”结构参数

Table 1 Structure parameters of unit ‘0’

frequency/THz	medium thickness/ μm	aluminum thickness/ μm	perovskite thickness/ μm	structure length/ μm	diagonal length of perovskite/ μm
0.1	160	1.6	1.6	880	860
1	20	0.2	0.2	110	95
2	20	0.2	0.2	110	36
6	4	0.04	0.04	22	17

表 2 “1”结构参数

Table 2 Structure parameter of unit ‘1’

frequency/THz	medium thickness/ μm	aluminum thickness/ μm	perovskite thickness/ μm	structure length/ μm	center diagonal length/ μm	inside diameter of outer frame/ μm	outer diameter of outer frame/ μm
0.1	160	1.6	1.6	880	390	740	800
1	20	0.2	0.2	110	68	96	104
2	20	0.2	0.2	110	51	96	104
6	4	0.04	0.04	22	17	19	20

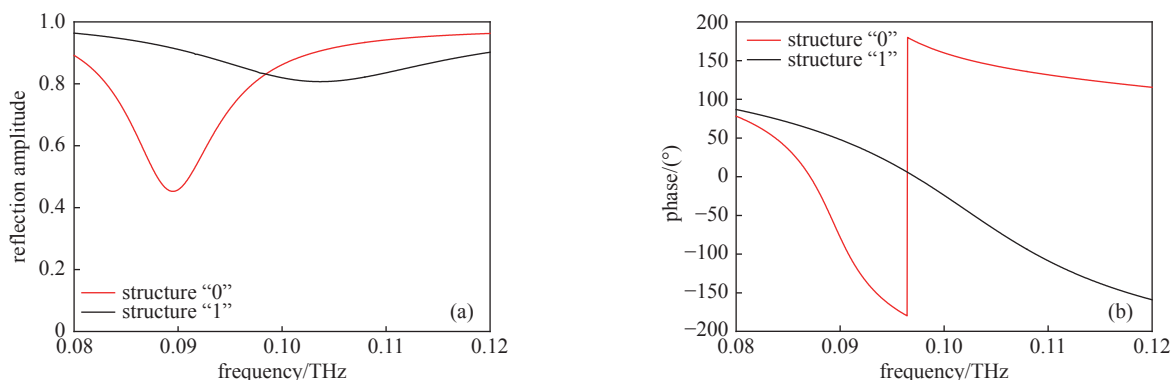


Fig. 2 0.1 THz reflection amplitude and reflection phase

图 2 0.1 THz 反射振幅与反射相位

2 编码超表面远场仿真

为了实现编码超表面对于电磁波的主动调控, 利用电磁场 CST Microwave Studio 软件进行了不同序列的编码超表面以及不同频率下的远场散射特性进行模拟仿真。如图 6 所示, 其中红色材料为光照下钙钛矿, 橙色材料为

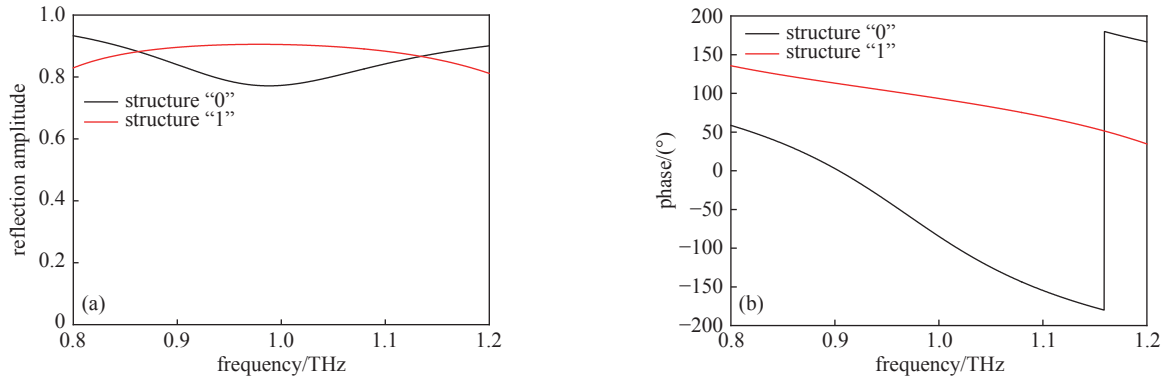


Fig. 3 1 THz reflection amplitude and reflection phase

图 3 1 THz 反射振幅与反射相位

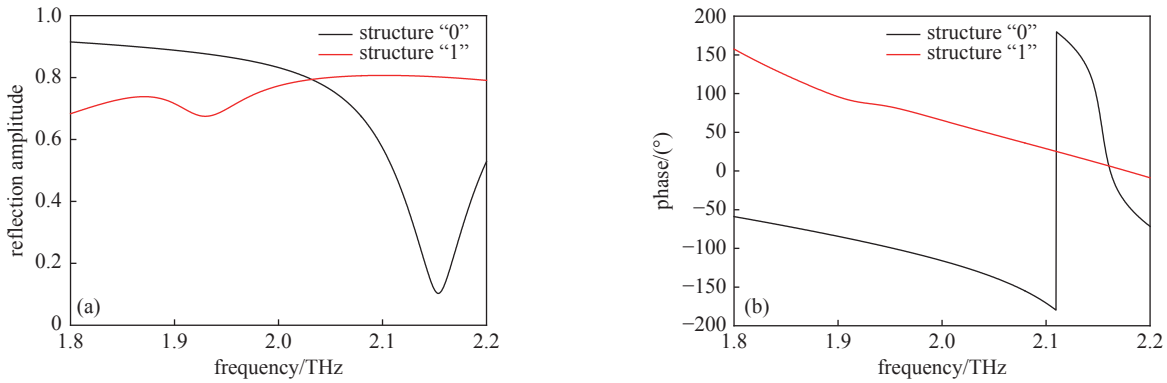


Fig. 4 2 THz reflection amplitude and reflection phase

图 4 2 THz 反射振幅与反射相位

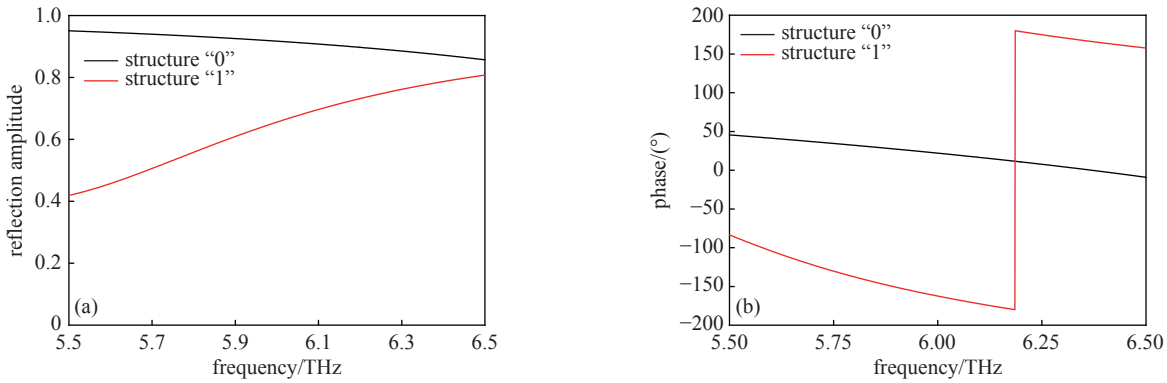


Fig. 5 6 THz reflection amplitude and reflection phase

图 5 6 THz 反射振幅与反射相位

无光下钙钛矿。为了实现不同调控模式,将分别仿真不同频率下编码超表面经典序列 0101/0101 和 0101/1010。值得一提的是,对于远场散射,为了增大物理尺寸以及降低相邻不同单元之间的影响,编码序列的每一个数字代表一个 $N \times N$ 的超级子单元,这里选择的是 4×4 ^[25-27]。

对于平面波垂直入射编码超表面时,若是反射波束为明显的多波束,每一束能量都较低,即可有效缩减雷达散射截面,中心束越不明显雷达散射截面缩减效果越好。与之相反,若反射波束为单独垂直向上波束(即仰角 $\theta = 0^\circ$)则可以视为对雷达散射截面缩减没有贡献。对于反射波为多波束的结构,其波束仰角计算式

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{NP} \quad (3)$$

式中: λ 是自由空间波长; P 表示编码序列周期长度。

利用公式(3)计算 0.1 THz 与 1 THz 时的波束仰角 θ , 可得仰角 θ 分别为 58.40° 与 42.99° 。图 6 与图 7 分别为 0.1 THz 与 1 THz 频率平面波垂直入射时的远场波束反射方向图。图 6(b)、(d) 与图 7(b)、(d) 为无光照状态下的钙钛矿编

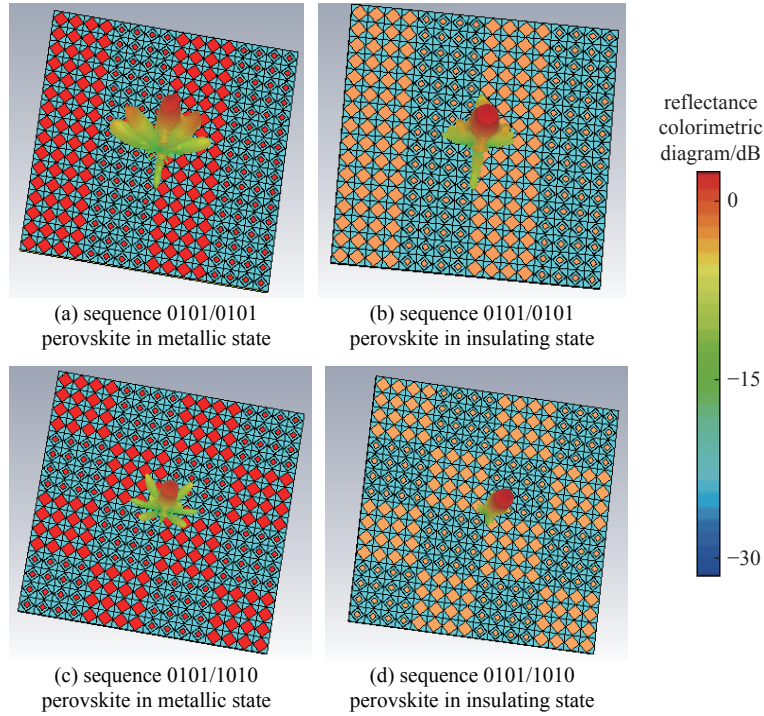


Fig. 6 Far-field diagrams of 0.1 THz compared with reflectance colorimetric diagram

图 6 0.1 THz 的远场示意图与反射率比色图对比

码超表面, 其反射波位于只有中心的 1 束, 无法有效实现雷达散射截面的缩减; 而光照下, 0101/0101 结构的编码超表面波束为 3 束, 如图 6(a) 与图 7(a) 所示, 0101/1010 结构的编码超表面波束为 5 束 (图 6(c)), 均可有效实现雷达散射截面缩减。从图 6 和图 7 中可以看到, 仿真结果中仰角 θ 与利用公式 (3) 的计算结果相吻合, 证明了理论计算的准确性。

图 8 与图 9 分别为 2 THz 与 6 THz 频率平面波垂直入射时的远场波束反射方向图, 可以看到: 图 8(b)(d) 与图 9(b)(d) 与为无光照状态下的钙钛矿编码超表面, 其反射波只有中心的 1 束, 无法有效实现雷达散射截面的缩减; 而光

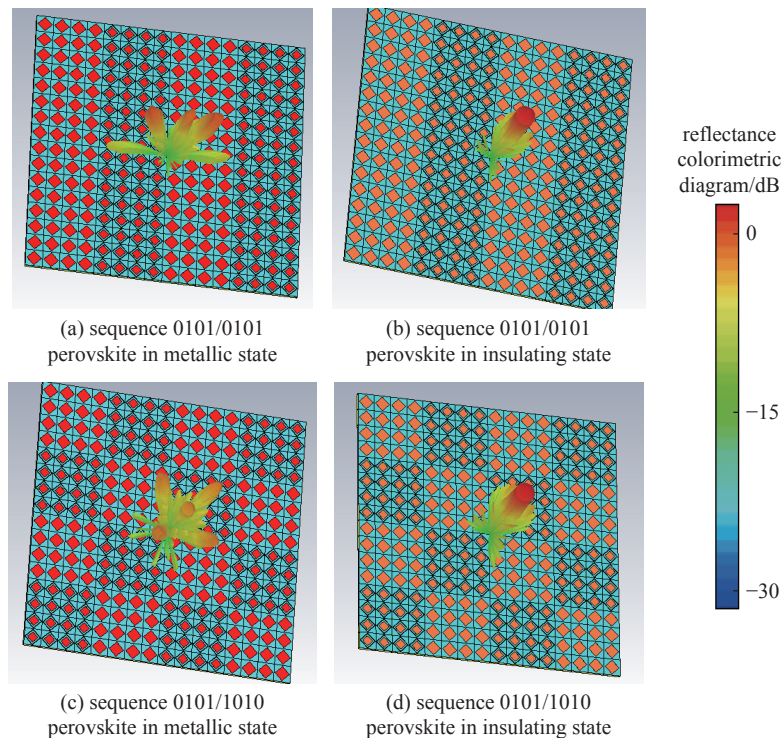


Fig. 7 Far-field diagrams of 1 THz compared with reflectance colorimetric diagram

图 7 1 THz 的远场示意图与反射率比色图对比

照下超表面, 0101/0101 结构的编码超表面其波束为 2 束, 如图 8(a)与图 9(a)所示; 0101/1010 结构的编码超表面波束如图 8(c)与图 9(c)所示, 可以观察到图 9(c)完全没有中心束, 可以有效缩减雷达散射截面。

从图 6~图 9 可以看到: 当钙钛矿在有光状态下, 即金属态下, 垂直入射的平面波被棋盘序列 0101/0101 均匀地反射到了 2 个不同方向上, 被棋盘序列 0101/1010 均匀反射到了 4 个不同方向上。这是因为编码电磁超表面, 在对应频率处 0 和 1 的反射相位差接近 180° , 两单元存在相消散射特性, 所以散射波分布在多个方向, 基本是在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 由能量守恒原理可知, 各个方向的散射波分布的能量都比入射要小, 因此本设计均可以有效缩减雷达散射截面; 当钙钛矿处于无光状态下, 即绝缘态下, 两个结构垂直入射的平面波产生镜面反射, 对 RCS 缩减几乎毫无

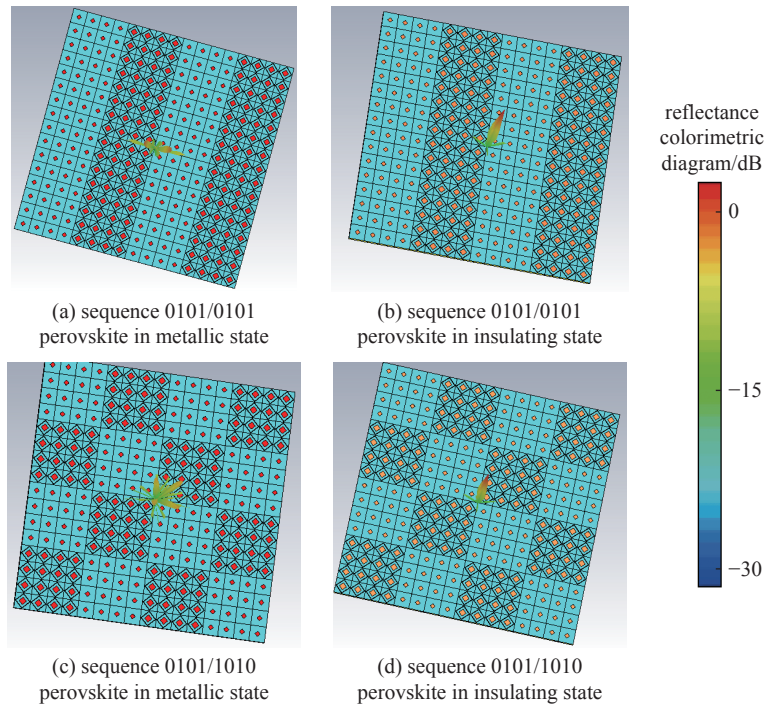


Fig. 8 Far-field diagrams of 2 THz compared with reflectance colorimetric diagram
图 8 2 THz 的远场示意图与反射率比色图对比

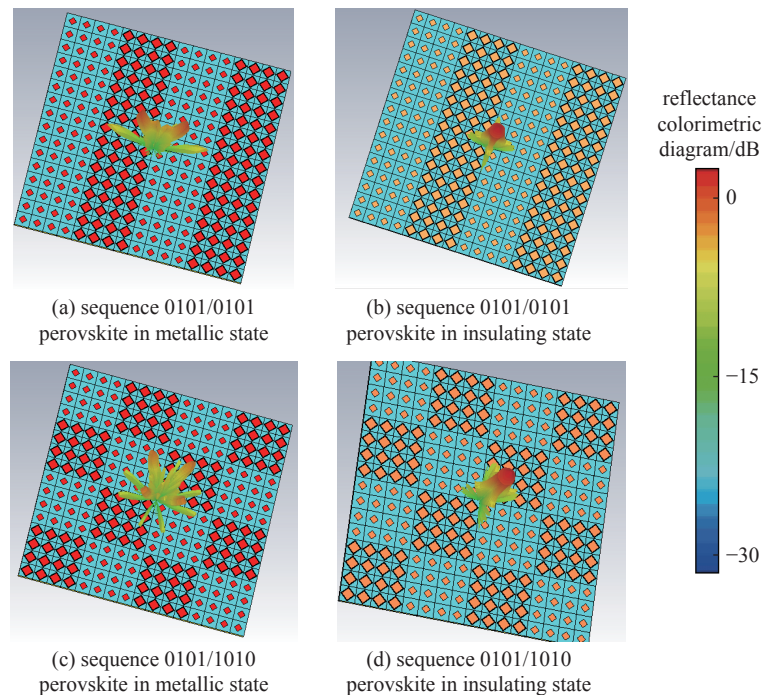


Fig. 9 Far-field diagrams of 6 THz compared with reflectance colorimetric diagram
图 9 6 THz 的远场示意图与反射率比色图对比

作用。因此,通过调整光照,可以改变本编码超表面的工作状态,方便灵活调控太赫兹。

3 结 论

目前新型钙钛矿材料由于其优异的光电特性在通信等领域有着极高的科研价值,已经成为高稳定光电器件最有前途的候选材料之一。基于钙钛矿高效低成本等优点,将其应用于太赫兹超材料的活性材料,通过外部激励改变活性材料的属性,可灵活调控太赫兹波。本文利用外加光场调控钙钛矿,在不同频率设计了多种超表面结构,分析在光场作用前(绝缘态)和在光场作用后(金属态)两种状态对单元结构太赫兹宽波段下幅值和相位的影响,实现对波束的调控。通过 CST 在每个频率仿真了 2 种阵列排布方式,使得波束可以沿 2 个方向或 4 个方向反射,实现远场波束的变换。

致 谢 感谢成都信息工程大学李杰老师提供的帮助与指导;感谢河北大学研究生胡家敏、贾一鸣提供的帮助。

参考文献:

- [1] 范玉衡, 杨闯, 彭木根. 感知协同太赫兹多天线移动通信: 原理、现状与展望[J]. 移动通信, 2023, 47(3): 84-91. (Fan Yuheng, Yang Chuang, Peng Mugen. Sensing-aided terahertz MIMO mobile communication: Principle, status and prospect[J]. Mobile Communications, 2023, 47(3): 84-91)
- [2] 邓新新, 刘炳伟, 刘竞博, 等. 太赫兹超材料生物检测应用研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(11): 1113-1122. (Deng Xinxin, Liu Bingwei, Liu Jingbo, et al. Research progress of terahertz metamaterials in biological detection applications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(11): 1113-1122)
- [3] 吕钟鸣, 吴静珠, 杨佳滢, 等. 太赫兹衰减全反射技术对花生冻伤快速判别研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 23-29. (Lü Zhongming, Wu Jingzhu, Yang Jiaying, et al. Rapid identification of peanut frostbite based on terahertz attenuated total reflection technique[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(5): 23-29)
- [4] 姚建铨, 李杰, 张雅婷, 等. 太赫兹波调控技术: 驾驭太赫兹之光[J]. 自然杂志, 2023, 45(1): 1-16. (Yao Jianquan, Li Jie, Zhang Yating, et al. Technology for terahertz wave manipulation: harnessing the light of terahertz[J]. Chinese Journal of Nature, 2023, 45(1): 1-16)
- [5] 刘峻峰, 刘硕, 傅晓建, 等. 太赫兹信息超材料与超表面[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 46-55. (Liu Junfeng, Liu Shuo, Fu Xiaojian, et al. Terahertz information metamaterials and metasurfaces[J]. Journal of Radars, 2018, 7(1): 46-55)
- [6] 梅中磊, 张黎, 崔铁军. 电磁超材料研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 27-39. (Mei Zhonglei, Zhang Li, Cui Tiejun. Recent advances on metamaterials[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(18): 27-39)
- [7] 张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 1-12. (Zhang Lei, Liu Shuo, Cui Tiejun. Theory and application of coding metamaterials[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 1-12)
- [8] Consales M, del Villar I, Matias I R, et al. Lab on fiber technology towards advanced and multifunctional point-of-care platforms for precision medicine[M]//Narayan R. Encyclopedia of Sensors and Biosensors. Elsevier, 2023, 4: 504-527.
- [9] Yu Nanfang, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [10] 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. (Zhang Lei, Chen Xiaoqing, Zheng Yining, et al. Electromagnetic metasurfaces and information metasurfaces[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(6): 817-828)
- [11] 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. 光电工程, 2017, 44(3): 255-275,376. (Li Xiong, Ma Xiaoliang, Luo Xiangang. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 255-275,376)
- [12] Cui Tiejun, Qi Meiqing, Wan Xiang, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [13] 高峰, 朱晨岳, 李景悦, 等. 基于氧化铟锡主动超表面的相位调制[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59: 0405001. (Gao Feng, Zhu Chenyue, Li Jingyue, et al. ITO-based active metasurfaces with phase tunability[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59: 0405001)
- [14] Zhang Xin'ge, Jiang Weixiang, Jiang Haolin, et al. An optically driven digital metasurface for programming electromagnetic functions[J]. Nature Electronics, 2020, 3(3): 165-171.
- [15] 韩飞, 王玲玲, 林媛, 等. 有机硅在钙钛矿太阳能电池中的应用[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(1): 12-27. (Han Fei, Wang Lingling, Lin Yuan, et al. Application of organosilicon in perovskite solar cells[J]. Journal of Ceramics, 2023, 44(1): 12-27)
- [16] 姚鑫, 丁艳丽, 张晓丹, 等. 钙钛矿太阳能电池综述[J]. 物理学报, 2015, 64: 038805. (Yao Xin, Ding Yanli, Zhang Xiaodan, et al. A review of the perovskite solar cells[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64: 038805)
- [17] 陆新荣, 赵颖, 刘建, 等. ABX₃型钙钛矿光伏材料的结构与性质调控[J]. 无机化学学报, 2015, 31(9): 1678-1686. (Lu Xinrong, Zhao Ying, Liu Jian, et al. Modulation of the structure and property of ABX₃ type perovskite photovoltaic material[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2015, 31(9): 1678-1686)
- [18] 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: 158101. (Yan Xin, Liang Lanju, Zhang Yating, et al. A coding metasurfaces used for wideband radar cross section reduction in terahertz frequencies[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64: 158101)
- [19] 李佳辉, 张雅婷, 李吉宁, 等. 基于二氧化钒的太赫兹编码超表面[J]. 物理学报, 2020, 69: 228101. (Li Jiahui, Zhang Yating, Li Jining, et al. Terahertz coding

- metasurface based vanadium dioxide[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69: 228101)
- [20] 李增霖, 唐华伟, 徐文霞, 等. 太赫兹波束可调谐的编码超表面设计[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 932-937. (Li Zenglin, Tang Huawei, Xu Wenxia, et al. Coding metasurface design for terahertz beam shaping[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(6): 932-937)
- [21] Li Jie, Zhang Yating, Li Jining, et al. Amplitude modulation of anomalously reflected terahertz beams using all-optical active Pancharatnam-Berry coding metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(12): 5746-5753.
- [22] Wang Hailin, Ma Huifeng, Cui Tiejun. A polarization-modulated information metasurface for encryption wireless communications[J]. *Advanced Science*, 2022, 9: 2204333.
- [23] Li Yifan, Zhang Yating, Li Tengeng, et al. Ultrabroadband, ultraviolet to terahertz, and high sensitivity $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite photodetectors[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(8): 5646-5654.
- [24] Wilson J N, Frost J M, Wallace S K, et al. Dielectric and ferroic properties of metal halide perovskites[J]. *APL Materials*, 2019, 7: 010901.
- [25] 李培, 刘颖, 李鹏, 等. 基于极化旋转超表面的天线 RCS 减缩方法[J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36(5): 84-89. (Li Pei, Liu Ying, Li Peng, et al. An antenna RCS reduction method based on polarization conversion meta-surface[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2021, 36(5): 84-89)
- [26] 庄亚强, 张晨新, 张小宽, 等. 典型隐身飞机动态 RCS 仿真及统计分析[J]. 微波学报, 2014, 30(5): 17-21. (Zhuang Yaqiang, Zhang Chenxin, Zhang Xiaokuan, et al. Statistical analysis and simulation of typical stealth aircraft dynamic RCS[J]. *Journal of Microwaves*, 2014, 30(5): 17-21)
- [27] 李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 等. 宽频带雷达散射截面缩减相位梯度超表面的设计及实验验证[J]. 物理学报, 2014, 63: 084103. (Li Yongfeng, Zhang Jieqiu, Qu Shaobo, et al. Design and experimental verification of a two-dimensional phase gradient metasurface used for radar cross section reduction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 084103)