

## 金刚石衬底的氧化钒薄膜光电特性研究

张圣斌, 左敦稳, 卢文壮

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 利用射频磁控溅射方法, 在光学级单晶金刚石上制备了氧化钒薄膜, 然后对其结构与厚度、表面形貌、电学及光学性能进行了表征。实验结果表明, 制备出的薄膜表面均匀性良好, 为单一组分的  $V_2O_5$  薄膜, 在(001)面有明显的择优取向, 薄膜结晶度和表面形貌非常好; 电学性能方面, 获得了三组不同厚度  $V_2O_5$  薄膜温阻特性曲线, 当薄膜为 150 nm 时, 薄膜的电学突变特性最好, 电阻值变化幅度将近 3 个数量级; 对不同厚度薄膜的光学响应特性进行了测试分析, 当受到高能激光照射时, 薄膜均出现了相变和回复, 薄膜的光学开关时间均随着膜厚的增加而增加, 其中光学关闭时间的变化范围为 1.6~2.5 ms, 回复时间的变化范围为 26~33 ms。

**关键词:**  $V_2O_5$  薄膜; 单晶金刚石; 电学性能; 光学特性

**中图分类号:** O484.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1221001

## Optical and electrical properties of vanadium pentoxide films deposited on diamond substrates

Zhang Shengbin, Zuo Dunwen, Lu Wenzhuang

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Vanadium oxide films ( $V_2O_5$ ) were deposited under 35 min by RF reactive magnetron sputtering at the substrates of single-crystal diamond. Its structure, thickness, surface morphology, electrical performances and optical performances were studied. The results indicated that the deposited film is polycrystalline  $V_2O_5$  film on (001) preferred orientation, possessing great crystallization behavior and the surface topography. In term of electrical performance, the  $V_2O_5$  films' temperature-resistance characteristics were tested under three thicknesses, and the electrical mutation is best when the thickness is 150 nm. The optical-switching properties of the films were tested, and process of phase transition and recovery would occur when the films were irradiated by high-energy laser. The optical closing times range from 1.6 ms to 2.5 ms, and the response times vary from 26 ms to 33 ms, which indicate that the films' response time increases with the increase of film thickness.

**Key words:**  $V_2O_5$  films; single-crystal diamond; electrical performance; optical properties

收稿日期: 2016-04-11; 修订日期: 2016-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(51275230); 航空科学基金(20140152001); 江苏省研究生培养创新工程(KYLX\_0226); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 张圣斌(1988-), 男, 博士生, 主要从事连接技术、光学薄膜等方面的研究。Email: sweethenry@163.com

通讯作者: 左敦稳(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事切削加工、材料加工、超硬涂层与刀具等方面的研究。

Email: imit505@nuaa.edu.cn

## 0 引言

临近空间飞行器是指工作于临近空间并利用临近空间独有资源和特点来执行一定任务的一类飞行器,由于其自身的显著特点,具有潜在的军、民两用价值而成为各国近期研究的热点<sup>[1-3]</sup>。但是红外激光武器的迅速崛起发展和投入实战,将对临近空间飞行器造成致命的威胁,近几年随着激光致盲武器的迅速发展和应用,军用光学系统和军事人员所受到的威胁也越来越大。因此对激光防护材料的研究也得到了越来越多的重视<sup>[4]</sup>。用作激光武器的激光光谱日益增多,基于线性光学原理的激光防护已不能满足需要,人们开始探索新的激光防护原理、方法和材料,基于相变原理的激光防护方法已成为目前的一个研究热点。 $V_2O_5$ 作为一种具有半导体-金属态相变的热致相变材料,相变温度为 257 °C,在近中、近红外波段,可由低温透过率很高的半导体态转变为高温透过率很低的金属态<sup>[5-7]</sup>,因此可以用来研制基于相变特性的薄膜来进行激光致盲防护。

$V_2O_5$ 薄膜的制备方法有很多,具体有磁控溅射法、脉冲激光沉积、溶胶-凝胶法、真空蒸发、化学气相沉积等<sup>[8-9]</sup>,但不同的制备方法对其机构、组分和光学特性的影响很大。磁控溅射法制备具有溅射速率快,与基底附着力强,薄膜厚度均匀,可在低温下制备更加致密的膜层等优势,因而受到了广大研究者和薄膜制造厂家的青睐<sup>[10-11]</sup>,该实验就是利用磁控溅射法来镀制  $V_2O_5$  薄膜。

衬底材料的选择是磁控溅射法制备薄膜过程中的一个重要环节,衬底的透射、吸收等光学性能,晶格参数,热膨胀系数等都会影响薄膜的表面形貌和光电特性,从而最终对薄膜在中、近红外波段的抗激光损伤性能产生重要影响。光学级单晶金刚石材料在硬度、中红外波段透过率、晶格参数、防辐射特性和抗激光损伤阈值方面有着非常优良的特性,都远远优于其他现有的红外窗口材料,因此是衬底材料的最理想选择。但由于单晶金刚石的制备难度极高、价格比较昂贵,限制了其在红外窗口中的研究和应用,虽然选择其他红外材料如蓝宝石、尖晶石和硒化锌等作为衬底的实验研究<sup>[12-15]</sup>有很多,但至今也还没有文章对在光学级单晶金刚石衬底上镀制氧化钒

薄膜进行过研究报道。

文中实验利用了磁控溅射法在光学级单晶金刚石上镀制了  $V_2O_5$  薄膜,然后对其光电特性进行了测试分析。在溅射过程中,溅射功率及时间,衬底材料及温度,工作压强,氧氩流量比等也都会对制备出的薄膜的组织结构和光电特性产生较大的影响<sup>[6,8,14]</sup>,而在文中,只对溅射时间进行了改变,其他实验参量在镀制过程中都保持一致。

## 1 氧化钒薄膜的制备

在进行薄膜制备前,需要金刚石基片的性质均匀,表面平整清洁。实验中选用的光学级金刚石基片的规格为  $\Phi 8.20 \text{ mm} \times 0.6 \text{ m}$ 。为了去除表面的金属杂质,先用稀释的 HF 酸清洗,再分别用丙酮、无水乙醇和去离子水超声清洗,除去表面的污染物,以使薄膜具有更好的附着力和更高的纯度。清洗完毕在真空环境下烘干,以最快的速度装入溅射室内,避免被大气污染。再用乙醚和乙醇的混合液(1:3)擦洗金刚石表面,然后进行镀膜。

为了得到较纯组分的  $V_2O_5$  薄膜,课题组之前已经对工艺参数进行了大量的实验探索,左杨平等<sup>[9]</sup>就利用该实验室的磁控溅射设备,通过正交实验的方法制备了氧化钒薄膜,最终发现,当氧氩流量比为 0.11(1.8/11.3 sccm),基底温度为 400 °C,溅射电压为 315 V,工作压强为 1 Pa 时可制备光电特性优良的  $V_2O_5$  薄膜。文中的实验在 JGS450-III 三靶磁控溅射镀膜机上完成,其中离子源采用加强型离子源,可以提高氩气的电离率。真空镀膜室内主要有旋转平面基片架、离子源、溅射装置、偏压装置、照明系统、溅射挡板及加热装置等部件组成。将纯度为 99.995% 的金属钒靶放入射频溅射的靶位,将光学级金刚石基片装夹在加热基板上,调节靶基距为 70 mm。利用机械泵和分子泵系统对溅射室抽真空到  $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。制备过程中的详细参量如表 1 所示。

该实验利用 X 射线衍射仪(XRD)测量了薄膜的结构特性;利用 Tektak150 台阶仪对薄膜进行了厚度测试;利用 NANOMAP500LS 测试了薄膜的表面形貌和表面粗糙度;利用四探针法测试了薄膜的方块电阻,并绘制了温阻特性曲线;利用课题组自主研制的光学响应测试系统,对薄膜的光学响应特性进行了分析研究。

表 1 实验参数

Tab.1 Test parameters

Samples	Substrate material	Sputtering time /min	Ar/O <sub>2</sub> ratio	Temperature/°C	Sputtering pressure /Pa	Sputtering voltage /V
S1	Single-crystal diamond	10	0.11	400	1	325
S2	Single-crystal diamond	15	0.11	400	1	325
S3	Single-crystal diamond	20	0.11	400	1	325

## 2 结果与分析

### 2.1 薄膜厚度均匀性分析

膜层厚度的均匀性是指膜厚随着基板表面位置变化而变化的情况,膜厚均匀性不好,膜系的光电特性会受到很大的影响。实验采用磁控溅射制备的方法,基板装夹在平面夹具的正中间,由步进电机带动做匀速转动运动来实现制备薄膜良好的膜厚均匀性。旋转平面夹具的配置如图 1 所示。

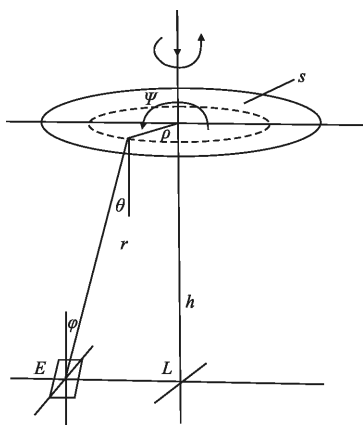


图 1 旋转基板的几何配置

Fig.1 Geometric configuration of rotating substrate

根据图所示的旋转基板的几何配置,可以得到<sup>[16]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \cos\varphi &= \cos\theta = \frac{h}{r} \\ r^2 &= h^2 + (1+\rho)^2 - 4L\rho\sin^2\left(\frac{\psi}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

代入面源膜厚公式<sup>[16]</sup>

$$t_s = \frac{m\cos\varphi\cos\theta}{\pi\mu r^2} \quad (2)$$

得:

$$t_s = \frac{m}{\mu\pi^2} \int_0^\pi \frac{h^2 d\varphi}{(h^2 + \rho^2 + L^2 - 2\rho L\cos\varphi)^2} \quad (3)$$

应用积分<sup>[16]</sup>

$$\int_0^\pi \frac{dx}{(a+b\cos x)^2} = \frac{\pi a}{(a^2 - b^2)^{3/2}} \quad (4)$$

得膜厚分布公式<sup>[16]</sup>为:

$$\frac{t_s}{t_{0s}} = \frac{(h^2 + L^2)^2 (h^2 + L^2 + \rho^2)}{[(h^2 + L^2 + \rho^2)^2 - 4L^2\rho^2]^{3/2}} \quad (5)$$

式中: $t_s$ 为面源距离为 $\rho$ 处的膜厚; $t_{0s}$ 为中心点( $\varphi = \rho = 0$ )的膜厚。

实验将基板放置于夹具的中心,测得 $L = 40\text{ mm}$ ,  $h = 35\text{ mm}$ ,  $\rho = 4.1\text{ mm}$ 。代入公式(5)求得不均匀性为 2.345%。

采用机械式轮廓仪对制备的 $\text{V}_2\text{O}_5$ 单层薄膜均匀性进行测量,图 2 为试样 S2 的薄膜表面轮廓曲线,其中横坐标为基片的径向位移,纵坐标为薄膜相对于基片的测量高度。薄膜中心最高点相对于基片的高度为 151.8 nm,薄膜边缘的高度 149.6 nm,则薄膜的不均匀性为 2.84%。从图中还可以看出薄膜中心部位厚度偏厚,边缘部位厚度偏薄,但整体上薄膜具有良好的厚度均匀性,虽然与理论计算值略有偏差,主要还是由于机械式轮廓仪测量的精度有限所致。

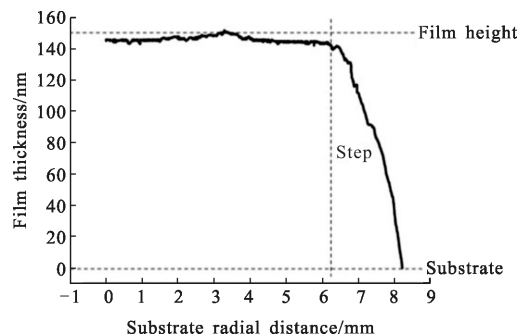


图 2 薄膜轮廓

Fig.2 Film outline

### 2.2 薄膜的结构分析

实验制备出的氧化钒薄膜的颜色为橙黄色,这与 M. Ghanashyam Krishna 等人<sup>[17]</sup>所得结果一致,为了清楚地了解所制备薄膜的化学信息,对金刚石衬底上的薄膜样品进行了 XRD 测试。图 3 为样品 S2 的衍射图谱,从图中可以看出,薄膜在 XRD 的测量

精度范围内基本为  $V_2O_5$  的物相, 没有其他相存在, 为组分很纯的多晶薄膜, 不同于参考文献[12-15]中得到的多组分氧化钒薄膜, 而这时由于实验制备方法或参数不同所致。薄膜在  $2\theta=20.22^\circ$  时衍射峰最强, 其对应了  $V_2O_5$  的(001)晶面, 说明薄膜在(001)方向上具有明显的择优取向, 即沿垂直于晶体  $a, b$  轴构成的平行于衬底的平面生长, 这与之前课题组在蓝宝石衬底上镀制薄膜的 XRD 结果吻合<sup>[18]</sup>。XRD 图谱中, 在  $2\theta=15.37^\circ, 21.71^\circ, 31.026^\circ, 41.28^\circ$  和  $47.33^\circ$  时, 也出现了微弱的  $V_2O_5$  衍射峰, 分别对应了  $V_2O_5$  的(200)、(101)、(400)、(002)和(600)晶面, 薄膜呈多晶态。

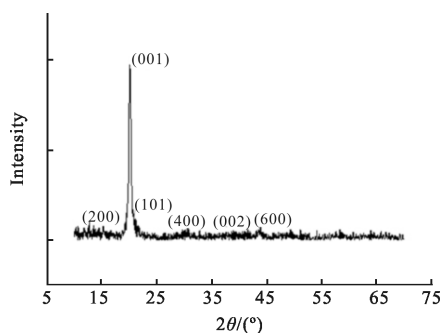


图 3 氧化钒薄膜的 XRD 图

Fig.3 XRD diagram of vanadium oxide films

### 2.3 薄膜的表面形貌

氧化钒薄膜的表面质量尤其是表面粗糙度会直接影响着薄膜的力学性质和光电特性, 从而影响其对激光的破坏阈值, 因此对薄膜的表面形貌的研究显得尤为重要。

图 4 为所测得的 S2 样品薄膜的最具代表性区域的三维形貌, 由图可知薄膜细致均匀, 薄膜由形状一致的塔状颗粒规则排列构成, 颗粒大小分布在 50~

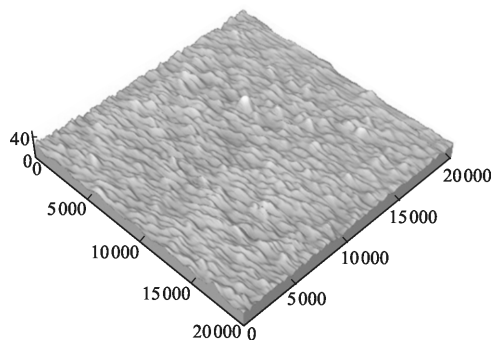


图 4 薄膜的表面形貌

Fig.4 Film's morphology

100 nm 之间。对 S2 样品中心 3 mm 范围内的 5 个区域进行了表面形貌测试, 取平均后所得薄膜表面均方根粗糙度  $Sa$  为 1.31 nm, 薄膜表面颗粒较细、均匀、光滑和平整, 没有明显的缺陷, 说明薄膜具有良好的光学表面。

### 2.4 薄膜的电学性能

测量薄膜电学特性最简单的方法就是电阻测量法。由于  $V_2O_5$  薄膜的厚度只有几百纳米, 需要对薄膜表面的电阻进行测量, 该实验采用四点探针法对  $V_2O_5$  薄膜相变特性的电学特性进行测量, 其原理如图 5 所示。

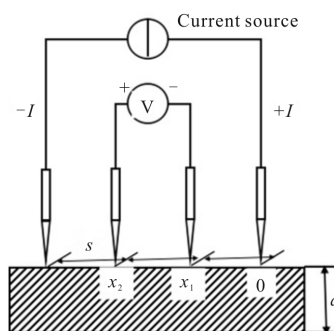


图 5 电学性能测试

Fig.5 Electrical performance test

实验采用四点探针法对薄膜的方块电阻进行了测试, 同时利用热电偶对  $V_2O_5$  薄膜加热, 测量薄膜的方块电阻随温度变化的对应关系。因为理论上  $V_2O_5$  材料的相变温度为  $257^\circ\text{C}$  左右, 此次测试从  $200^\circ\text{C}$  开始测试薄膜的方块电阻, 得到不同厚度薄膜下的阻温特性曲线如图 6 所示。

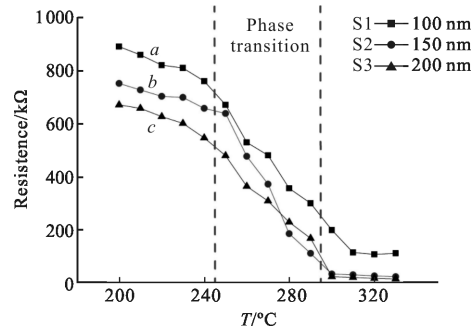


图 6 薄膜阻温特性曲线

Fig.6 T-R curve of film

由图 6 可以看出, 在温度范围为  $200\sim 330^\circ\text{C}$  时,  $V_2O_5$  薄膜的方块电阻值随温度升高而下降, 电阻温



度系数为负,  $V_2O_5$  薄膜完成了由半导体相向金属相的转变。在相变之前, 薄膜的方块电阻在  $700\sim 1\,000\text{ k}\Omega/\square$  之间, 随着  $V_2O_5$  薄膜完全由半导体态转变为金属态, 试样 S2、S3 的方块电阻也降到  $20\text{ k}\Omega/\square$  以下, 薄膜 S1 的方块电阻在  $100\text{ k}\Omega/\square$ , 相变幅度将近 3 个数量级。此外, 从图中还可以看出, 三组样品在  $200^\circ\text{C}$  时有着很高的电阻值, 且随着温度的升高, 电阻逐渐下降, 但当温度低于  $240^\circ\text{C}$  时, 电阻率突然降低, 说明薄膜在  $240^\circ\text{C}$  开始发生相变。

为了得到氧化钒薄膜的相变温度, 对三组样品的温阻曲线进行了求导, 经高斯拟合后的曲线如图 7 所示, 从图中可以得出薄膜厚度为 100、150、200 nm 时的相变温度。薄膜的厚度对其相变温度 ( $T_c$ )、相变持续温度范围 ( $\Delta T$ ) 以及相变前后电阻的变化率 ( $\lg\Delta R(200^\circ\text{C}/300^\circ\text{C})$ ) 有着很大的影响。表 2 列出了相变温度, 相变持续温度范围和相变前后电阻变化率随时间的变化情况。

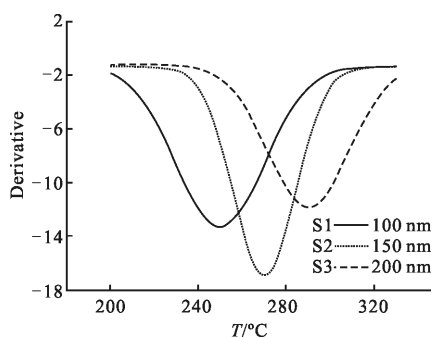


图 7 高斯拟合曲线

Fig.7 Gauss-fitting curve

表 2 不同溅射时间下的薄膜的电学性能

Tab.2 Films' electrical properties under different sputtering times

Samples	Thick-ness/nm	R-T coefficient $k$	$T_c/^\circ\text{C}$	Tempera- ture range ( $\Delta T/^\circ\text{C}$ )	$\lg\Delta R$ ( $200^\circ\text{C}/320^\circ\text{C}$ )
S1	100	-13.4	250	70	2.89
S2	150	-17.3	270	50	2.86
S3	200	-12.8	290	70	2.81

从表 2 中可以发现, 样品 S1~S3 的温阻系数  $k$  分别为  $-13.4$ 、 $-17.3$ 、 $-12.8$ , 由此可知样品 S2 即膜厚为 150 nm 时薄膜的相变突变性能最好。同时发现样

品 S1~S3 的相变温度分别为  $250$ 、 $270$ 、 $290^\circ\text{C}$ , 即相变温度会随着溅射时间的增加而升高, 这与参考文献[18]所得结果一致。此外, 在相同的膜厚和制备条件下, 在金刚石衬底上镀制的薄膜的相变温度均低于石英和蓝宝石衬底<sup>[9]</sup>, 表现出优异的相变特性。

相变温度  $T_c$  是一阶导数绝对值最大的点所对应的温度, 在这个温度点上, 薄膜材料只是发生了部分相变, 而要完成所有相变需要经历一个温度范围 (突变开始到突变结束), 这个范围直接决定着相变速度快慢: 相变经历的温度范围越小, 说明激发转变过程就越同步, 薄膜的相变速度也就越快。从表 2 中可以看出, 样品 S2 的相变温度范围最短, 约为  $50^\circ\text{C}$ , 而样品 S1 和 S3 的电阻变化相对平缓, 相变温度范围约为  $70^\circ\text{C}$ 。

从表 2 中还可以看出, 随着溅射时间的增加, 相变前后的电阻变化率逐渐降低,  $\lg\Delta R(200^\circ\text{C}/320^\circ\text{C})$  由厚度 100 nm 时的 2.89 变为 200 nm 时的 2.81, 相变幅度达到将近 3 个数量级, 并且随着厚度的增加而降低。

综上所述,  $V_2O_5$  薄膜的厚度对薄膜电学性能有很大的影响, 薄膜过厚或者过薄都会影响薄膜的相变特性。当  $V_2O_5$  薄膜厚度为 150 nm 时, 其电学突变性能最好,  $V_2O_5$  薄膜完全由半导体态转变为金属态相变持续温度范围最小, 相变前后电阻值从  $752\text{ k}\Omega/\square$  降低到  $25\text{ k}\Omega/\square$ , 变化幅度将近 3 个数量级。

### 2.5 $V_2O_5$ 薄膜光学响应特性

目前, 国内外针对激光对各类光电探测器的损伤机理进行了很多研究, 人们普遍认为激光对探测器的破坏主要属于热破坏, 主要包含熔化和汽化<sup>[20-23]</sup>。当光电探测器受到激光辐照时, 激光能量超过某一阈值时会产生很大的热效应和光信号饱和作用, 即探测器被激光致盲, 从而使其无法正常工作。在红外波段下, 薄膜在室温下具有高透射率, 当高能激光照射时, 由于  $V_2O_5$  是吸收膜, 薄膜吸收激光的能量导致温度迅速升高到相变温度点, 薄膜的相结构发生转变, 实现对激光的截止。随着激光能量和功率的增加, 薄膜温升的时间也会越短, 温升速率越大, 当响应时间足够短时才能保证在探测器被致盲甚至被烧毁之前实现对激光的屏蔽作用, 从而起到激光致盲防护的作用。

氧化钒薄膜相变前后的开关时间是其在防护应

用中的一个重要参量,为了能精确测量氧化钒薄膜的光学特性,课题组也自主研发了一个测试系统,所采用的设备有红外光电探测器、1 024 nm 光纤激光器、示波器、测试夹具及平台,其中探测器的响应速度在 10 ns 以下,整个平台的测试精度可达纳秒级。现场测试如图 8 所示。

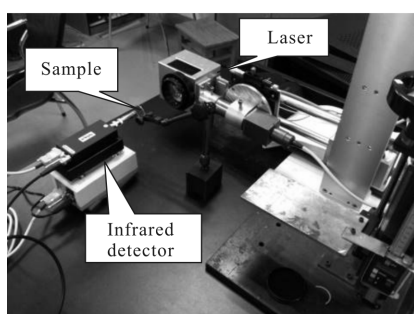


图 8 现场测试图  
Fig.8 Field test

图 9 为膜厚为 200 nm(S3)时薄膜的开关速度测试结果,由图可得,当脉冲激光照射氧化钒薄膜,薄膜发生相变,由半导体相转变为金属相,由探测器探测到的激光能量迅速减小,经探测器转化输出的信

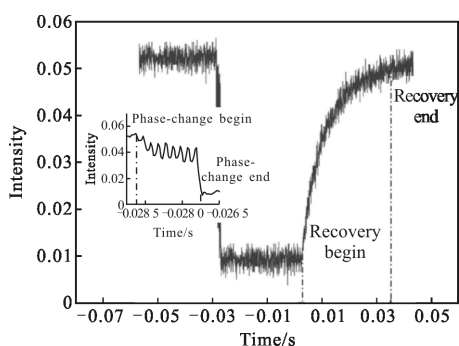


图 9 光学响应测试曲线  
Fig.9 Optical response test curve

号强度降低,此时示波器上显示的波形会出现一个急速的下降。由激发开始至信号强度降到最低处所用时间即为薄膜的关闭时间。之后,脉冲激光调到较小功率密度 ( $10.2 \text{ W/mm}^2$ ),薄膜透过率开始缓慢回复,则示波器波形会出现一个逐渐升高的回复过程,这一阶段为回复时间。在下一脉冲激发到来时,薄膜重复上述过程。薄膜的开关变化的特征可由示波器波形反映出来。实验测得的 3 组试样的光学关闭时间都极短,均在 3 ms 以下,而恢复时间较长,但均在

35 ms 以内(见图 10)。由图 10 可知,薄膜的光学关闭时间和回复时间均随着膜厚的增加而增加,其中关闭时间由 100 nm 时的 1.6 ms 变为 200 nm 时的 2.5 ms,回复时间由 100 nm 时的 26 ms 增长为 200 nm 时的 33 ms。

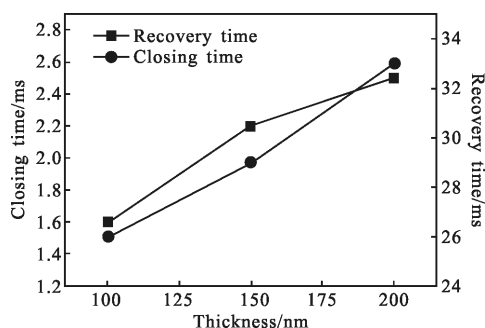


图 10 厚度-开关时间关系曲线  
Fig.10 Thickness-switching time curve

陈涛等人<sup>[13]</sup>认为,当薄膜厚度较大时,激励光只能照射在薄膜表层,而不能对薄膜内部进行激发,所以只有薄膜表面部分发生由光激励引起的光致相变,而薄膜的内部主要是由于激励光产生的热效应引起的热致相变。由于热致相变本身属于较慢的相变过程,且热量在薄膜中的传递也需要较长时间,所以导致较厚薄膜的开关过程速度较慢。

### 3 结论

(1) 该实验所制备的  $\text{V}_2\text{O}_5$  薄膜为多晶结构,在 (001) 方向上具有明显的择优取向;薄膜表面粗糙度 Sa 为 1.31 nm,表面均匀致密,并且具有非常好的厚度均匀性,是非常优良的光学表面。

(2) 采用四点探针法获得了 3 组不同厚度  $\text{V}_2\text{O}_5$  薄膜温阻特性曲线,结果表明: $\text{V}_2\text{O}_5$  薄膜的电阻随着温度的升高而降低,在  $240\sim 280\text{ }^\circ\text{C}$  范围内, $\text{V}_2\text{O}_5$  薄膜完成了由半导体相向金属相的转变。当薄膜为 150 nm 时,薄膜的电学突变特性最好,电阻值变化幅度将近 3 个数量级。

(3) 利用自制的光学特性测试系统,对薄膜的光学响应特性进行了测试分析,当受到高能激光照射时,薄膜均出现了相变和回复,薄膜的光学开关时间均随着膜厚的增加而增加,其中光学关闭时间的变化范围为 1.6~2.5 ms,回复时间的变化范围为 26~33 ms。

## 参考文献:

- [1] Zhang Hailin, Zhou Lin, Zuo Wenbo, et al. Study on infrared radiation feature of near space hypersonic missile [J]. *Laser and Infrared*, 2015(1): 41-44. (in Chinese)  
张海林, 周林, 左文博, 等. 临近空间高超声速导弹红外特性研究[J]. 激光与红外, 2015(1): 41-44.
- [2] Zhang Hongwen, Cao Guohua, Li Yanwei, et al. Thermal-optical evaluation to optical window of near space aerial remote sensor surrounding hyperson [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3958-3962. (in Chinese)  
张洪文, 曹国华, 李延伟, 等. 临近空间超声速航空遥感器光学窗口热光学评价 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3958-3962.
- [3] Huang Chen, Liang Xiaohu, Wang Jianjun, et al. Modeling and simulation of imaging plane irradiance for near space infrared detecting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3958-3962. (in Chinese)  
黄晨, 梁小虎, 王建军, 等. 临近空间红外探测像面照度建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3958-3962.
- [4] Sullivan M, Son T V, Beaudoin N, et al. Optical scattering during phase transition of vanadium dioxide [J]. *Optics Communications*, 2015, 356: MQ1580.
- [5] Zhang Lichao, Gao Jinsong. Developments of DUV coating technologies in CIOMP [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2395-2401. (in Chinese)  
张立超, 高劲松. 长春光机所深紫外光学薄膜技术研究进展[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2395-2401.
- [6] Ingole R S, Lokhande B J. Effect of pyrolysis temperature on structural, morphological and electrochemical properties of vanadium oxide thin films [J]. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 2016, 137(2): 1116-1121.
- [7] Benmoussa M, Ibnouelghazi E, Bennouna A, et al. Electrochromism in sputtered  $V_2O_5$  thin films: structural and optical studies[J]. *Thin Solid Films*, 2002, 405(1-2): 11-16.
- [8] Zhang H F, Wu Z, Wu X, et al. Preparation and phase transition properties of nanostructured zirconium-doped vanadium oxide films by reactive magnetron sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 568: 63-69.
- [9] Zuo Yangping, Lu Wenzhuang, Zhang Shengbin, et al. Design and fabrication of diamond/ $V_2O_5$  films in continuous laser protection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1522-1526. (in Chinese)  
左杨平, 卢文壮, 张圣斌, 等. 面向激光防护应用的金刚
- 石/ $V_2O_5$ 膜系设计与制备 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1522-1526.
- [10] Liu Chengyou, Ning Dan, Zhang B P, et al. Study on nonlinear-optical properties of ZnO thin films [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 2005, 13 (3): 265-271. (in Chinese)  
刘成有, 宁丹, 张保平, 等. ZnO 薄膜非线性光学特性的实验研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 265-271.
- [11] Marcelo S B, Carlos L Ferreira, Roberto R, et al. Vanadium oxide thin films produced by magnetron sputtering from a  $V_2O_5$  target at room temperature [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 103-107.
- [12] Tian Xuesong. Study on anti-laser-damage vanadium oxide thin films's preparation and optical phase-transition character [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 68-74. (in Chinese)  
田雪松. 用于抗激光致盲的氧化钒薄膜制备及光学相变特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 68-74.
- [13] Chen Tao. Study on fabrication and optical property of VOx thin films with phase transition characteristic [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011: 41-44. (in Chinese)  
陈涛. 具有相变特性的氧化钒薄膜制备与光学特性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011: 41-44.
- [14] Wang Yao, Wu Zhiming, Luo Zhenfei, et al. Effects of sputtering time on the optical properties of vanadium oxide thin films [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2011, 34(6): 629-632. (in Chinese)  
王尧, 吴志明, 罗振飞, 等. 溅射时间对氧化钒薄膜光学特性的影响[J]. 电子器件, 2011, 34(6): 629-632.
- [15] Wu Xiaochun, Lai Fachun, Lin Limei, et al. Influence of thermal cycling on structural, optical and electrical properties of vanadium oxide thin films [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(8): 2840-2844.
- [16] Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 274-276. (in Chinese)  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 274-276.
- [17] Son T V, Zongo K, Ba C, et al. Pure optical phase control with vanadium dioxide thin films[J]. *Optics Communications*, 2014, 320(2): 151-155.
- [18] Zhang Shengbin, Zuo Dunwen, Lu Wenzhuang, et al. Optical and electrical properties of vanadium pentoxide films prepared by RF reactive magnetron sputtering [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2438-2445. (in Chinese)

- 张圣斌, 左敦稳, 卢文壮, 等. 磁控溅射法制备的五氧化二钒薄膜光电特性 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2438-2445.
- [19] Zhang Shengbin, Zuo Dunwen, Lu Wenzhuang, et al. Optical and electrical properties of vanadium pentoxide films deposited on different substrates [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0431001. (in Chinese)
- 张圣斌, 左敦稳, 卢文壮, 等. 基于不同衬底的五氧化二钒薄膜光电特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0431001.
- [20] Ho Y K, Chang C C, Wei D H, et al. Characterization of gasochromic vanadium oxides films by X-ray absorption spectroscopy [J]. *Thin Solid Films*, 2013, 2013 (10): 461-465.
- [21] Zhang Yinyuan, Zheng Rongshan, Liu Jinsong. Analysis of pulsed laser disturbance and damage on satellite-borne detector [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(9): 1758.
- [22] Wang Siwen, Li Yan, Guo Lihong. Analysis on the disturbance of CO<sub>2</sub> laser to long-wave infrared HgCdTe detector [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(2): 102.
- [23] Xu Lijun, Cai Hongxing, Li Changli. Responsivity of photoelectric detector irradiated by intense laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(6): 1018.