

文章编号: 2095-4980(2019)03-0368-05

动态可调的太赫兹超构表面

王 腾^{1,2}, 张 岩^{1,2}

(1.首都师范大学 物理系, 北京 100048; 2.北京市超材料与器件重点实验室, 北京 100048)

摘要: 近年来, 采用人工设计金属阵列的超构表面以实现太赫兹波的调制受到越来越广泛的关注。设计了2种互补的亚波长金结构阵列超构表面, 正、反结构2个超构表面对太赫兹波均有共振响应。利用光泵浦太赫兹时域透射光谱系统, 通过控制泵浦光实现对太赫兹波的谱调制。仅需28 mW的外加泵浦光, 反结构超构表面在0.91 THz处的振幅调制深度可达到95%。利用该反结构超构表面对太赫兹波的开关作用, 进一步设计了太赫兹振幅全息图, 希望利用该结构实现太赫兹波前的动态调控。初步的理论模拟验证了这一方法的可行性, 可较好地实现对太赫兹波的动态调控。

关键词: 太赫兹波; 超构表面; 动态调控; 振幅全息

中图分类号: TN29; O439

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201903.0368

Dynamically tunable terahertz metasurface

WANG Teng^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2}

(1.Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2.Key Laboratory of Metamaterials and Devices, Beijing 100048, China)

Abstract: In recent years, the use of artificially designed metasurface of metallic arrays to achieve modulation of terahertz wave has received increasing attention. Two complementary metasurfaces of gold subwavelength structure array are proposed. Both of two metasurfaces, positive and negative structures, have resonance responses to terahertz wave. The optical control terahertz time-domain spectrum system is utilized to measure the spectral modulation of the terahertz wave by controlling the pump light. With pump light of 28 mW, the negative structure metasurface can have an amplitude modulation depth up to 95% at 0.91 THz. The amplitude holography is further designed by using this negative structure metasurface to modulate the terahertz wavefront. The simulation result demonstrates the feasibility of the proposed method. This approach can achieve dynamic modulation of terahertz wave, which is of great significance to the development of terahertz dynamic adjustable function devices.

Keywords: terahertz wave; metasurface; dynamic modulation; amplitude holography

太赫兹(Terahertz, THz)波介于微波与红外波之间, 其在无线通信、医学成像以及无损检测等方面独特的优越性已经普遍被认可。然而, 太赫兹材料和器件的缺乏, 已严重制约了太赫兹领域的发展, 其主要原因是绝大多数自然物质对太赫兹波没有电磁响应。人工结构电磁材料的出现解决了这一问题, 越来越多的超构表面设计实现了对太赫兹波的高效调控^[1-3], 超构表面的应用也已经涉及波片^[4]、全息图^[5]、矢量光束^[6]和非线性谐波产生^[7]等众多方向。但大多数超构表面的功能都是对太赫兹波的静态调控, 动态调控的研究成果目前为止还是较少。一个成功的超构表面从设计到加工都较为复杂, 通过不同方式对太赫兹波进行动态调控, 可以达到多种功能。常见的调控手段有光场调控^[8]、电场调控^[9-10]以及温度调控^[11]等。本文设计了2种动态可调的太赫兹超构表面, 该超构表面由亚波长金结构阵列组成。经太赫兹时域光泵浦透射系统的实验验证, 超构表面结构可通过光场调控的方式有效实现对太赫兹波的动态调控。在外加泵浦光仅为28 mW时, 在0.91 THz处的调制幅度就可达到95%。利用这种结构高效的振幅调控功能, 提出一种光场调控的太赫兹振幅调制器, 可在其上加载太赫兹振幅全息图, 实现对太赫兹波前的调控。

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1474206; 11404224; 1174243; 11774246)

1 光泵浦太赫兹时域透射系统

本文所用光泵浦太赫兹时域透射光谱系统如图 1 所示,它在传统的太赫兹时域光谱系统中增加了泵浦光投影部分。光源采用钛:蓝宝石再生放大器,具有 800 nm 中心波长、1 kHz 重复率、100 fs 超短脉冲和 900 mW 平均功率。入射波被分成 3 束,用作产生光束(490 mW)、探测光束(10 mW)和泵浦光束(400 mW)。实验中在泵浦光路加入衰减片,将泵浦光功率降为 28 mW。基于光学整流效应,当产生光束通过<110>ZnTe 晶体时,产生频率范围为 0.2~2.6 THz 的 X 偏振太赫兹脉冲。为主动调制 THz 光束,所使用的空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)可将泵浦光束变成所需的空强度分布,并通过放大率 1.0 的透镜将图案投影到样品上,系统中使用第二个<110>ZnTe 晶体通过电光采样的方法检测透射的太赫兹波。太赫兹光束和泵浦光束之间的延迟时间 τ 由泵浦光路中的电动平移台控制。为了探测到泵浦光束有效作用于样品上的实验结果,要求 $\tau > 0$,即泵浦光束早于太赫兹脉冲到达样品处,意味着在自由载流子被激发之后太赫兹脉冲再到达样品。在实验中,太赫兹脉冲在光激发后约 20 ps 通过样品,即 $\tau = 20$ ps。硅衬底中光生载流子的寿命为几微秒,光生载流子的响应时间约为 3 ps^[12-13]。因此,延迟时间比光载流子的响应时间长,可以有效激发载流子,并且比光生载流子寿命短得多,可以保持投影产生的光生载流子分布扩散不严重。同时因为太赫兹脉冲仅有 2 ps,因此,可以认为泵浦光束产生的载流子分布基本上是静态的。

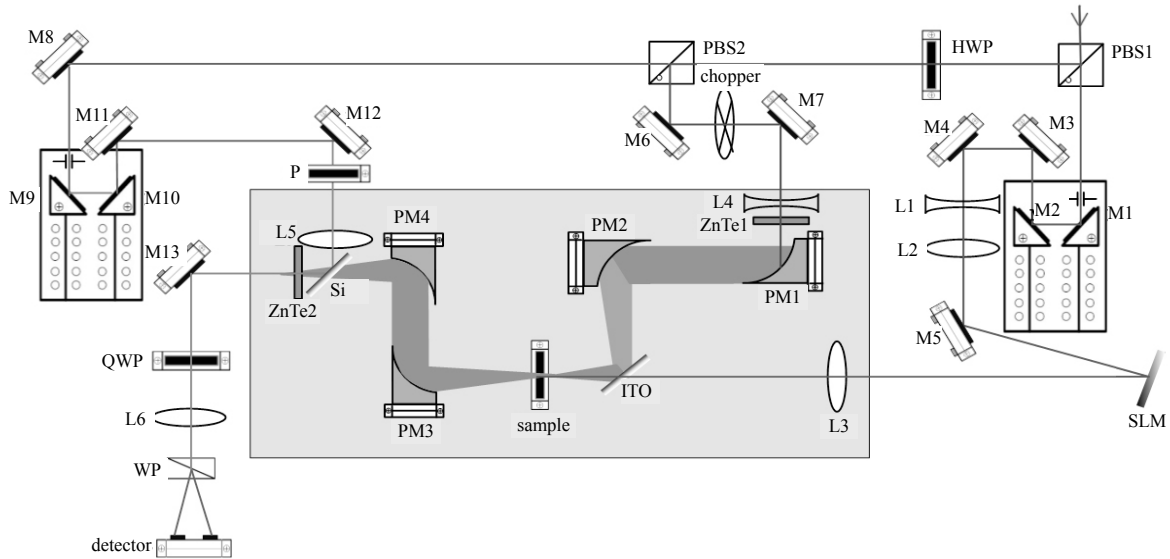


Fig.1 Optical pump terahertz time-domain spectrum system
图 1 光泵浦太赫兹时域透射光谱系统

2 实验结果与分析

2 种互补的亚波长金结构阵列超构表面的基底为硅-蓝宝石,硅层厚 600 nm,固有电阻率为 100 Ω /cm,蓝宝石衬底厚 530 μ m,金结构厚 200 nm,结构单元周期为 50 μ m。正结构指基底上所设计亚波长结构为金材质,反结构指基底上为均匀金层,结构部分为镂空。图 2 是 2 种样品的显微镜图。图 3 为实验测量得到的 2 个样品在不同外加光泵浦下的太赫兹透射光谱。如图 3(a)所示,在没有泵浦光作用时,正结构在 0.96 THz 处有一主要共振吸收峰,透过率仅为 9%。虽然其他位置也有小峰出现,但整体透过率均高于 50%。依次使用功率为 15 mW, 28 mW, 38 mW, 46 mW 和 56 mW 泵浦光作用在样品上后,正结构样品透过率整体大幅下降,并随着泵浦光功率增加,透过率降低。不难看出,正结构样品在除 0.96 THz 共振吸收峰外的范围内,在光控作用下对 THz 波的调制

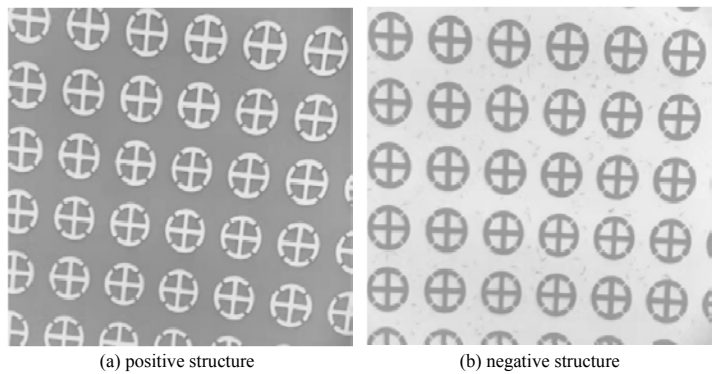


Fig.2 Micrographs of the two samples
图 2 样品显微镜图

效果明显。当 28 mW 的泵浦光束照射在样品上时,整个太赫兹时域光谱有效范围内的透过率都降低到 10%左右。如图 3(b)所示,反结构样品在 0.91 THz 处有一透过峰,峰值为 50%。与正结构样品相似,在泵浦光作用下,样品整体透过率明显降低。当 28 mW 的泵浦光束照射在样品上时,整个范围内的透过率都降低到 5%以下,0.91 THz 处的透过率为 4.6%。仅需 28 mW,该样品在 0.91 THz 的调制深度达到 95%。在未加泵浦光时,两样品的透过率曲线为自身金属结构对太赫兹波的响应,而 2 个样品共振频率略有不同,原因是实验中光谱分辨力为 0.029 THz,由于样品制备工艺及实验误差,导致两样品共振频率相差两个频点。外加泵浦光后,硅层激发出大量光生载流子,电导率增加,相当于弱金属化,对太赫兹波有阻碍作用,故透过率均大大降低。而同样在施加泵浦光束,硅层弱金属化的条件下,反结构样品的透过率整体比正结构样品低,主要是因为反结构本身金属面积更大,透过率更低。综上,外加光场调控对 2 个样品太赫兹波的透过率调制作用明显,2 个样品对太赫兹波的开关作用显著。

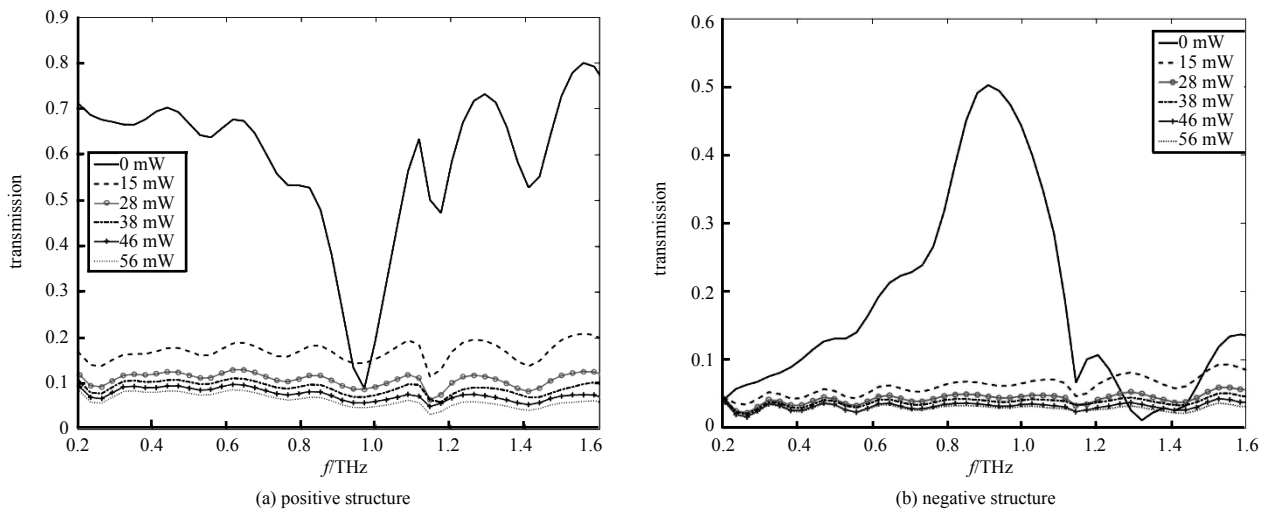


Fig.3 THz transmission spectra of the two samples
图 3 2 个样品的 THz 透射光谱

3 振幅全息

利用反结构样品在 0.91 THz 处的低阈值高调制深度,可通过泵浦光路里的空间光调制器投影强度分布图来控制样品上每一个结构单元对太赫兹波的透过率,并利用振幅全息图的原理,实现对太赫兹波的振幅和相位调制。根据干涉原理,设物光为 O , 参考光为 R , 物光和参考光的夹角为 θ , 则全息图强度分布 I 为:

$$I = (O + R e^{i\theta})(O + R e^{i\theta})^* = |O|^2 + |R|^2 + OR^* e^{i\theta} + O^* R e^{i\theta} \quad (1)$$

用参考光 R 照射全息图, 得到恢复的目标图像 A :

$$A = I R e^{i\theta} = |O|^2 R e^{i\theta} + |R|^2 R e^{i\theta} + O |R|^2 + O^* R^2 e^{2i\theta} \quad (2)$$

式(2)中前 2 项为直流项, 第 3 项为物光项, 即需要恢复重建的部分, 第 4 项是物光的共轭像。

对太赫兹振幅全息进行数值模拟, 所有参数选择实验中参数。具体结果如图 4 所示, 图 4(a1)~(c1)为目标图, 图 4(a2)~(c2)为对应的振幅全息图, 图 4(a3)~(c3)为模拟出的对应恢复重建出的目标图, 为了显示方便, 途中滤掉了直流项, 恢复图可明显看出为对应的目标图的 3 个字母“C”, “N”和“U”。

这一实验需要搭建光泵浦太赫兹成像系统, 在参考文献[14-15]中太赫兹焦平面成像系统的基础上加入泵浦光一路, 实现外加光场调控。其中, 用来投影全息图强度分布的可见光空间光调制器的像素数为 912×1140 , 像素大小为 $7.6 \mu\text{m} \times 7.6 \mu\text{m}$ 。为了使太赫兹全息图准确作用在样品上, 还需要在实验过程中根据搭建的光泵浦太赫兹成像系统的实际情况来修正计算得到的全息图, 具体包括两方面: 第一, 样品周期为 $50 \mu\text{m}$, 根据空间光实际投影在样品处的光斑和像素的大小, 修改太赫兹振幅全息图的大小; 第二, 测量泵浦光为 28 mW 时空间光调制器投影出的不同灰度对应样品的透过率, 根据结果修正投影光的强度, 得到正确的太赫兹全息图的强度分布。由成像系统中 CCD 采集每一点的时域信号, 经傅里叶变换后可得到各个频率下的信号, 然后提出 0.91 THz 的图像, 即太赫兹振幅全息的恢复图。

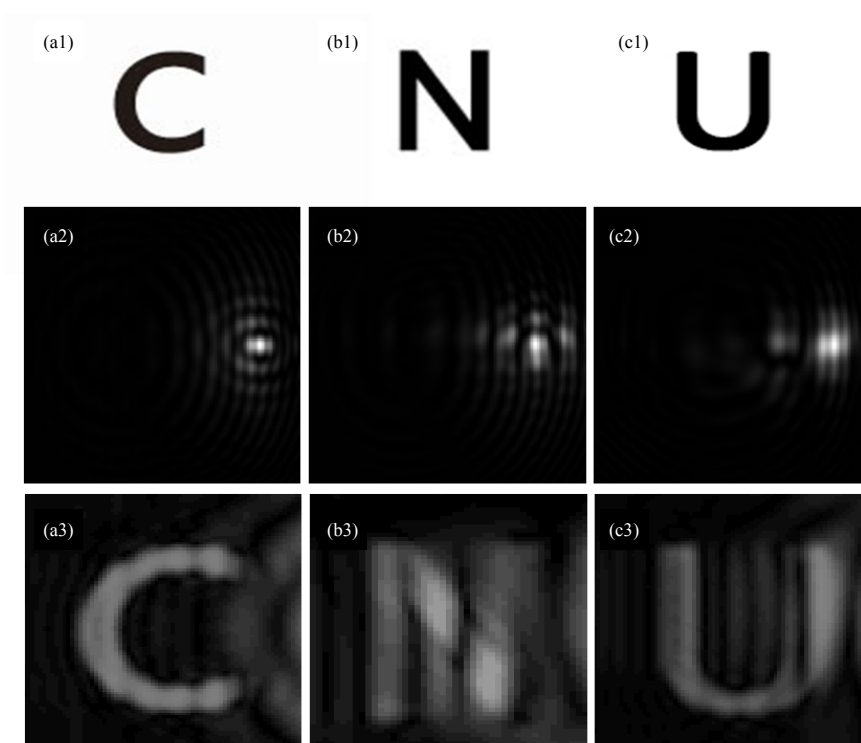


Fig.4 Amplitude holography(a1-c1) target images; (a2-c2)amplitude holograms; (a3-c3)recovery reconstruction images
图4 振幅全息(a1~c1) 目标图; (a2~c2) 振幅全息图; (a3~c3) 恢复重建图

4 结论

本文提出了2种互补的纳米金结构阵列超构表面,结构阵列置于硅-蓝宝石基底上。利用光泵浦太赫兹透射光谱系统对样品进行了实验测量,实验结果表明:施加泵浦光束对2个样品在太赫兹波段的振幅调制效果明显。泵浦光为28 mW时,反结构的调制深度高达95%。结合空间光调制器投影全息图,设计了太赫兹振幅全息,模拟结果显示恢复图效果良好,可以实现对太赫兹波的振幅和相位调控。本文提出的超构表面实现了对太赫兹波的动态调控,将进一步推动太赫兹波段动态可调功能器件的发展进程。

参考文献:

- [1] XIE Z,WANG X,YE J,et al. Spatial terahertz modulator[J]. Scientific Reports, 2013,3(11):3347.
- [2] ZHAO H,QUAN B,WANG X,et al. Demonstration of orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing based on metasurface in terahertz band[J]. ACS Photonics, 2018,5(5):1726-1732.
- [3] 王波,张岩. 太赫兹超材料和超表面器件的研发与应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):1-12. (WANG Bo,ZHANG Yan. Design and applications of THz metamaterials and metasurfaces[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1):1-12.)
- [4] PORS A,NIELSEN M G,BOZHEVLNYI S I. Broadband plasmonic half-wave plates in reflection[J]. Optics Letters, 2013, 38(4):513-517.
- [5] WANG Q,ZHANG X,XU Y,et al. Broadband metasurface holograms:toward complete phase and amplitude engineering[J]. Scientific Reports, 2016(6):32867.
- [6] GUO J Y,WANG X K,HE J W,et al. Generation of radial polarized Lorentz beam with single layer metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2017,6(1):1700925-1-6.
- [7] CHEN S,LI G,ZEUNER F,et al. Symmetry-selective third-harmonic generation from plasmonic metacrystals[J]. Physical Review Letters, 2014,113(3):033901.
- [8] HE J W,WANG X K,XIE Z W,et al. Reconfigurable terahertz grating with enhanced transmission of TE polarized light[J]. APL Photonics, 2017,2(7):076102.
- [9] CHEN H T,PADILLA W J,ZIDE J M,et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. Nature, 2006,444(7119):597-600.

- [10] 崔轩,田浩,周忠祥. 基于频率选择平面的太赫兹波调制模拟[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):159-162. (CUI Xuan,TIAN Hao,ZHOU Zhongxiang. THz modulation fashioned with frequency selective surface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):159-162.)
- [11] PARROTT E P,HAN C,YAN F,et al. Vanadium dioxide devices for terahertz wave modulation:a study of wire grid structures[J]. Nanotechnology, 2016,27(20):205206.
- [12] WANG X,XIE Z,SUN W,et al. Focusing and imaging of a virtual all-optical tunable terahertz Fresnel zone plate[J]. Optics Letters, 2013,38(22):4731.
- [13] KANDA N,KONISHI K,KUWATA-GONOKAMI M. Dynamics of photo-induced terahertz optical activity in metal chiral gratings[J]. Optics Letters, 2012,37(17):3510.
- [14] WANG X,CUI Y,SUN W,et al. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection[J]. Journal of the Optical Society of America A:Optics Image Science & Vision, 2010,27(11):2387-2393.
- [15] WANG X,CUI Y,SUN W,et al. Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection[J]. Optics Communications, 2010,283(23):4626-4632.

作者简介:



王 腾(1993-),女,石家庄市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹超构表面。email:501983732@qq.com.

张 岩(1972-),男,北京市人,博士,教授,主要研究方向为太赫兹波谱与成像、微纳光学器件设计与光学数字全息。

第二届目标识别与人工智能高峰论坛

<https://b2b.csoe.org.cn/meeting/show-41.html>

中国光学工程学会将于 2019 年 8 月在沈阳市举办“第二届目标识别与人工智能高峰论坛”,深入研讨目标识别与人工智能及其相关技术。诚挚欢迎国内外相关领域的科研人员、教师、研究生等踊跃投稿。

主办单位: 国家自然科学基金委员会、中国工程院信息与电子工程学部、中国光学工程学会

承办单位: 中国光学工程学会、中国科学院沈阳自动化研究所

征文方向(包括但不限于):

3D 建模与识别

偏振成像、探测与识别

信号提取与目标检测

图像分割与匹配

多模信息融合技术

目标与光介质特性

智能感知与认知

深度学习

专家系统

医学图像处理与分析

其他

光谱成像、探测与识别

高灵敏红外成像技术

自动目标识别与跟踪技术

环境适应性问题

仿真与评估技术

目标建模与数据库

机器学习

智能计算及芯片

大数据技术

应用: 机器人视觉、智能视频监控、工业检测、遥感影像分析等

论文发表: 请作者登录网站提交论文全文,组委会请专家进行审稿。通过审查的稿件被大会录用。择优推荐到正式出版物发表。英文稿件,将被 SPIE 会议论文集(EI 检索)收录。中文稿件推荐至《红外与激光工程》(EI)、《光学精密工程》(EI)、《中国光学》(EI)、《机器人》(EI)、《光子学报》(EI)、《兵工学报》(EI)、《中国图象图形学报》(中文核心)、《模式识别与人工智能》(中文核心)、《信息与控制》(中文核心)、《太赫兹科学与电子信息学报》(中文核心)、《光学与光电技术》(科技核心)正刊出版。

投稿网址: <http://events.kjtxw.com/tougao/TRAI2019.html>

投稿截止时间: 2019 年 5 月 31 日(第一轮)

组委会: 刘艳,电子邮箱: liuyan@csoe.org.cn,联系电话: 022-58168510

更多详情请登录网站: <http://www.iaeej.com>