

文章编号: 2095-4980(2019)01-0029-06

基于硅基微结构高性能太赫兹波电控调制器

代朋辉, 唐亚华, 杨青慧, 张怀武, 文岐业*

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘 要: 通过硅基微结构与二氧化钒(VO_2)相变薄膜相结合, 设计并实现了一种电控太赫兹幅度调制器件。该调制器具有很高的太赫兹波透射率与极低的器件插损, 同时具有大的工作带宽和调制深度。仿真和实验测试结果表明, 该调制器对太赫兹波的增透响应带宽为 0.25~0.95 THz 波段。在 0.4~0.85 THz 频段内(约 450 GHz 宽带)的透射率超过 80%, 相较于硅衬底的透射率增加了 10% 以上, 且透射率最高可达 85%。对该器件电调控后, 调制深度可达 76% 以上, 器件透射率变化幅度可达 65%。因低插损、大调制幅度以及宽工作带宽, 该太赫兹调制器在太赫兹成像和通信系统中具有重要的应用价值。

关键词: 太赫兹波; 微米结构; 调制器; VO_2 薄膜; 绝缘体金属相变

中图分类号: TN304.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0029

High performance electrically modulators based on silicon microstructure with VO_2 films for terahertz applications

DAI Penghui, TANG Yahua, YANG Qinghui, ZHANG Huaiwu, WEN Qiye*

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: An electronically controlled terahertz amplitude modulation device is designed and implemented by integrating silicon-based microstructure with vanadium dioxide phase-change film. This device has a high transmittance of terahertz waves and very low insertion loss of the device, while having a large operating bandwidth and modulation depth. Simulation and experimental results show that the modulator's response bandwidth for the increased transmission effect of terahertz waves is 0.25–0.95 THz. The transmission of the modulator is over 80% in the frequency range of 0.4–0.85 THz, and compared with the transmission of high resistance silicon wafer, it is increased by over 10%. And the transmittance of the modulator can be up to 85%. After the device is electrically controlled, the modulation depth can reach more than 76%, and the change range of the modulator's transmittance can reach 65%. An important application value of the THz modulator is demonstrated in terahertz imaging and communication system, because of its low insertion loss, large modulation amplitude and wide working bandwidth.

Keywords: Terahertz waves; microstructure; modulator; VO_2 thin film; insulator-metal phase transition

太赫兹波是介于毫米波与红外光之间的电磁波谱, 其频率在 0.1~10 THz(波长 3 000~30 μm)^[1], 具有独特的电磁特性, 在电磁波谱中占据着重要位置。近年来太赫兹科学与技术迅猛发展, 已经在安检成像、无线通信、生物医学成像等领域发挥领先优势, 具有重要的应用前景^[2-7]。在这些应用中, 太赫兹成像与通信技术已受到越来越多的关注, 而太赫兹波调控器件是其系统中不可或缺的关键部件, 调控器件的优劣直接影响到整个太赫兹系统的性能好坏^[8]。

自然界中能够对太赫兹电磁响应的材料较少, 找到一种电磁响应材料显得尤为重要。具有绝缘体态—金属态

收稿日期: 2018-02-03; 修回日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51572042); 国家国际科技合作专项资助项目(2015DFR50870); 国家科学挑战计划资助项目(TZ2018003); 四川省科技支撑资助项目(2014GZ0091; 2015GZ0069; 2014GZ0003)

*通信作者: 文岐业 email: qywen@163.com

高速可逆相变特性的二氧化钒(VO_2)材料自1959年被发现以来^[9],在多个领域受到广泛关注。研究表明, VO_2 薄膜材料在热、电等外场作用下,由单斜相变化到金红石相,同时伴随有光谱特性和介电特性的显著变化^[10]。近年来, VO_2 材料在太赫兹调控领域的研究受到极大关注,展示了非常突出的太赫兹波调制特性^[11-12]。目前, VO_2 薄膜的制备方式主要有溶胶凝胶法、磁控溅射法、反应蒸镀技术以及化学气相沉积技术等,其中磁控溅射技术制备的 VO_2 薄膜具有薄膜均匀性好,结构致密及附着力强等优势,能在硅、二氧化硅及蓝宝石等多种衬底材料上制备质量上乘的薄膜。由于硅材料在自然界中储量丰富,性质稳定,工艺技术成熟,目前是集成电子技术的主流材料。以半导体硅为基础的太赫兹调制器能够与现有半导体工艺相兼容,因而具有重要的实际应用价值,逐渐成为太赫兹技术研究的热点。如WENT等提出一种硅基光控太赫兹调制器^[13],具有宽带调制特性,但这种光控型器件,由于硅衬底的折射率较高,太赫兹波在空气-硅衬底界面产生严重的反射,使得器件插损通常高达3~5 dB,而且由于采用光控技术,与现有高集成度电子器件也不相互兼容。

目前在太赫兹调控器件研究方面,按调控方式划分有热控、光控、电控等多种方式。其中热控和光控方式都需要外在加热部件和光源部件,增加了成本和系统集成的复杂性。电控技术无疑是更易于高度集成的一种调控方式^[14-15]。基于此,本文设计并实现了一种由硅基微米结构和 VO_2 相变薄膜相结合的电控型太赫兹幅度调制器件。该器件使用金属叉指电极驱动 VO_2 薄膜的相变。在 VO_2 薄膜相变前,具有微结构的硅衬底材料对太赫兹波有很高的透射幅度。而通过施加电压使得 VO_2 薄膜转变为金属态,器件对太赫兹波的透射大幅度减小,从而构成了一种电控型的太赫兹波幅度调制器件。该电控太赫兹调控器件具有插损小,调制深度大,工作频带宽,与半导体工艺兼容等优点,在太赫兹无线通信和成像等领域均具有潜在的应用价值。

1 实验过程

采用Microwave Studio CST软件仿真优化设计出一种微米结构,使得该微米结构模型对入射太赫兹波的透射率最大,最终定为双层台阶状方柱结构,如图1所示。其结构尺寸单元周期为 $100\text{ }\mu\text{m}$,上下两层方形边长分别为 $66\text{ }\mu\text{m}$ 和 $84\text{ }\mu\text{m}$,高度都为 $45\text{ }\mu\text{m}$ 。实验所制调控器件基片选用厚度 $500\text{ }\mu\text{m}$ 高阻本征硅片(电阻率 $>3\text{ }000\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$)。利用感应耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀技术,对本征硅材料进行预处理,目标表层结构为双层方柱。首先在本征硅上通过干法热氧化一层 $3\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 掩膜层,通过光刻版对 SiO_2 进行光刻,形成方形的 SiO_2 掩膜层,再通过ICP刻蚀技术刻蚀制作较大尺寸方柱。通过两步刻蚀工作,刻蚀出大小两层方柱,形成双层台阶状方柱结构^[16]。

电控调制器示意图如图1所示,太赫兹波以垂直角度入射到器件上表面。制得硅基微结构后,在图1所示衬底材料背部使用磁控溅射镀膜系统制备单晶 VO_2 薄膜,薄膜厚度为 $150\sim 200\text{ nm}$ 。在磁控溅射镀膜系统中,使用的靶材是2 inch高纯(99.95%)金属钒靶。当镀膜系统抽真空度至 $5\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 时,通过热电偶对基片材料加热到 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 后,通入高纯氩气与氧气,系统控制氧氩流量比约为1:20,在工作气压 1 Pa 下开启射频功率 $180\sim 220\text{ W}$,进行制备所需 VO_2 薄膜^[17]。通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)成像和X射线衍射仪分别验证生长样品的表面形貌和结晶质量。样品热滞回线通过具有加热功能的四探针平台测量。本文所使用的金叉指电极采用光刻和镀金技术进行制备,整个空间光调制器件的性能由太赫兹时域光谱(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)进行验证,详见文献[18-19]。

2 结果与讨论

本文所设计的实际上是一种双侧型器件,2个功能层分布于高阻硅衬底两侧,一侧起到太赫兹波增透的效果,另一侧起到太赫兹波透射幅度调控的作用,这一新颖结构可同时降低器件插损和实现大幅度快速调制。而这类对电磁波具有增透效果的结构属于介电周期结构的范畴,等效折射率理论^[20]常被用于推算此类结构的有效介电常数。把硅表面刻蚀成特定三维立体结构,依据等效折射率模型使硅衬底表层的折射率改变,在空气和硅衬底间形成渐变折射率结构组成增透构件,进而增加太赫兹波的透射幅度。理论上该硅基微结构可等效为3层:底层为硅

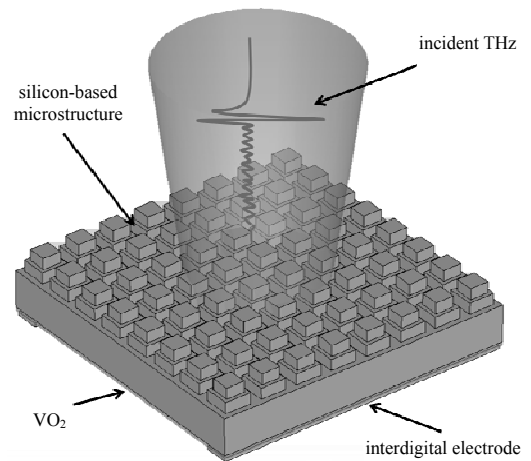


Fig.1 Schematic of the modulation device
图1 调制器件的结构示意图

介质层,上边 2 层为硅基方柱形结构,如图 2 所示。根据二阶有效介质理论(Effective Medium Theory, EMT)^[21-22],随波长变化的等效折射率可近似表示为^[23]:

$$n_{\text{eff},j} = \sqrt{f_j n_{\text{Si}}^2 + (1-f_j) n_{\text{air}}^2 + \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{a}{\lambda}\right)^2 f_j^2 (1-f_j^2) (n_{\text{Si}}^2 - n_{\text{air}}^2)} \quad (1)$$

式中: a 为单元周期; λ 为入射波波长; f_j 是等效每一层的填充率; n_{air} 和 n_{Si} 分别是空气和硅衬底的有效折射率。

从一层介质入射到另一层介质时,会伴随有反射和折射等现象。在无介质损耗情况下,增加透射即减小反射,为此在顶层和底层间,每层介质层的有效折射率尽量接近,即 $n_{\text{air}}, n_{\text{eff},1}, n_{\text{eff},2}, n_{\text{Si}}$ 成等差数列分布。每一层的填充率可表示为:

$$f_1 = S_a / S_p, f_2 = S_b / S_p \quad (2)$$

式中: S_a 和 S_b 分别是单元周期中上两层的横向面积; S_p 是每一层的单元周期的横向面积。

图 2 中右图为按照仿真尺寸加工出的硅基微结构 SEM 表面形貌。经测试,其表面尺寸与设计尺寸基本一致。通过透射式太赫兹时域光谱系统测试样品和对比硅片透射率,仿真结果和实验结果分别如图 3 所示。可以看出,实验测试结果和仿真结果基本接近,与预期一样。在软件仿真设计中,相对于硅晶圆片微结构只对 0.2~1.0 THz 波段内起增加透射作用;在实际对微结构测试中,其响应带宽变为 0.25~0.95 THz 波段;且在 0.40~0.85 THz 频段内的透射率超过了 80%,最高可达 85%。经计算,该调制器在 450 GHz 宽带内相比硅衬底的透射率增加了 10% 以上。

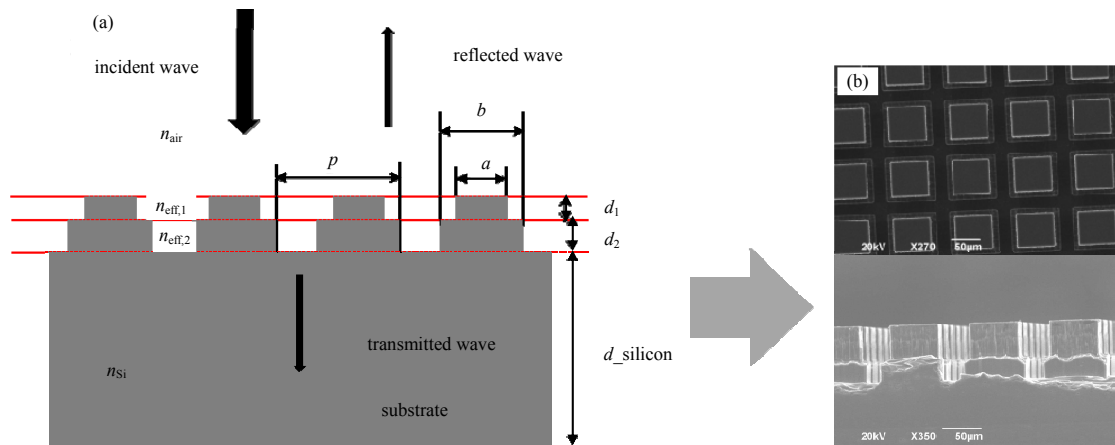


Fig.2 (a) Increasing transmission principle schematic of silicon-based microstructure and (b) its SEM

图 2 (a) 硅基微结构增透原理示意图; (b) 扫描电镜显微镜图

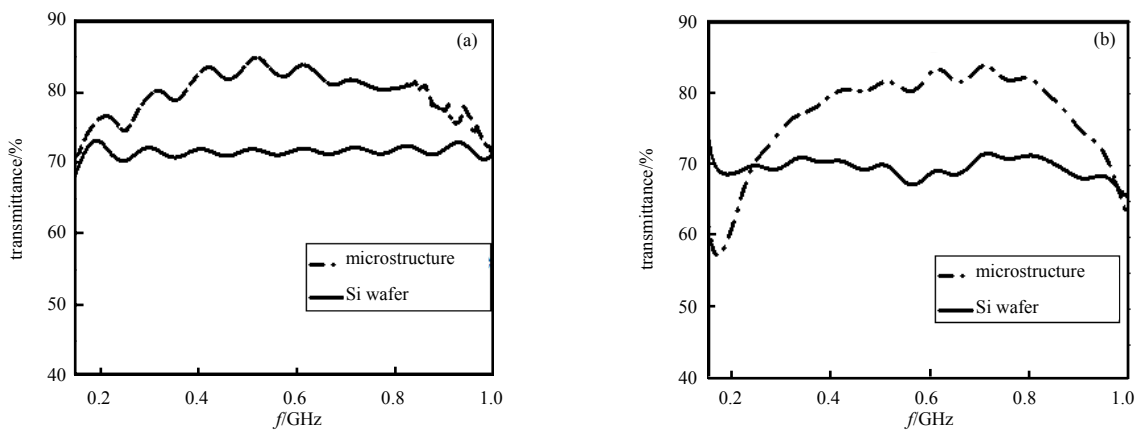


Fig.3 (a) the transmittance curves of silicon-based microstructures and silicon wafer substrates by CST simulation;

(b) the transmittance curves of silicon-based microstructures and silicon wafer substrates by actual tests

图 3 (a) 硅基微结构和硅晶圆衬底通过 CST 仿真的透射率曲线; (b) 硅基微结构和硅晶圆衬底通过实验实际测试的透射率曲线

电控调制器样品中的核心调制层为 VO_2 薄膜,扫描电镜观察结果表明该薄膜是典型的择优取向薄膜。为了驱动相变,由叉指电极加载偏置电压,电场与焦耳热的共同作用迅速驱动 VO_2 薄膜从绝缘相变化到金属相。金

属态的 VO_2 对太赫兹波产生较强的反射, 因此通过电控 VO_2 的相变达到调控太赫兹波透射幅度的作用。 VO_2 薄膜质量的好坏决定了相变前后电阻值的变化幅度, 直接影响到该电控调制器的调制深度。实验表明, 单晶态或者具有晶相择优取向的 VO_2 薄膜通常具有良好的相变特性。图 4(a)显示了所研制的 VO_2 薄膜 X 射线衍射图。图中只有 28° 位置这一个单一强峰, 经与 PDF 卡片数据对比分析, 该衍射峰为 $\text{VO}_2(011)$ 峰, 表明该薄膜具有良好的择优取向特性。插图中, SEM 图显示出 VO_2 薄膜晶粒尺寸约 200 nm, 且大小均匀、紧凑。 VO_2 薄膜质量的好坏还可以通过四探针测试其方阻-温度曲线(R - T)来表征, 也称作热滞回线。图 4(b)给出了 R - T 曲线的测试结果, 可以看到薄膜在室温下方阻超过 50 $\text{k}\Omega/\square$, 对薄膜加热至 80 $^\circ\text{C}$ 后相变过程完成, 其电阻下降为 15 $\Omega/\square$, 方阻前后变化超过 3 个数量级, 证实本文所研制的 VO_2 薄膜具有非常好的薄膜质量。

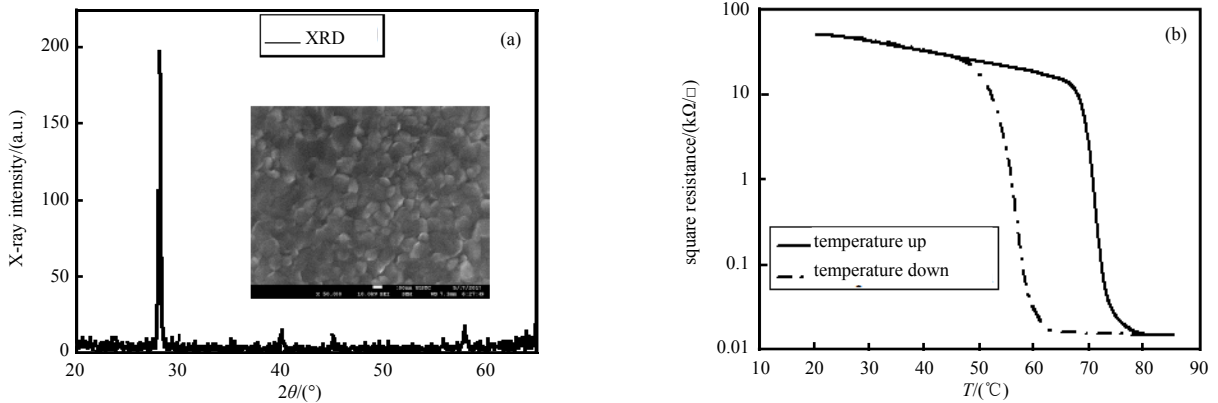


Fig.4 (a) X-ray diffraction pattern of a VO_2 thin film prepared directly on a silicon substrate;

(b) square resistance-temperature(R - T) curve for the prepared VO_2 film

图 4 (a) VO_2 薄膜直接制备在硅衬底上所测试的 X 射线衍射图谱; (b) 所制备薄膜的方阻-温度(R - T)曲线

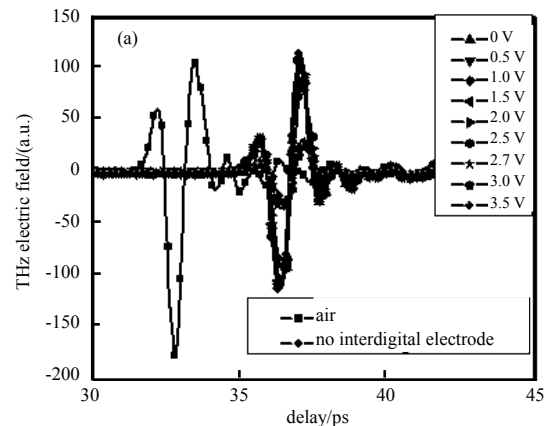
利用透射式 THz-TDS 系统研究调制器的电控调制特性。器件的太赫兹透射时域图谱、频域图谱、各频率点下透射率、最大调制深度和叉指电极对太赫兹波的透射率图谱如图 5 所示。图 5(c)透射率图谱中“*No interdigital electrode*”谱线为只在硅基微结构上制备好 VO_2 薄膜的样品透射率, 与图 3(b)只有硅基微结构的样品相比较, 可以看出相变前的 VO_2 薄膜对太赫兹波具有非常高的透射, 表现为薄膜电介质属性。本文所用的叉指电极经 CST 仿真优化后, 确定电极梳状金属线宽 6 μm , 金属线间距 6 μm 。图 5(c)中“0 V”曲线为制作叉指电极后不加电压测试的透射率曲线, 与无叉指电极样品相比, 太赫兹波透射仅仅降低大约 2%。根据图 5(c)中制作叉指电极前后所测试的透射率, 以未制作叉指电极做参考, 可以进一步处理数据得出叉指电极透射谱数据如图 5(e)所示, 该电极对太赫兹波的透射率可达 98%。叉指电极在太赫兹调制器电调控使用机理上, 通过太赫兹波与梳状周期金属线条间的电磁耦合作用, 使得电磁波穿过周期金属线条层时没有显著的能量损耗。但因其梳状电极是对电磁波极化敏感的周期结构, 实际应用时金属线条周期方向需与电磁波电场方向相匹配, 即电场方向平行于金属线条周期方向。本实验测试结果分析也体现了叉指电极对太赫兹波的低损耗特性。

图 5(c)中可以看出, 调制器所加电压在 2 V 之前基本不影响太赫兹波的透射, 表明此时 VO_2 薄膜为相变前的绝缘态。当该调制器电压加到 2.5 V 时, 太赫兹波透射强度开始减弱, 说明 VO_2 薄膜有部分薄膜晶粒开始相变为金属态, 导致整体薄膜电阻率开始降低, 起阻隔损耗太赫兹波的作用。当电压加到 3 V 以后, 太赫兹波透射幅度基本不变, 说明整层 VO_2 薄膜已完全相变成金属态。

式(3)为调制深度计算公式:

$$D_m = \frac{T_0 - T}{T_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: D_m 指调制器的调制深度; T_0 指调制前器件的透射率; T 指调制后器件的透射率。通过该公式计算出, 本文所制作的电控太赫兹调制器调制前后透射率变化高达 65%, 最大调制深度 D_m 为 76%, 如图 5(d)所示。



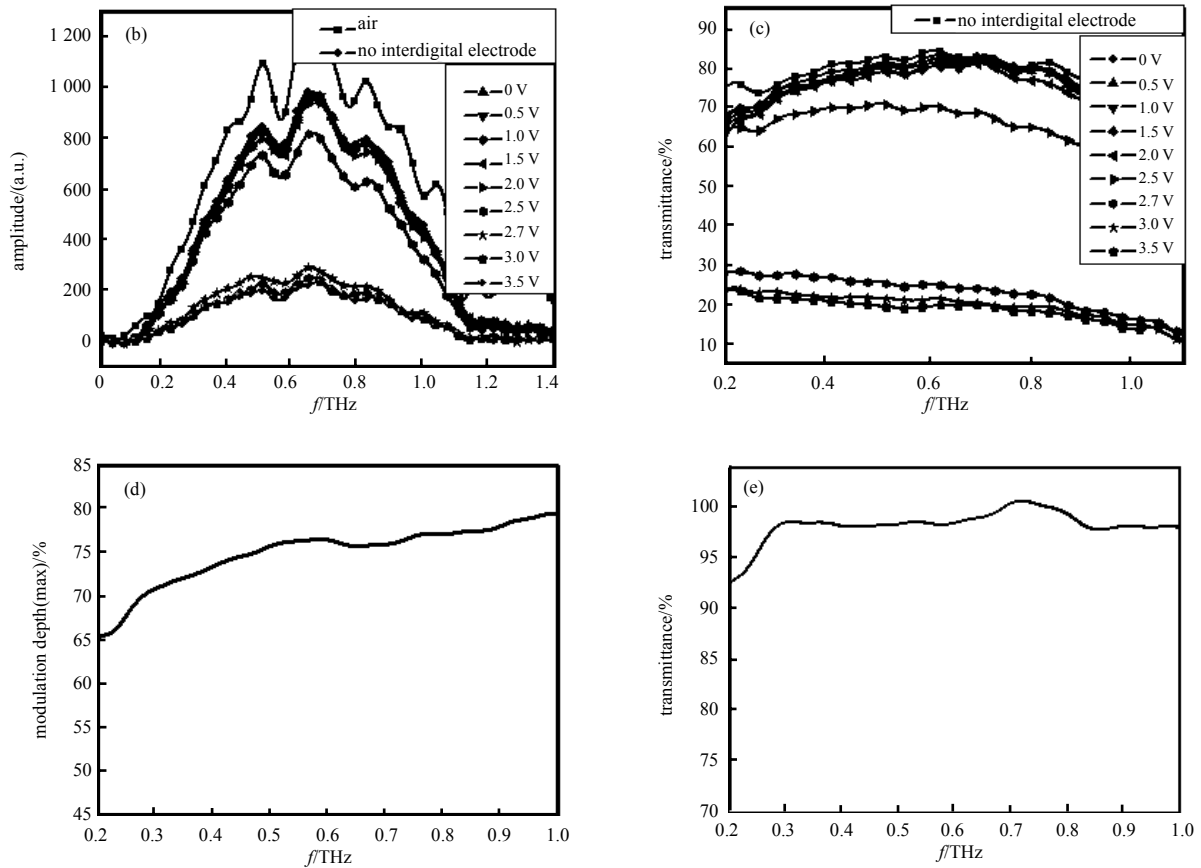


Fig.5 (a-b) are the actual test spectra and frequency domain transmission amplitude curves of air, the sample without the interdigital electrode, final sample after loading the voltage; (c) shows the transmittance curves of the sample without interdigital electrodes and voltage applied; (d) is the maximum modulation depth of the modulation device at every frequency; (e) is the transmittance curve of the interdigital electrode for THz wave in the experiment.

图 5 (a-b)分别为空气、无叉指电极样品、加载电压后样品的实际测试时域和频域谱线; (c)为无叉指电极和加载电压后样品的透射率曲线; (d)为该调制器件在各频率下的最大调制深度; (e)为实验测试中叉指电极对太赫兹波的透射率

3 结论

本文提出一种硅基电控太赫兹幅度调制器,对硅衬底表面进行深硅刻蚀,制作双层微米结构,对太赫兹波特定频率起增透作用;在微结构背部利用磁控溅射系统镀制一层 VO_2 相变薄膜,实现对太赫兹波透射的调控。利用叉指电极实现电调控。实验表明, VO_2 薄膜相变前,该调制器对太赫兹波的增透响应带宽为0.25~0.95 THz波段,且在0.40~0.85 THz频段内的透射率超过了80%,最高可达85%。经计算,该调制器在450 GHz宽带内,相比于硅衬底的透射率增加了10%以上。 VO_2 薄膜相变成金属态后,太赫兹透射幅度显著减小,器件的调制深度可达76%以上。该调制器可工作在较宽的频段,且具有加工工艺简单,成本低,插损小,调制深度大等优点,在太赫兹通信、成像等领域具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007,1(2):97-105.
- [2] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2002,50(3):910-928.
- [3] FEDERICI J F, SCHULKIN B, HUANG F, et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons, and drugs[J]. Semiconductor Science Technology, 2005,20(7):S266-S280.
- [4] ZHELUDEV N I, KIVSHAR Y S. From metamaterials to metadevices[J]. Nature Materials, 2012,11(11):917-924.
- [5] LIU A Q, ZHU W M, TSAI D P, et al. Micromachined tunable metamaterials: a review[J]. Journal of Optics, 2012,14(11): 114009.
- [6] SAVINOV V, FEDOTOV V A, ANLAGE S M, et al. Modulating sub-THz radiation with current in superconducting metamaterial[J]. Physical Review Letters, 2012,109(24):3904-3908.

- [7] WATTS C M, SHREKENHAMER D, MONTOYA J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8):605–609.
- [8] 李少谦, 陈智, 文岐业, 等. 太赫兹通信技术导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016. (LI Shaoqian, CHEN Zhi, WEN Qiye, et al. *Terahertz communications technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.)
- [9] MORIN F J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature[J]. *Physical Review Letters*, 1959, 3(1):34–36.
- [10] QIU Donghong, WEN Qiye, YANG Qinghui, et al. Electrically-driven metal-insulator transition of vanadium dioxide thin films in a metal-oxide-insulator-metal device structure[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2014, 27(1):140–144.
- [11] XIONG Ying, WEN Qiye, CHEN Zhi, et al. Tuning the phase transitions of VO₂ thin films on silicon substrates using ultrathin Al₂O₃ as buffer layers[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(45):5304.
- [12] WEN Qiye, ZHANG Huaiwu, YANG Qinghui, et al. A tunable hybrid metamaterial absorber based on vanadium oxide films[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(23):5106.
- [13] WEN Tianlong, ZHANG Chong, WEN Qiye, et al. Enhanced optical modulation depth of terahertz waves by self-assembled monolayer of plasmonic gold nanoparticles[C]// 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW–THz). Copenhagen, Denmark: IEEE, 2016. doi:10.1109/IRMMW–THz.2016.7758773.
- [14] WU B, ZIMMERS A, AUBIN H, et al. Electric-field-driven phase transition in vanadium dioxide[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(24):1410.
- [15] KIM H T, KIM B J, CHOI S, et al. Electrical oscillations induced by the metal-insulator transition in VO₂[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(6):069904.
- [16] PENG Y, ZANG X F, ZHU Y M, et al. Ultra-broadband terahertz perfect absorber by exciting multi-order diffractions in a double-layered grating structure[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3):2032–2040.
- [17] 熊琰. 硅基二氧化钒薄膜制备及在太赫兹开关器件方面的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2015. (XIONG Ying. *Preparation of silicon-based vanadium dioxide thin film and its application in terahertz switching devices*[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [18] FEPSSEN P U, FISCHER B M, THOMAN A, et al. Metal-insulator phase transition in a VO₂ thin film observed with terahertz spectroscopy[J]. *Physical Review B*, 2006, 74(20):205103.
- [19] NASHIMA S, MORIKAWA O, TAKATA K, et al. Measurement of optical properties of highly doped silicon by terahertz time domain reflection spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 79(24):3923–3925.
- [20] HAGGANS C W, LI L F, KOSTUK R K. Effective-medium theory of zeroth-order lamellar gratings in conical mountings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, 10(10):2217–2225.
- [21] PEI T H, THIYAGU S, PEI Z. Ultra high-density silicon nanowires for extremely low reflection in visible regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(15):3108.
- [22] WANG M, HU C, PU M, et al. Truncated spherical voids for nearly omnidirectional optical absorption[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21):20642–20650.
- [23] WHITE K W. Permittivity of a multiphase and isotropic lattice of spheres at low frequency[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(4):1962.

作者简介:



代朋辉(1991–), 男, 河南省商丘市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹调控器件等方面. email: uestcdph@163.com.

张怀武(1959–), 男, 陕西省汉中市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电子薄膜与集成器件等.

唐亚华(1995–), 女, 重庆市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹调控器件等.

杨青慧(1979–), 女, 辽宁省阜新市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 YIG 微波单晶体外延薄膜材料研究, 微波及磁光器件设计等.

文岐业(1976–), 男, 广西省桂林市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹功能器件等.