

文章编号: 2095-4980(2014)05-0644-04

基于二氧化钒薄膜的太赫兹开关器件

郭超^{1,2b}, 罗振飞^{2a,2b}, 王度^{2a,2b}, 孔维鹏^{2a,2b}, 孙年春¹, 杨存榜^{2b}, 周逊^{2a,2b*}

(1.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065; 2.中国工程物理研究院 a.太赫兹科学技术研究中心, 四川 绵阳 621999;
b.激光聚变研究中心, 四川 成都 610041)

摘 要: 二氧化钒(VO_2)作为一种优质的光电功能材料一直备受人们的关注, 在信息存储、光调制器、太阳能电池、光电探测器等方面有着重要应用。采用磁控溅射及原位退火氧化的“两步法”制备了 VO_2 薄膜, 并对其进行了晶态、形貌表征。设计并搭建 VO_2 薄膜热致相变实验系统, 研究了 VO_2 薄膜在变温条件下对 2.52 THz 辐射的开关特性。结果表明, VO_2 薄膜样品为多晶态, 具有明显的太赫兹调制效果, 可以实现对 2.52 THz 波的调制, 并可作为太赫兹开关/调制器件的功能材料。

关键词: 太赫兹; VO_2 薄膜; 开关器件; 热致相变

中图分类号: TN204

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201405.0644

Terahertz switching device based on vanadium dioxide thin film

GUO Chao^{1,2b}, LUO Zhen-fei^{2a,2b}, WANG Du^{2a,2b}, KONG Wei-peng^{2a,2b}, SUN Nian-chun¹,
YANG Cun-bang^{2b}, ZHOU Xun^{2a,2b*}

(1.School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China;
2a.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;
2b.Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: As a high-quality optoelectronic material, vanadium dioxide(VO_2) has drawn much attention over the past years, and it shows great potential for various applications such as information storage device, optical modulator, energy-saving, infrared detector, etc. In this work, nanocrystalline VO_2 thin films are prepared by reactive direct current magnetron sputtering and in-situ oxidation annealing, and the microstructures and optical properties of films are investigated. In order to study the switching characteristic of VO_2 thin film to 2.52 THz radiation under varied temperature conditions, the corresponding testing system is established. The results show that the VO_2 thin film is polycrystalline, exhibiting obvious modulation effect on the terahertz wave at 2.52 THz, which makes VO_2 thin film a promising functional material for the terahertz switching/modulation devices.

Key words: terahertz; vanadium dioxide thin film; switching device; thermal induced transition

太赫兹(THz)波是频率介于微波与红外波段之间的电磁辐射, 频率范围在 0.1 THz~10 THz 之间, 处于电子学到光子学的过渡区域。日常生活的空间充满了太赫兹辐射, 过去由于缺乏高效稳定的太赫兹源和灵敏的探测器, 造成这部分电磁频谱利用很低。近几年随着太赫兹技术的进一步发展, 太赫兹无线通信技术成为国内外学者的研究热点。太赫兹无线通信与传统的无线通信相比具有传输速度快, 保密性好、抗干扰能力强等优势^[1-3]。在太赫兹无线通信中, 研制合适的对太赫兹波传输控制和调制功能器件非常重要, 但已有的直接对太赫兹波传输进行控制的光学和电子器件很少, 因此发展实用的太赫兹波调制器件是太赫兹领域的关键问题。

二氧化钒(VO_2)作为一种优质的光电功能材料一直备受人们的关注^[4]。 VO_2 材料的一个重要物理性质是具有可逆半导体-金属相变(semiconductor-metal transition)特性, 这种奇特的现象可由温度、脉冲激光、电场等外界条件激励产生, 相变过程可在亚皮秒时间尺度内完成, 并伴随电阻率、磁化率、光学反射率等多个物理量的显著突变。在红外、可见光区域, VO_2 薄膜在信息存储、光调制器、光开关、智能窗、航天器热控等光电技术方面都已得到重要应用^[5-7]。目前 VO_2 薄膜在 THz 波段的物理性质研究逐步深入^[8-9], 利用其超快相变特性及金属相对 THz

收稿日期: 2013-11-29; 修回日期: 2014-01-26

*通信作者: 周 逊 email: zcm_zky@sohu.com.

波的高反射(或强吸收)特点,将有望制备出超高速、高调制深度并能在室温工作的 THz 开关器件。

1 样品的制备

采用直流磁控溅射法在 K9 玻璃衬底上制备 VO_2 薄膜。靶材为高纯(99.99%)金属钒靶,以纯度为 99.999%的氩气及纯度为 99.995%的氧气分别作为工作气体及反应气体。在沉积薄膜之前,首先将溅射腔室用分子泵抽至 2.0×10^{-3} Pa 的背景真空,并设定基片温度为 100°C ;待基片温度稳定后,通入高纯氩气至压强为 1.0 Pa。在挡板遮住基片的情况下对钒靶表面进行预溅射清洗,随后通入氧气并打开挡板沉积薄膜,在 350°C 纯氧氛围中退火,完毕后自然冷却,至室温后取出样品。

2 微观结构表征

2.1 X 射线衍射

VO_2 薄膜样品的小角度 X 射线衍射谱如图 1 所示,其中(011)取向最为明显,但还包括其他一些取向(200),(020),(210),(211),(022)等,结果表明,制备的 VO_2 薄膜为多晶态。

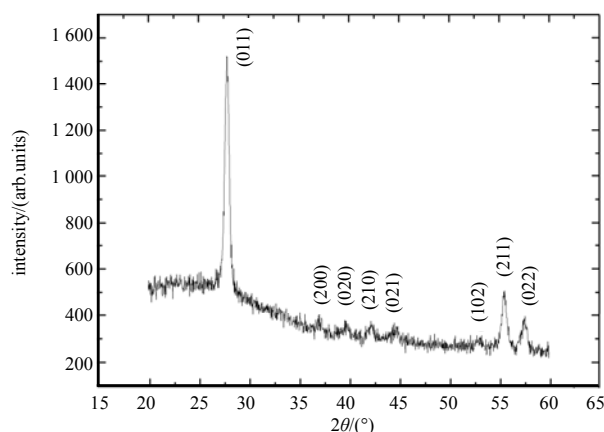


Fig.1 X ray diffraction spectrum of VO_2 thin film
图 1 VO_2 薄膜样品的 X 射线衍射谱

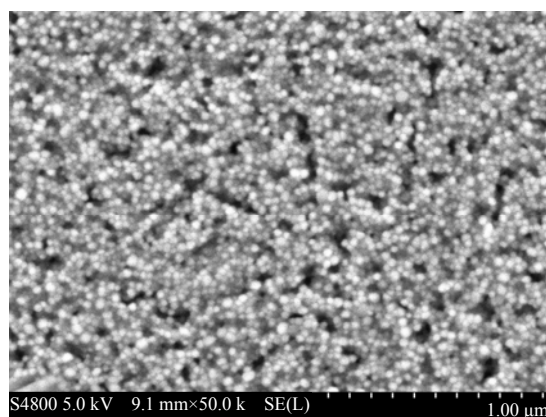


Fig.2 SEM image of the surface of VO_2 thin film
图 2 VO_2 薄膜样品表面扫描电镜照片

2.2 表面形貌

对 VO_2 薄膜表面采用扫描电镜进行分析。图 2 为薄膜的表面形貌照片,不难看出颗粒形状为圆形,尺寸约为 30 nm,薄膜表面组织结构较疏松。

3 VO_2 薄膜太赫兹变温反射测试

VO_2 薄膜太赫兹波的调制幅度测试系统示意图如图 3 所示。将热电偶温度计的探测端接触到开关表面,用以监测 VO_2 薄膜的温度变化; VO_2 薄膜紧贴金属加热板,通过线性直流电源,缓慢增大加在金属加热板上的电压,对 VO_2 薄膜开关进行缓慢加热,使热电偶有足够长的时间与 VO_2 薄膜开关保持热平衡,提高温度读数的准确性。太赫兹波由气体太赫兹源(英国 Edinburgh Instruments 公司 FIRL 100 型)输出,输出的太赫兹波频率为 2.52 THz。FIRL 100 激光器输出的太赫兹波经分束镜后分为透射波和反射波 2 部分。透射波被平面反射镜 1 反射到 VO_2 薄膜开关表面后形成被开关调制的反射信号,经平面反射镜 2、抛物面反射镜 2 反射,并汇聚到太赫兹功率计(美国 Scientech 公司 vector H410)

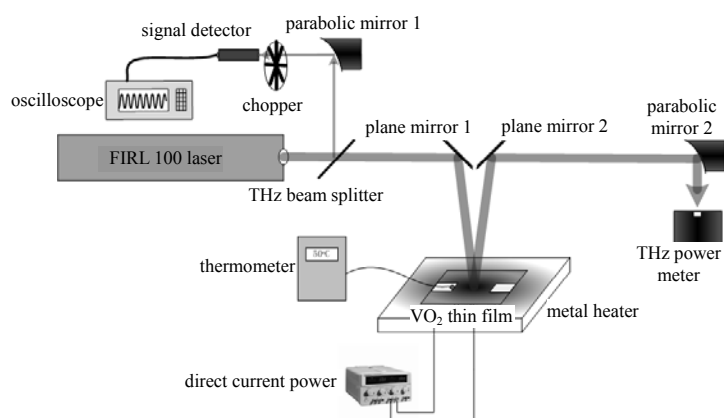


Fig.3 Terahertz amplitude modulation testing system of VO_2 thin film
图 3 VO_2 薄膜太赫兹波的调制幅度测试系统示意图

制的反射信号,经平面反射镜 2、抛物面反射镜 2 反射,并汇聚到太赫兹功率计(美国 Scientech 公司 vector H410)

中,测出信号的功率大小。太赫兹分束镜上的反射波经过斩波器后被信号探测器接收,转换成周期性电信号后显示到示波器(安捷伦 DSO X 3024A)上,每次读取太赫兹功率计读数的同时记录示波器上的电压峰峰平均值,通过这个读数来减小波源不稳定性对测量的影响。 VO_2 薄膜开关的温度每升高 2°C ,记录一次示波器及太赫兹功率计的数据,测试温度最高达到 90°C ,以确保 VO_2 薄膜完全转变为金属态^[10-11],通过比较 VO_2 薄膜处于半导体、金属态时的反射率,得出 VO_2 薄膜开关对太赫兹波的调制幅度。

在测试过程中,由于实验使用的太赫兹功率计对热量十分敏感,样品温度升高时,太赫兹功率计会接收到 VO_2 薄膜的温度辐射,因此首先在关闭 FIR 100 太赫兹激光器的情况下,使用加热板对 VO_2 薄膜进行加热,测量得到了如图 4 所示 VO_2 薄膜温度变化时温度辐射的功率曲线,从图中可以看出, VO_2 薄膜温度辐射与温度变化大致呈线性关系。

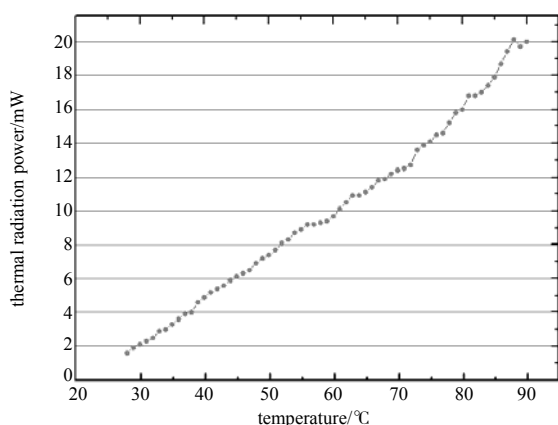


Fig.4 Thermal radiation power of VO_2 thin film
图 4 VO_2 薄膜样品热辐射功率曲线

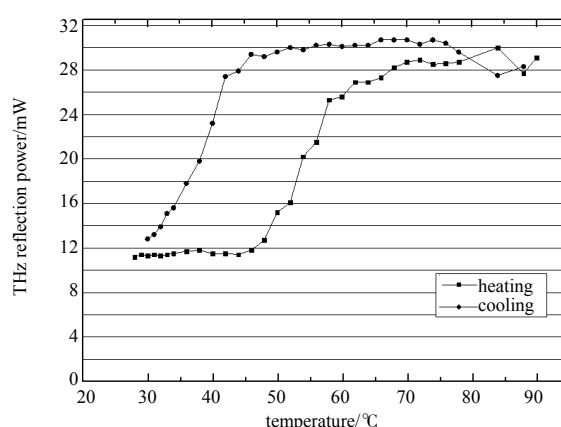


Fig.5 2.52 THz wave reflection curve of VO_2 thin film
图 5 VO_2 薄膜样品对 2.52 THz 的变温反射特性曲线

打开 FIR100 激光器输出太赫兹波,获得太赫兹波和样品温度辐射共同作用的功率曲线,去掉 VO_2 薄膜温度辐射的功率,最终得到太赫兹波反射功率如图 5 所示。结果表明,升温引起 VO_2 薄膜发生相变,反射功率由 12 mW 提高至 30 mW,调制深度 $(P_{\max}-P_{\min})/P_{\max} \approx 60\%$,降温过程呈现明显的热滞回线,温度到达室温时,2 条曲线可以重合,具有显著的太赫兹调制效果。

4 结论

采用磁控溅射法成功制备具有良好均匀性、可控性的相变型 VO_2 薄膜,并对 VO_2 薄膜的微观结构进行表征,设计并搭建 VO_2 薄膜热致相变实验系统,在变温条件下进行了 VO_2 薄膜对 2.52 THz 波的调制测试,实现了对太赫兹反射波的深度调制,为后续基于 VO_2 薄膜的微纳太赫兹开关/调制器件的进一步研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] Ho-Jin S, Nagatsuma T. Present and future of Terahertz communication[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 256-263.
- [2] 张健, 邓贤进, 王成, 等. 太赫兹高速无线通信: 体系、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1): 1-13. (ZHANG Jian, DENG Xian-jin, WANG Cheng, et al. Terahertz high speed wireless communications: systems, techniques and demonstrations[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(1): 1-13.)
- [3] 姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术与展望[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2213-2233. (YAO Jian-quan, CHI Nan, YANG Peng-fei, et al. Study and outlook of Terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2213-2233.)
- [4] 罗振飞. 氧化钒薄膜的制备及其电学、光学特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012. (LUO Zhen-fei. Preparation, electrical and optical properties of vanadium oxide thin films[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [5] WANG H C, YI X J, LI Y. Fabrication of VO_2 films with low transition temperature for optical switching applications[J]. Opt. Commun., 2005, 256: 305-309.