

金刚石衬底的 V_2O_5 薄膜激光损伤阈值研究

张盛¹, 张圣斌², 刘巍¹, 庞婧¹, 卢文壮¹

(1.南京航空航天大学, 南京 210016; 2.青岛大学, 青岛 266071)

摘要: **目的** 探究 V_2O_5 薄膜厚度对其抗激光损伤性能的影响。**方法** 通过射频反应磁控溅射法在光学级单晶金刚石衬底表面制备了不同膜厚的 V_2O_5 薄膜。采用脉宽为 10 ns、波长为 1064 nm 的脉冲激光器对薄膜样品进行光学响应曲线测试, 测得薄膜相变前后透过率变化情况及相变开关时间, 以判断薄膜是否发生损伤, 并根据损伤几率得到激光损伤阈值。**结果** 实验制备的薄膜为组分单一的多晶 V_2O_5 , 在 (001) 面具有明显择优取向。同一膜厚下 (350 nm), 随着激光能量密度的增加, 薄膜的相变关闭时间由 1.48 ms 单调减小至 0.64 ms, 相变回复时间则由 11.6 ms 单调增加至 20.4 ms, 相变后的透过率由 19% 单调减小至 8%, 回复后的透过率由 77% 单调减小至 51%。薄膜膜厚在 150~550 nm 的范围内, 其激光损伤阈值随着膜厚的增加呈现出先增后减的趋势; 当膜厚等于 250 nm 时, 激光损伤阈值达到最大值, 为 260 mJ/cm²; 膜厚为 550 nm 时, 激光损伤阈值最小, 仅为 209 mJ/cm²。**结论** V_2O_5 薄膜厚度对其抗激光损伤性能具有较大的影响, 合理地控制膜厚, 能够有效提高激光损伤阈值, 从而提高基于金刚石衬底的 V_2O_5 薄膜的抗激光损伤能力。

关键词: 激光致盲; V_2O_5 薄膜; 膜厚; 损伤阈值; 金刚石衬底

中图分类号: TG174.4; O484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0147-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.022

Laser Limiting Performance of V_2O_5 Thin Films on Diamond Substrates

ZHANG Sheng¹, ZHANG Sheng-bin², LIU Wei¹, PANG Jing¹, LU Wen-zhuang¹

(1.Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2.Qingdao University, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effect of V_2O_5 film thickness on laser damage resistance. V_2O_5 thin films with different thickness were prepared on optical grade single crystal diamond substrates by radio frequency reactive magnetron sputtering. The optical response curves of the thin films were tested by a pulsed laser with a pulse width of 10 ns and a wavelength of 1064 nm. The changes of transmittance and the switching time before and after phase transformation were measured to determine whether the thin films were damaged, and the laser damage threshold was obtained according to the damage probability. The prepared films were polycrystalline V_2O_5 with single component and had obvious preferred orientation on (001) surface. At the same film thickness (350 nm), with the increase of laser energy density, the phase transition closure time of the films decreased monotonously from 1.48 ms to 0.64 ms, and the phase transition recovery time increased monotonously from 11.6 ms to 20.4 ms. The transmissivity decreased monotonously from 19% to 8%, and the transmissivity decreased monotonously from

收稿日期: 2018-10-17; 修订日期: 2019-01-10

Received: 2018-10-17; Revised: 2019-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51562027); 航空基金 (2016ZE52046)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51562027) and Aviation Foundation of China (2016ZE52046)

作者简介: 张盛 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光致盲防护技术。

Biography: ZHANG Sheng (1993—), Male, Master, Research focus: laser blinding protection technology.

通讯作者: 卢文壮 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能制造及制造自动化、超硬材料及工具、现代表面技术。邮箱: meewzlu@nuaa.edu.cn

Corresponding author: LU Wen-zhuang (1972—), Male, Doctor, Professor, Research focus: intelligent manufacturing and manufacturing automation, super hard materials and tools, modern surface technology. E-mail: meewzlu@nuaa.edu.cn

77% to 51%. In the range of 150~550 nm of film thickness, the laser damage threshold increased first and then decreased with the increase of the film thickness; When the film thickness was 250 nm, the laser damage threshold reached the maximum value of 260 mJ/cm²; when the film thickness was 550 nm, the minimum value was 209 mJ/cm². The thickness of V₂O₅ film has great influence on laser damage resistance. Reasonable control of film thickness can effectively improve the laser damage threshold, thus improving the laser damage resistance of V₂O₅ film based on diamond substrate.

KEY WORDS: laser blinding; V₂O₅ films; film thickness; damage threshold; diamond substrate

基于相变原理的五氧化二钒 (V₂O₅) 材料在达到相变温度后, 会从低温半导体相向高温金属相转变, 是一种新型的激光致盲防护材料^[1-5]。V₂O₅ 用于光电系统的红外窗口时, 在低温半导体状态下拥有高透过率, 以保证光电系统可以正常接收光信号, 当受到强激光辐照时, 能够发生相变来降低透过率, 从而实现激光限幅。其具有响应速度快、激光限幅效果好、防护波段宽等特点。V₂O₅/金刚石的激光致盲防护体系把金刚石膜较宽的高透射波段、良好的防辐射特性、极高的激光损伤阈值、高硬度等优点^[6-7], 与 V₂O₅ 热致相变非线性光开关特性结合起来, 实现了宽波段激光致盲防护, 这在光电对抗领域具有极大的应用前景。

制备 V₂O₅ 薄膜的方法很多, 常用的有脉冲激光沉积法^[8]、溶胶-凝胶法^[9]、蒸发法^[10]和溅射法^[11-13]。射频磁控溅射是目前制备 V₂O₅ 光学薄膜应用较为广泛的方法, 该方法容易制备大面积薄膜, 稳定性、工艺重复性好, 制备的薄膜与衬底的附着力强, 且制备过程中工艺参数容易控制^[14], 在广大科研工作者中获得了一致青睐。

目前, V₂O₅ 薄膜激光致盲防护性能是研究热点。兰州大学的许旻^[15]利用脉冲磁控溅射法在石英和单晶 Si(100) 上制备了 V₂O₅ 薄膜, 常温下 500~2000 nm 波段平均透过率达 70%, 相变前后电阻变化大约 2 个数量级。中国工程物理研究院的骆永全等人^[16]在玻璃衬底上制备了平均厚度为 100 nm 的 V₂O₅ 薄膜。在波长为 1064 nm 的激光照射下, V₂O₅ 薄膜的透过率由相变前的 55% 变为相变后的 25.5%, 响应时间约为 24 ms; 在波长为 1319 nm 的激光照射下, V₂O₅ 薄膜的透过率由相变前的 63% 降低到相变后的 27.9%, 响应时间约为 40 ms。Chen 等人^[17]通过反应离子束溅射及在 Ar 中退火, 得到了由 V₂O₅ 和 VO₂ 组成的致密薄膜。采用波长为 1064 nm, 脉宽为 10 ns 的脉冲激光照射, 其激光损伤阈值为 20.1 mJ/cm²。目前应用于激光防护领域的 V₂O₅ 薄膜, 其研究主要集中在透波性能和开关响应特性, 而极其重要的抗激光损伤性能则提及较少, 因此基于金刚石衬底的 V₂O₅ 薄膜激光损伤阈值的研究显得意义重大。

影响 V₂O₅ 薄膜激光损伤阈值的因素很多, 除了激光参数外, 薄膜自身的厚度也是激光损伤阈值的重要影响因素之一^[18-19]。本实验在保证衬底温度、工作压力、氧氩比和溅射功率不变的前提下, 通过控制溅

射时间, 制备不同膜厚的 V₂O₅ 薄膜, 并探究膜厚对 V₂O₅/金刚石膜系激光损伤阈值的影响。

1 试验

1.1 V₂O₅ 薄膜的制备

实验在 JSG450-三靶磁控溅射镀膜机上进行, 实验参数为: 金刚石衬底温度 400 °C, 真空室气压 1.0 Pa, 氧氩比 0.11, 溅射功率 120 W。溅射初始阶段先对钽靶进行预溅射, 以去除钽靶表面的氧化物和其他杂质。通过控制溅射时间, 在 5 组金刚石衬底上分别制备了膜厚为 150、250、350、450、550 nm 的 V₂O₅ 薄膜。

1.2 损伤测试实验

光电探测系统的激光损伤可定义为: “器件”由于激光辐照而发生了可观察的变化。对于 V₂O₅ 薄膜, 其激光损伤可以定义为: 失去激光限幅的功能^[20], 即相变后, 在弱光照射下, 仍不能发生回复作用, 只能维持很低的透过率。实验采用国际标准 ISO-11254 规定的薄膜零损伤几率的能量密度值为损伤阈值, 其确定方法如下: 1) 同一膜厚下, 用不同能量密度的激光, 对试样上的点进行辐照, 每个点 1 次; 2) 通过相同能量密度的激光辐照 10 个点, 依次得到不同能量密度下试样的损伤几率 (包含损伤几率为 0 和 100% 的能量密度值); 3) 测试结果用曲线拟合法求出对应零损伤几率的能量密度值, 即为激光损伤阈值。该方法表征了试样损伤的临界行为, 排除了实验过程中诸如试样不均匀、环境不稳定等偶然因素的影响, 更符合实际情况。

测量 V₂O₅ 薄膜激光损伤阈值的光学响应测试平台如图 1 所示, 所采用的设备有脉冲激光器 (波长 1064 nm, 脉宽 10 ns)、V₂O₅ 薄膜/金刚石衬底夹具、光电探测器和示波器。激光辐照时, 通过示波器记录的光学响应曲线, 可以判断薄膜是否发生激光损伤。

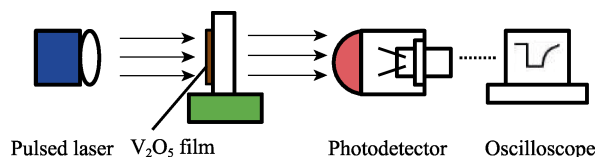


图 1 光学响应测试平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical response test platform

2 结果及分析

2.1 薄膜的 XRD 分析

实验制备的 V_2O_5 薄膜呈现的是其在钒氧化物中特有的橙黄色, 与 Krishna 等人^[21]得到的结果一致。使用 Ultima 系列多功能 X 射线衍射仪对不同膜厚的 V_2O_5 薄膜试样进行 XRD 测试, 通过 JADE 软件分析发现不同膜厚下的多晶 V_2O_5 均为 (001) 面择优取向。图 2 为 350 nm 厚薄膜的 XRD 图谱, 从中可以看出, V_2O_5 试样主要有三个衍射峰, 分别为 V_2O_5 (200)、 V_2O_5 (001) 和 V_2O_5 (102), 而其他钒氧化物 (V_2O_3 、 VO_2 和 VO 等) 的衍射峰都不明显, 说明制备的试样为组分很纯的多晶 V_2O_5 薄膜。 V_2O_5 (200) 和 V_2O_5 (102) 峰较弱, 而 V_2O_5 (001) 峰则比较尖锐, 说明薄膜在 (001) 方向上具有明显的择优取向, 即沿 a、b 轴平行于衬底的取向生长。分析认为, 这可能是 V_2O_5 的层状晶体结构和不同位置 V—O 键的结合能造成的, V_2O_5 (001) 面呈层状分布, 各层之间靠位于不同层的钒氧原子间微弱的范德瓦尔斯力连接,

(001) 面的比表面自由能很低, 很容易形核^[19]。

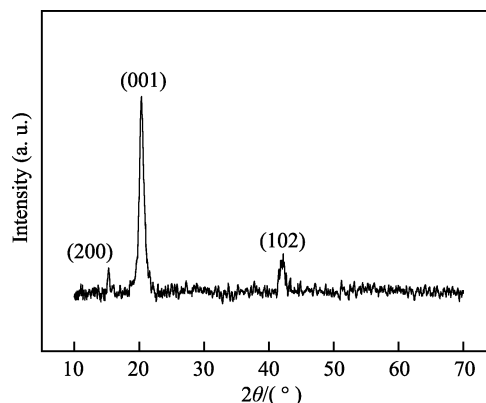


图 2 350 nm 厚 V_2O_5 薄膜的 XRD 图
Fig.2 XRD diagram of V_2O_5 thin film with 350 nm thickness

2.2 激光损伤阈值

对 V_2O_5 薄膜在不同激光能量密度下的损伤阈值进行了测试, 确定大致的范围, 最后根据统计出的损伤几率确定薄膜的激光损伤阈值。图 3 为 350 nm 厚的薄膜在不同激光能量密度下的光学响应曲线。

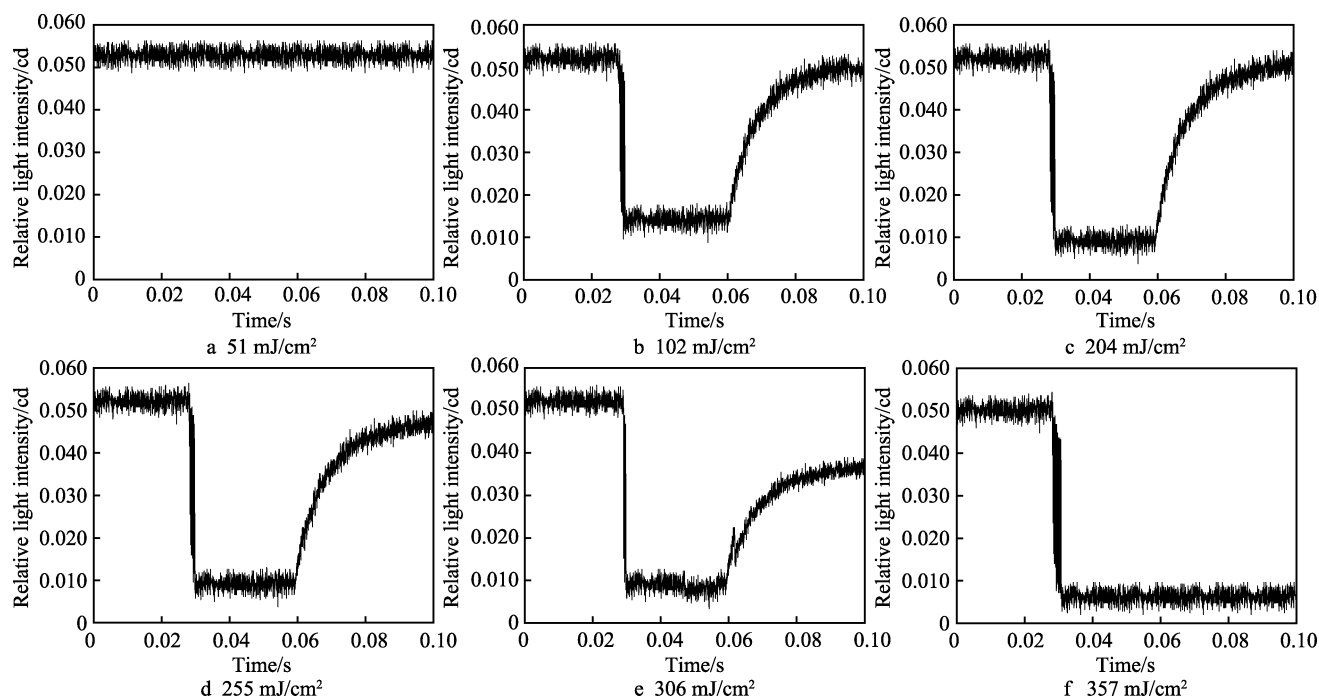


图 3 不同能量密度下光学响应曲线
Fig.3 Optical response curve under different energy densities

从图中可以看出, 当能量密度为 51 MJ/cm^2 时, 薄膜没有发生光学突变, 即未发生相变, 相对光强始终保持在 0.054 cd 左右, 而无膜时光强为 0.07 cd , 经计算可得透过率约为 77%。当激光能量密度增加至 102 MJ/cm^2 时, 薄膜发生相变, 相变后检测到的相对光强约为 0.013 cd , 透过率约为 19%。当能量密度为 204 MJ/cm^2 时, 虽然薄膜也发生相变, 但相变后相对光强有所减小, 约为 0.008 cd , 计算得出透过率约为

11%。对比图 3b、c 可知, 能量密度的增加会使薄膜在相变后的透过率降低, 即使相变进行的更加充分。当激光能量密度继续增加到 255 MJ/cm^2 时, 薄膜也发生了相变, 但当能量密度调回 51 MJ/cm^2 之后, 薄膜并没有发生完全回复, 回复后检测到的探测光相对光强约为 0.048 cd , 透过率仅为 69%, 并没有恢复到相变前的 77%, 说明此时该能量密度的激光已经对薄膜造成了一定的损伤。当能量密度为 306 MJ/cm^2

时,薄膜的回复更加不完整,回复后透过率仅为 51% 左右,这时薄膜已经发生了部分程度的烧伤,相变过程不再完全可逆,也就是说,此时激光能量密度已经超出了该试样薄膜的激光损伤阈值,薄膜已经无法正常工作。当能量密度继续增加到 357 mJ/cm^2 时,薄膜已经无法回复,透过率一直维持在 8% 左右,同时观察到薄膜的受激光辐照区域也变成了黑褐色。由此可以得知,此时,薄膜已经完全损伤。

此外,通过光学响应测试还得到了同一试样在不同能量密度下的光学关闭时间和回复时间。关闭时间为相变开始至相变完成的时间,回复时间为开始回复至透过率回复到相变前 90% 时的所需时间,其测试结果见表 1。从表中可以看出,当激光能量密度逐渐增加时,薄膜的光学关闭时间逐渐减小,而回复时间逐渐增加,其他膜厚的试样也得到了相似的结论。由此可见,当激光的能量密度在一定的区间内, V_2O_5 薄膜能够很好地起到激光限幅作用。

表 1 350 nm 厚薄膜的光学响应测试数据
Tab.1 Optical response test data of film with 350 nm thickness

Test number	Energy density/ ($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Closing time/ms	Recovery time/ms	Phase-change/recovery transmittance
1	51			(No phase change)/77%
2	102	1.48	11.6	19%/76%
3	204	1.12	13.3	11%/76%
4	255	0.96	20.4	11%/69%
5	306	0.76		10%/51%
6	357	0.64		8%/(No recovery)

为了更为准确地得到 V_2O_5 薄膜的激光损伤阈值,在其可能的范围内 ($255\sim 357 \text{ mJ/cm}^2$),通过补充 281 mJ/cm^2 和 331 mJ/cm^2 两组测试数据,得到了不同能量密度下薄膜试样发生激光损伤的概率,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,当激光能量密度低于 204 mJ/cm^2 时,10 个测试点未发生相变或能够完成相变回复过程,没有发生激光损伤,即未达到激光损伤阈值。激光能量密度增加到 255 mJ/cm^2 时,有 1 个测试点相变后未能回复到正常透射水平,即发生了激光损伤,随着能量密度的继续增加,损伤概率越来越大,直到 357 mJ/cm^2 时,所有测试点均发生损伤。通过零损伤概率判定方法,进行了曲线拟合,得到 350 nm 的 V_2O_5 薄膜激光损伤概率为 0 时的能量密度值约为 244 mJ/cm^2 ,即激光损伤阈值为 244 mJ/cm^2 。

实验对 5 组不同膜厚的 V_2O_5 薄膜的激光损伤阈值都进行了测试,所得的损伤阈值结果如图 5 所示。从折线图中可以看出,当膜厚从 250 nm 增加到 550 nm 时,薄膜的损伤阈值逐渐减小,由 260 mJ/cm^2

降低到 209 mJ/cm^2 ,此时 V_2O_5 薄膜的膜厚效应和表面效应的叠加作用是影响薄膜损伤阈值变化的主要因素。一方面,当 V_2O_5 膜厚增加时,薄膜内部缺陷和杂质便会增加,从而吸收更多的激光能量并传递到晶格中,直至产生最终的宏观损伤^[22-23]。另一方面,薄膜厚度的增加影响了内部驻波场,使驻波场强趋向薄膜吸收系数更大的区域,造成了损伤阈值的降低^[24]。而当膜厚比较低时 (150 nm), V_2O_5 薄膜处于未完全结晶状态,薄膜的表面形貌较差、吸收率高,此时对激光的表面吸收更强,表面效应占了主导地位^[25],以致其激光损伤阈值仅为 224 mJ/cm^2 ,较 250 nm 时有很大幅度的降低。

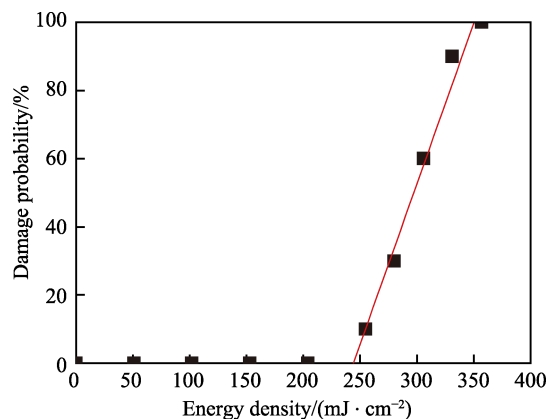


图 4 350 nm 膜厚激光损伤概率示意图
Fig.4 Laser damage probability diagram of film with 350 nm thickness

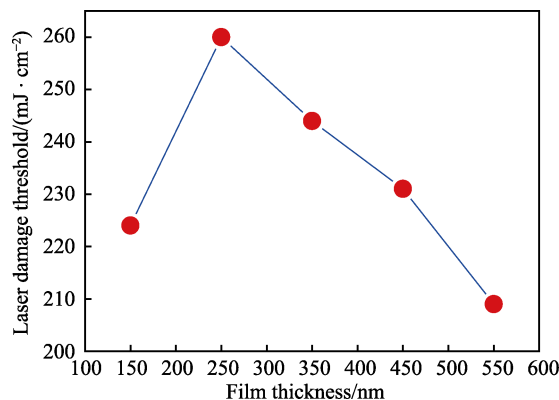


图 5 不同膜厚下的激光损伤阈值
Fig.5 Laser damage threshold under different film thickness

3 结论

实验采用射频磁控溅射法在光学级单晶金刚石衬底上制备了单一组分的多晶薄膜——不同厚度的 V_2O_5 薄膜,其在 (001) 方向上具有择优取向。在波长为 1064 nm、脉宽 10 ns 的脉冲激光器照射下,当激光能量密度逐渐增加时,金刚石衬底的 V_2O_5 薄膜的相变关闭时间逐渐减小,从 102 mJ/cm^2 时的 1.48 ms 减小到 357 mJ/cm^2 时的 0.64 ms;而回复时间逐渐增

加, 从 102 mJ/cm^2 时的 11.6 ms 增加至 255 mJ/cm^2 的 20.4 ms 。相变时及回复后的透过率均随能量密度增加而减小。膜厚为 $250\sim 550 \text{ nm}$ 时, 随着膜厚的增加, 薄膜的激光损伤阈值逐渐降低, 由 260 mJ/cm^2 变为 209 mJ/cm^2 。总体而言, 基于金刚石衬底的 V_2O_5 薄膜表现出了良好的抗激光损伤性能。本文的研究方法和结论能为 V_2O_5 薄膜激光致盲防护性能的研究提供技术指导和理论依据。

参考文献:

- [1] 杜姗, 黄美东, 刘春伟, 等. 氧氩流量比对溅射氧化钒薄膜结构和光学性能的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 24-27.
DU Shan, HUANG Mei-dong, LIU Chun-wei, et al. Influence of gas flow ratio of oxygen and argon on structure and optical properties of sputtered vanadium dioxide thin films[J]. Surface technology, 2013, 42(4): 24-27.
- [2] 王雅琴. 激光防护中的二氧化钒薄膜研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
WANG Ya-qin. VO_2 Film for laser protection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [3] 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.
ZHANG Sheng-bin, ZUO Dun-wen, LU Wen-zhuang, et al. Optical and electrical properties of vanadium pentoxide films prepared by RF reactive magnetron sputtering [J]. Optics & precision engineering, 2015, 23(9): 2438-2445.
- [4] 吴广明, 吴永刚. V_2O_5 薄膜制备, 结构及光学性质研究[J]. 功能材料, 1999(4): 404-406, 413.
WU Guang-ming, WU Yong-gang. Structural and optical properties of reaction evaporated vanadium pentoxide films[J]. Journal of functional materials, 1999(4): 404-406, 413.
- [5] 许旻, 贺德衍. 脉冲溅射 V_2O_5 薄膜结构和性能研究[J]. 光学学报, 2004, 24(6): 743-746.
XU Min, HE De-yan. Microstructural features, electrical and optical properties of pulsed-sputter deposited V_2O_5 thin films[J]. Acta optica sinica, 2004, 24(6): 743-746.
- [6] 黑立富, 闫雄伯, 朱瑞华, 等. 金刚石自支撑膜的高温红外透过性能[J]. 材料工程, 2017, 45(2): 1-6.
HEI Li-fu, YAN Xiong-bo, ZHU Rui-hua, et al. High-temperature infrared transmission of free-standing diamond films[J]. Journal of materials engineering, 2017, 45(2): 1-6.
- [7] 段萌, 张运强, 潘国庆, 等. CVD 金刚石膜与常用红外光学材料抗砂蚀性能对比研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 270-275.
DUAN Meng, ZHANG Yun-qiang, PAN Guo-qing, et al. Comparison of sand erosion resistance of CVD diamond film and common infrared optical materials[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 270-275.
- [8] RAMANA C V, SMITH R J, HUSSAIN O M, et al. Surface analysis of pulsed laser-deposited V_2O_5 thin films and their lithium intercalated products studied by Raman spectroscopy[J]. Surface and interface analysis, 2005, 37(4): 406-411.
- [9] 夏长生, 吴广明, 张志华, 等. 溶胶-凝胶 V_2O_5 薄膜的制备及其电化学特性研究[J]. 功能材料, 2005, 36(1): 86-89, 92.
XIA Chang-sheng, WU Guang-ming, ZHANG Zhi-hua, et al. Preparation and electrochemical properties of V_2O_5 thin films derived by the sol-gel process[J]. Journal of functional materials, 2005, 36(1): 86-89, 92.
- [10] DHAYAL R A, SURESH K P, SABARI A N, et al. Sensitivity studies on vacuum deposited V_2O_5 thin films[J]. Advanced materials research, 2013, 678: 42-45.
- [11] ESTHER A C M, PORWAL D, PRADEEPKUMAR M S, et al. Optical constants of pulsed RF magnetron sputtered nanocolumnar V_2O_5 coating[J]. Physica B physics of condensed matter, 2015, 478: 161-166.
- [12] QING S U, XIAOJUN P A N, ERQING X I E, et al. Influence of temperature on the microstructure of V_2O_5 film prepared by DC magnetron sputtering[J]. Rare metals, 2006, 25(6): 82-87.
- [13] ACOSTA D, PEREZ A, MAGANA C, et al. V_2O_5 thin films deposited by RF magnetron sputtering: the influence of oxygen content in physical properties[J]. Materials science and engineering: A edition in Chinese and English, 2016(3-4): 81-87.
- [14] 朱煜, 刘思杨, 朱子疏, 等. 钒氧化物薄膜的溅射法制备及电学性质研究[J]. 表面技术, 2018(7): 152-159.
ZHU Yu, LIU Si-yang, ZHU Zi-shu, et al. Preparation of vanadium oxides thermochromic thin films in sputtering method and electrical properties[J]. Surface technology, 2018(7): 152-159.
- [15] 许旻, 贺德衍. V_2O_5 薄膜结构和性能研究[J]. 功能材料与器件学报, 2004, 10(1): 19-23.
XU Min, HE De-yan. Microstructural features, properties of vanadium pentoxide thin films[J]. Journal of functional materials and devices, 2004, 10(1): 19-23.
- [16] 骆永全, 王伟平, 罗飞. V_2O_5 薄膜在连续激光防护中的应用研究[J]. 应用激光, 2005, 25(6): 381-383.
LUO Yong-quan, WANG Wei-ping, LUO Fei. Study on the application of vanadium pentoxide thin films in continuous laser protection [J]. Applied laser, 2005, 25(6): 381-383.
- [17] CHEN X R, HU J Z, HAN W Z, et al. Study on electrical properties and 1064 nm pulse laser damage of vanadium oxide thin film[J]. Key engineering materials, 2008, 373-374: 730-733.
- [18] 吴慎将, 施卫, 苏俊宏. 激光场强分布对类金刚石薄膜激光损伤阈值的影响[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(1): 45-48.
WU Shen-jiang, SHI Wei, SU Jun-hong. The influence of

- laser field to dlc film's damage threshold[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(1): 45-48.
- [19] 徐海钊, 原晓峰, 张哲, 等. 紫外激光单脉冲辐照损伤金属薄膜的数值模拟研究[J]. 光学仪器, 2017, 39(4): 77-84.
- XU Hai-zhao, YUAN Xiao-feng, ZHANG Zhe, et al. Numerical simulation of the irradiation damage on metal films by single UV laser pulse[J]. Optical instruments, 2017, 39(4): 77-84.
- [20] 甘荣兵, 林理彬, 蒋晓东, 等. 用透射反射扫描法检测光学薄膜的激光损伤[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1): 45-48.
- GAN Rong-bing, LIN Li-bin, JIANG Xiao-dong, et al. Determinant of laser-induced-damage of thin film by the scan of transmission and reflectance[J]. High power laser and partical beams, 2002, 14(1): 45-48.
- [21] KRISHNA M G, BHATTACHARYA A K. Effect of thickness on the optical absorption edge of sputtered vanadium oxide films[J]. Materials science & engineering B, 1997, 49(2): 166-171.
- [22] WANG H, HUANG Z, ZHANG D, et al. Thickness effect on laser-induced-damage threshold of indium-tin oxide films at 1064 nm[J]. Journal of applied physics, 2011, 110(113111): 1-5.
- [23] KUMAR S, SHANKAR A, KISHORE N. Influence of thickness and wavelength on laser damage threshold of SiO₂ and multilayer TiO₂/SiO₂ thin film[J]. Journal of integrated science and technology, 2018, 6(1): 13-18.
- [24] 李鹏. PECVD 技术制备光学薄膜损伤特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2015.
- LI Peng. Research on laser damage properties of optical thin films prepared by PECVD[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015.
- [25] VOHRA A, BANSAL S K, SHARMA R K, et al. Surface effects on laser-induced damage in Si[J]. Journal of physics D applied physics, 1990, 23(1): 56-66.

(上接第 138 页)

- [2] BAIK S H. High damping Fe-Mn martensitic alloys for engineering applications[J]. Nuclear engineering & design, 2000, 198(3): 241-252.
- [3] YU Xue-yong, GAO Guo-lin, YUAN Li. Research development of Fe-Mn based high damping alloys[J]. Foundry technology, 2012, 33(7): 774-776.
- [4] 陈一胜, 刘萍, 闫丰. 铜阻尼合金的研究和发展现状[J]. 上海金属, 2007, 29(3): 54-58.
- CHEN Yi-sheng, LIU Ping, YAN Feng. Research and development of copper damping alloys[J]. Shanghai metal, 2007, 29(3): 54-58.
- [5] 施瑞鹤, 华瑞起, 盛宗毅. 锰铜高阻尼合金的熔炼[J]. 热加工工艺, 1987(5): 46-49.
- SHI Rui-he, HUA Rui-qi, SHENG Zong-yi. Melting of manganese-copper high damping alloy[J]. Hot processing technology, 1987(5): 46-49.
- [6] LIU K F, WANG T, HE Q. Development of high damping Mn-Cu alloy TIG welding wire MC7301 patent[J]. Ship science and technology, 1993(5): 42-48.
- [7] LU L, FUH J Y H, CHEN Z D. In-situ formation of TiC composite using selective laser melting[J]. Materials research bulletin, 2000, 35: 1555-1561.
- [8] YIN F X, SATOSHI I, TAKUYA S, et al. The improved damping behavior of Mn-Cu high damping alloy obtained by solidification process control[J]. Progress in physics, 2006, 26: 323-331.
- [9] WU Y Q, YIN F X, HONO K. The decomposed γ -phase microstructure in a Mn-Cu-Ni-Fe alloy studied by HRTEM and 3D atom probe[J]. Scripta materialia, 2002, 46(10): 717-722.
- [10] ZHONG Y, SAKAGUCHI T, YIN F. Effects of transformation twin on Hall-Petch relationship in Mn-Cu alloy[J]. Materials science & engineering A, 2008, 492(1-2): 419-427.
- [11] SONG Y Q, LI S C. Sintering feature of Cu and Mn metallic powders[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2001, 25(5): 76-78.
- [12] FUKUHARA M, YIN F, OHSAWA A Y, et al. High damping properties of Mn-Cu sintered alloys[J]. Materials science, 2006, 442(1-2): 439-443.