

文章编号: 1000-7032(2018)07-0942-06

# MBE 法制备 VO<sub>2</sub> 薄膜及其中红外调制深度测量

刘志伟<sup>1,2,3</sup>, 路 远<sup>1,2,3\*</sup>, 侯典心<sup>1,2,3</sup>, 邹崇文<sup>4</sup>

(1. 国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037; 2. 红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037;  
3. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037; 4. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 为了给 VO<sub>2</sub> 薄膜在定向红外对抗系统防护方面的应用提供理论依据, 我们用透过率调制深度表征 VO<sub>2</sub> 薄膜在中红外波段的相变特性。本实验利用分子束外延法(MBE)制备 VO<sub>2</sub> 外延单晶薄膜, 经 XRD、AFM 表征, 发现其具有(020)择优取向、纯度较高, 薄膜表面平整、均匀且致密。经 VU-Vis-IR 测量发现其近红外透过率相变特性显著, 但在紫外和可见光范围内透过率相变特性较不明显。然后我们对制备时间为 30 min、40 min 的两组薄膜分别进行 25 ~ 70 °C 的升温 and 降温实验, 观察其对波长为 3 459 nm、脉宽 50 ns、重频 50 kHz、功率密度 0.14 W/cm<sup>2</sup> 的中红外激光的透过率变化, 并比较两组薄膜的温滞曲线特性。实验发现它们对中红外透过率的调制深度均可达 60% 以上, 前者比后者对中红外的调制深度高出约 4%。这说明利用分子束外延法制备的 VO<sub>2</sub> 单晶薄膜具有良好的中红外调制特性, 且调制深度和膜厚有关。进一步表明了利用 VO<sub>2</sub> 薄膜实现中红外激光防护具有一定的可行性。

**关 键 词:** 分子束外延; VO<sub>2</sub> 薄膜; 透过率调制深度; 中红外激光防护

中图分类号: O434.14

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183907.0942

## VO<sub>2</sub> Thin Films Prepared by MBE and Measurements of Mid-infrared Modulation Depth

LIU Zhi-wei<sup>1,2,3</sup>, LU Yuan<sup>1,2,3\*</sup>, HOU Dian-xin<sup>1,2,3</sup>, ZOU Chong-wen<sup>4</sup>

(1. *Electronic Countermeasures Institute of National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;*

2. *Infrared and Low Temperature Plasma Key Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China;*

3. *State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;*

4. *National Synchronous Radiation Laboratory of University of Science and Technology of China, Hefei 230037, China)*

\* *Corresponding Author, E-mail: luyuanmail@163.com*

**Abstract:** In order to provide the theoretical basis for the application of VO<sub>2</sub> thin films to anti-directional infrared countermeasures system, the phase transition characteristics of VO<sub>2</sub> thin films in the infrared band were characterized by the transmittance modulation depth. At first, VO<sub>2</sub> epitaxial mono crystalline thin films were prepared by molecular beam epitaxy(MBE), and then characterized by X-ray diffraction(XRD), atomic force microscope(AFM). It is found that it has (020) preferential orientation, high purity VO<sub>2</sub> in the thin films, the surface of thin films is smooth, uniform and dense. The near infrared transmittance phase transmittance property is found to be outstanding by VU-Vis-IR measurement, however, it is less obvious in ultraviolet and visible light. We took an experiment that transmittance variation for mid-infrared from 25 to 70 °C temperature rising and cooling process based on two groups of VO<sub>2</sub> prepared for 30 min and 40 min, respectively. The mid-infrared laser was used in the experiment with 3 459 nm wavelength, 50 ns pulse width, 50 kHz repetition

收稿日期: 2017-09-26; 修订日期: 2017-11-24

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金(SKL2013ZR03)资助项目

Supported by State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(SKL2013ZR03)

frequency, and 0.14 W/cm<sup>2</sup> power density. The two temperature hysteresis curves were compared. It is found that the transmittance modulation depth of mid-infrared of them both can reach over 60%, and the former group is about 4% higher than the latter group in transmittance modulation depth in mid-infrared. This indicates that the VO<sub>2</sub> mono crystalline films prepared by the molecular beam epitaxial method have good mid-infrared transmittance modulation characteristics, and the modulation depth is related to film thickness. It is further demonstrated that it is feasible to put VO<sub>2</sub> thin films into anti-directional infrared countermeasures system.

**Key words:** molecular beam epitaxy (MBE); VO<sub>2</sub> thin films; transmittance modulate depth; mid-infrared laser protection

## 1 引 言

VO<sub>2</sub> 是一种具有相变特性的功能材料,相变温度接近室温,为 68 °C 左右。在相变温度附近,VO<sub>2</sub> 的禁带宽度将发生变化,发生绝缘体-金属体的相转变,材料的诸多物理参数,如折射率、红外透射率、电阻率等将发生变化,在宏观上表现为相变前后光学和电学物理性质发生突变,是当前的研究热点<sup>[1-5]</sup>。人们利用相变前后红外透过率大幅降低的特性,可以设计出防高温红外线的绿色建筑用的节能玻璃<sup>[6]</sup>,也可以在激光防护领域有所应用<sup>[7]</sup>,这些研究都基于 VO<sub>2</sub> 的薄膜形式。已有报道的 VO<sub>2</sub> 薄膜制备方法有真空蒸镀法<sup>[8-9]</sup>、磁控溅射法<sup>[10-11]</sup>、脉冲激光沉积法<sup>[12-13]</sup> 以及某些化学方法,比如溶胶-凝胶法<sup>[14]</sup> 等,这些报道均成功制备出了具有相变特性的 VO<sub>2</sub> 薄膜,但是由于各种方法原理不同、工艺流程不同,造成薄膜的质量并不够理想,主要体现在薄膜和基底的结晶度不高、均匀性和致密性不够、不能大面积生长、薄膜组分不纯等。目前可以对薄膜生长的各项参数进行精确控制的方法有分子束外延法,能够制备出质量很高的 VO<sub>2</sub> 外延单晶薄膜<sup>[15]</sup>。由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 VO<sub>2</sub> 的良好晶格匹配关系,易于利用分子束外延法在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基底上生长单晶 VO<sub>2</sub> 薄膜。此外,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜对可见光和红外光都具备良好的透过率,满足 VO<sub>2</sub> 薄膜的实际应用和光学特性研究。因此,我们选择在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基底上进行 VO<sub>2</sub> 薄膜的生长,并对制得的 VO<sub>2</sub> 薄膜进行了 XRD、AFM、VU-Vis-IR 表征。针对 VO<sub>2</sub> 相变后对中红外光透过率降低的特性,可以防护红外定向对抗系统的中红外激光,但是为了进一步向实际应用靠拢,需要测量它在相变前后对红外光的透过率的实际衰减程度,用调制深度进行表征,即相变前

后的透过率调制深度越大,理论上防护激光的性能越好。

我们利用 MBE 法制备 VO<sub>2</sub> 薄膜,搭建了实验平台,测试了两组制备时间不同的薄膜在外加激励热源的情况下,相变前后对中红外激光的透过率变化特性,并对两组薄膜的温滞曲线做了比较,分析了他们相变前后对中红外激光的透过率调制深度,并初步定性地比较了和膜厚的关系。

## 2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基 VO<sub>2</sub> 薄膜的分子束外延法制备

### 2.1 实验设备和材料准备

图 1 所示为氧源分子束外延设备(O-MBE),利用它来制备 VO<sub>2</sub> 薄膜。它主要由腔体、电子束蒸发系统、气体活化源以及真空系统组成,工作原理如图 2 所示。

其中腔体主要由预处理室、进样室和生长室组成。预处理室和进样室为准备室,生长室内配备了为基底加热的高温样品架,能够实时获得薄膜表面重构、显微结构和表面光滑度信息的反射式高能电子衍射仪(RHEED),以及真空检测和温度监控仪、膜厚测试仪等。其中膜厚测试仪采用了 MAXTEK 公司的 TM-350 石英晶振膜,测量精度达到 0.01 nm,能够对薄膜生长的速率和厚度进行实时检测。气体活性对制备氧化物材料至关重要,对成膜速率和质量都有影响,因此我们采用了美国 SVTA 公司的射频气体活化源,能够将 H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 以及 H<sub>2</sub>S 等气体裂解成高活性的原子状态,并配备光谱仪来实时监控气体等离子发光的光谱。分子束外延过程对真空度要求极高,利用三级真空系统(机械泵、分子泵、离子泵和钛升华泵),可以使主室的底真空达到  $6 \times 10^{-8}$  Pa,保证实验环境符合要求。

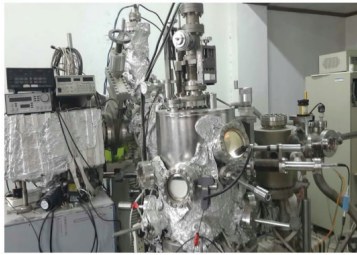


图 1 氧源分子束外延设备 (O-MBE)

Fig. 1 Oxygen source molecular beam epitaxial equipment (O-MBE)

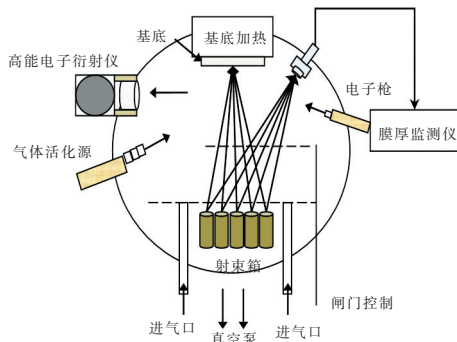


图 2 分子束外延法工作原理示意图

Fig. 2 Principle of MBE

实验过程中需要用到的材料如下:洁净的单晶  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  基底,直径 5.08 (2 in),厚 0.5 mm;靶源,99.5% 纯度金属钒粉;纯氧,纯度达 99.9999%;纯氮,纯度达 99.9999%。

## 2.2 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基 $\text{VO}_2$ 薄膜制备过程

为了减少基底表面的有机物、氧化物及灰尘颗粒等杂质对外延生长的不利影响,在实验前需要对基底进行清洗。首先利用 JK100B 超声波清洗仪对基底表面进行去离子水清洗 20 min,再先后用丙酮溶液和无水乙醇清洗 15 min,最后取出用吹风机吹干待用。

将清洗好的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  单晶衬底传送至高真空生长室,抽真空使本底压强优于  $1 \times 10^{-6}$  Pa。旋转衬底,并将衬底加热到  $500 \sim 650$  °C。在金属钒粉体被加热至蒸发状态后,打开气体活化源并通入氧气,将钒原子束和活性氧原子束喷射到衬底上进行反应。观察晶振膜厚仪数字变化,控制钒原子束流速在  $0.9 \sim 1.5$  nm/min,利用气体流量计控制氧原子束流速在  $3.5 \sim 4.5$  cm<sup>3</sup>/min,根据要求设置薄膜生长时间为 30 min (40 min)。薄膜沉积完成后,为防止剩余氧气继续氧化  $\text{VO}_2$  薄

膜,通入保护气体  $\text{N}_2$ ,使真空室温度自然冷却到  $200$  °C 以下,取出制备的  $\text{VO}_2$  薄膜样品。

## 3 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基 $\text{VO}_2$ 薄膜的表征

分子束外延生长所得的  $\text{VO}_2$  薄膜表面光洁,呈现浅黄色半透明状。为进一步研究所得  $\text{VO}_2$  薄膜的物相特性,对薄膜的成分特性、表面特征、光学特性分别进行了表征。

### 3.1 $\text{VO}_2$ 薄膜结晶特性分析

利用 XRD 对薄膜结晶状态进行分析,其衍射图谱如图 3 所示。

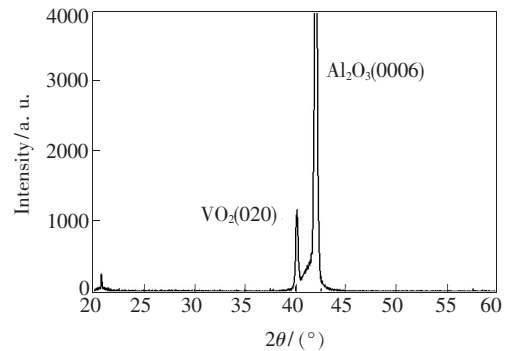


图 3  $\text{VO}_2$  薄膜 XRD 衍射图谱

Fig. 3 XRD patterns of  $\text{VO}_2$  thin films

从图 3 中看出,在  $2\theta = 40^\circ$  和  $2\theta = 42^\circ$  出现两个明显的衍射尖峰,与标准物相卡片比对后发现他们分别是 (020) 取向的  $\text{VO}_2$  晶体衍射峰和 (0006) 取向的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衍射峰,此外并没有观察到其他的衍射峰,说明制备的  $\text{VO}_2$  薄膜具有较纯的晶相结构和择优生长取向。

### 3.2 $\text{VO}_2$ 薄膜表面形态特征分析

为了观察  $\text{VO}_2$  薄膜的表面形貌特征,采用原子力显微镜 (AFM) 对薄膜表面进行观察扫描,使用仪器是 DI Multimode V 扫描探针显微镜,得到

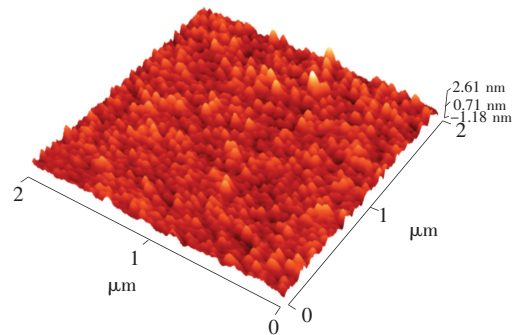


图 4  $\text{VO}_2$  薄膜的 AFM 表面微观形貌

Fig. 4 AFM surface morphology of  $\text{VO}_2$  thin films



表面形貌如图 4 所示。可以看出,采用分子束外延法制得的 VO<sub>2</sub> 薄膜表面形成“麦穗状”的纳米颗粒簇,颗粒饱满,排列致密,对表面粗糙度进行计算,其均方根值只有 0.38 nm,表明所得 VO<sub>2</sub> 薄膜表面平整光滑,缺陷很少,质量很高。

### 3.3 VO<sub>2</sub> 薄膜光学透过率分析

采用 VU-Vis-IR 分光光度计分别在 25, 90 °C 条件下对 VO<sub>2</sub> 薄膜进行光谱扫描,其透过率变化曲线如图 5 所示。可以看出,在紫外和可见光波段,两个温度下的透过率基本保持一致,且呈线性上升趋势;而在近红外和中红外波段,25 °C 的光谱透过率曲线随波长增大进一步逐渐上升,表明低温状态下 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基 VO<sub>2</sub> 薄膜的良好透过率;而 90 °C 的光谱透过率曲线则随波长增大逐渐下降。

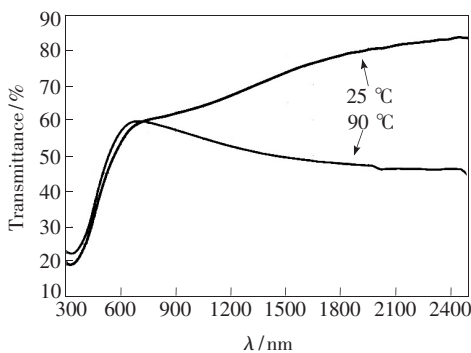


图 5 VU-Vis-IR 分光光度计下薄膜透过率随波长的变化曲线

Fig. 5 Wavelength-transmittance curve of VO<sub>2</sub> thin film under VU-Vis-IR spectrophotometer

## 4 中红外激光辐照 VO<sub>2</sub> 薄膜的相变特性

从以上分析可知,我们利用分子束外延法得到了单一结晶取向、表面平整、在近红外/中红外波段具有一定透过率突变特性的高质量 VO<sub>2</sub> 薄膜,为了进一步验证它是否具有有良好的相变特性以用于强激光衰减,我们对其在中红外脉冲激光辐照下的温升相变特性进行了实验记录和分析。

本实验采用的激光器为南京大学介电体超晶格实验室自主研发设计的宽调谐中红外波段纳秒级脉冲激光器,如图 6 所示。

其中,(1)为宽调谐中红外激光器,(2)为光纤泵浦源,(3)为电源控制器。该激光器由 1 064 nm 激光泵浦,共有 8 个工作通道,工作物质为周期极化的铌酸锂晶体,通过改变工作通道和谐振

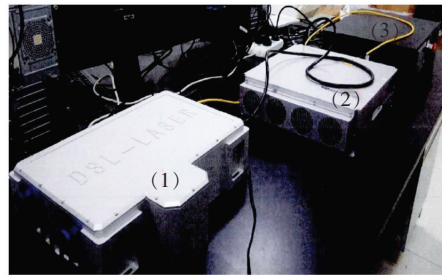


图 6 中红外激光器实物图

Fig. 6 Physical image of mid-infrared laser

腔温度控制晶体长度,使得工作波长在 2 700 ~ 4 300 nm 范围内连续可调,重复频率为稳定 50 kHz,脉宽为 50 ns,受工作晶体抗压强度限制,输出功率在 0 ~ 1 W 范围内连续可调。

先利用激光直接照射 VO<sub>2</sub> 薄膜,选择通道 3,温度设置为 80 °C,此时波长为 3 459 nm。逐步增加激光功率,发现功率计显示的透过功率和输出功率之比在 80% 之上,说明直接照射薄膜温升效应不明显,达不到薄膜相变的条件,因此采用加热系统对薄膜样品进行加热,观察此时 VO<sub>2</sub> 薄膜的相变特性及对激光功率的衰减效应,其光路设计如图 7 所示。

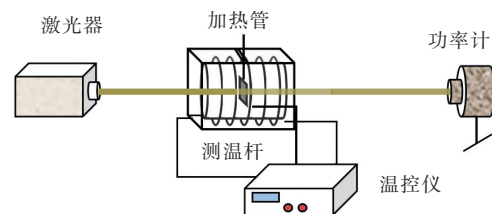


图 7 激光辐照加热 VO<sub>2</sub> 薄膜光路示意图

Fig. 7 Laser irradiation heating VO<sub>2</sub> thin film optical path diagram

选择激光波长仍为 3 459 nm,固定输出功率为 1.0 W,温度范围控制在 25 ~ 70 °C,录制视频,并采集数据,利用 Origin 8.0 绘制温滞曲线图,比较制备 30 min 和 40 min 两组膜(以下简称 30 min 薄膜和 40 min 薄膜)的温滞曲线特性,同时对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基底也进行了温升透过率实验,结果如图 8 所示。

图 8 显示,蓝宝石 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基底在整个温升 25 ~ 70 °C 过程中,对中红外 λ = 3 459 nm 激光的透过率始终保持在 90% 以上,但是随着温度升高,透过率略有升高,这可能是功率计离加热管太近,受加热管的热辐射影响造成的。观察 30 min 薄膜和 40 min 薄膜的相变特性曲线可以发现,其

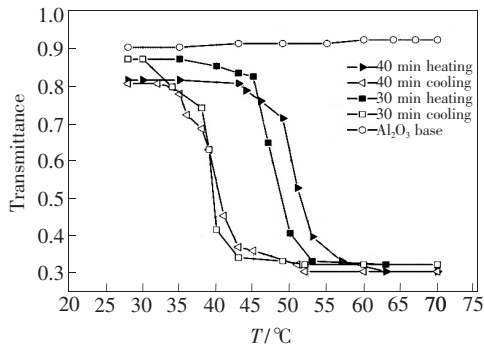


图 8 MBE 法制备的 30, 40 min 两组薄膜的温滞曲线及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基底升温透过率曲线。

Fig. 8 Transmittance-temperature curve of VO<sub>2</sub> thin films prepared for 30, 40 min by MBE.

室温透过率都在 80% 以上,说明 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基 VO<sub>2</sub> 薄膜在室温下对中红外透过率良好,而在高温 (>60 °C) 情况下,它们的透过率明显降低,均在 35% 以下。比较两条温滞曲线,发现 30 min 薄膜室温透过率比 40 min 薄膜高出约 4%;而高温透过率则很接近,均为 30% 左右,且 30 min 薄膜的相变温度约为 45 °C 左右,而 40 min 薄膜的相变温度约为 49 °C。温滞宽度方面,40 min 薄膜比 30 min 薄膜宽了约 3 °C。

## 5 结 论

VO<sub>2</sub> 薄膜具有相变特性,相变后对红外波段的透过率衰减较为明显,基于该特性,可以将 VO<sub>2</sub> 薄膜用到对定向红外对抗系统中的红外激光的防

护,以保护探测器不受强激光干扰致盲。但是需要测量出其相变前后的红外透过率相对变化率,以便为实际应用提供理论依据。用透过率调制深度表征,调制深度越大,说明 VO<sub>2</sub> 薄膜用于衰减强激光的可行性越强。

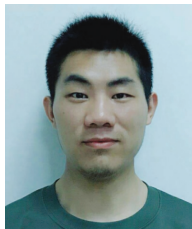
本文利用分子束外延法制备出了表面光洁、呈浅黄色半透明状的 VO<sub>2</sub> 薄膜,薄膜结晶良好,纯度高,表面均匀致密,室温下对中红外波段的透过率达到 80% 以上,在有外加激励热源的情况下,于 45 °C 左右发生相变,相变前后对  $\lambda = 3\ 459\ \text{nm}$  的中红外激光透过率的调制深度可达 60% 以上。并比较了 30 min 薄膜和 40 min 薄膜的温滞曲线特性,发现制备的时间越久,即薄膜越厚,相变前对中红外透过率越低,温滞宽度也越宽,调制深度也相对较低。具体的,30 min 薄膜的中红外透过率调制深度比 40 min 薄膜高出约 4%,温滞宽度比 40 min 薄膜小约 3 °C。

VO<sub>2</sub> 薄膜用于防护定向红外对抗系统的激光,要求其具备室温下可见光和红外透过率高,有激光干扰时对红外透过率低,具有大的红外调制深度薄膜可以很好地满足这点。其次,还需要满足相变温度尽可能接近室温,温滞宽度尽可能小等要求。文章从薄膜的制备、表征等方面出发,结合实验,测量了 VO<sub>2</sub> 薄膜对中红外激光的透过率调制深度,验证了 MBE 法制备的 VO<sub>2</sub> 薄膜具备优良的中红外透过率调制特性,这对以后应用于中红外激光防护具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] MORIN F J. Oxide which show a metal-insulator transition at the neel temperature [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1959, 13(1): 34-36.
- [ 2 ] SRI S, SAI L, KUMAR V, *et al.*. Study of nonlinear optical properties of sodium doped V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nano particles [J]. *Int. J. Nanotechnol. Appl.*, 2014, 4(3):21-28.
- [ 3 ] GOODENOUGH J B. The two components of the crystal graphic transition in VO<sub>2</sub> [J]. *Solid State Chem.*, 1971, 3:490-500.
- [ 4 ] MAAZA M, HAMIDI D, GIBAUD A, *et al.*. Optical activity of VO<sub>2</sub> based nanophotonics [J]. *ICTON IEEE*, 2011, 13: 1-7.
- [ 5 ] 徐凯, 路远, 凌永顺, 等. 氧化热处理对 VO<sub>2</sub> 薄膜红外光学相变特性的影响 [J]. *激光与红外*, 2015, 45(1): 53-57.  
XU K, LU Y, LING Y S, *et al.*. Effects of oxidational annealing on infrared optical phase transition properties of VO<sub>2</sub> thin films [J]. *Laser Infrared*, 2015, 45(1):53-57. (in Chinese)
- [ 6 ] HUANG Z L, CHEN S H, LV C H, *et al.*. Infrared characteristics of VO<sub>2</sub> thin film for smart window and laser protection applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(19):191905-1-4.

- [ 7 ] 王雅琴,姚刚,黄子健,等. 用于红外激光防护的高开关率 VO<sub>2</sub> 薄膜 [J]. 物理学报, 2016, 65(5):057102-1-6.  
WANG Y Q, YAO G, HUANG Z J, *et al.*. Infrared laser protection of multi-wavelength with high optical switching efficiency VO<sub>2</sub> film [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2016, 65(5):057102-1-6. (in Chinese)
- [ 8 ] MARVEL R E, APPAVOO K, CHOI B K, *et al.*. Electron-beam deposition of vanadium dioxide thin films [J]. *Appl. Phys. A*, 2013, 111:975-981.
- [ 9 ] 王玉泉. 钒氧化物纳米材料的制备和性能 [D]. 北京:清华大学, 2008.  
WANG Y Q. *Research on The Preparation and Properties of Nano Vanadium Oxide Materials* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- [10] 后顺宝,胡明,吕志军,等. 快速热处理对磁控溅射 VO<sub>2</sub> 薄膜光电特性的影响 [J]. 中国激光, 2012, 39(1):0107002-1-6.  
HOU S B, HU M, LV Z J, *et al.*. Influence of rapid thermal progress conditions on electrical and optical properties of VO<sub>2</sub> thin film [J]. *Chin. J. Lasers*, 2012, 39(1):0107002-1-6. (in Chinese)
- [11] BEYDAGHYAN G, BASQUE V, ASHIRT P V. High contrast thermochromic switching in vanadium dioxide(VO<sub>2</sub>) thin films deposited on indium tin oxide substrates [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 522:204
- [12] HASHEMI M R, BERRY C W, MERCED E, *et al.*. Direct measurement of vanadium dioxide dielectric properties in W-band [J]. *Infrared Milli Terahz Waves*, 2014, 35:486-492.
- [13] 王海方,李毅,蒋群杰,等. 脉冲激光沉积法制备二氧化钒薄膜的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(6):48-53.  
WANG H F, LI Y, JIANG Q J, *et al.*. Research progress of vanadium dioxide thin film fabricated by pulsed laser deposition [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2009, 46(6):48-53. (in Chinese)
- [14] 颜家振,黄婉霞,李宁. 复合薄膜的结构和红外光学性质研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9):2485-2489.  
YAN J Z, HUANG W X, LI N. Structure and infrared optical properties of VO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> multilayer film [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2013, 42(9):2485-2489. (in Chinese)
- [15] CHEN F H, FAN L L, CHEN S, *et al.*. Control of the metal-insulator transition in VO<sub>2</sub> epitaxial film by modifying carrier density [J]. *ACS Appl. Mater. Interf.*, 2015(7):6875.



刘志伟(1993 -),男,安徽合肥人,硕士研究生,2016年于安徽大学获得学士学位,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: LZWundt1439836564@126.com



路远(1971 -),男,安徽萧县人,博士,教授,博士生导师,2004年于电子工程学院获得博士学位,主要从事光学工程方面的研究。

E-mail: luyuanmail@163.com