

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205875

自激励二氧化钒薄膜及抗激光干扰红外热成像^{*}

路 远^{1,2,3} 周长祺^{1,2,3} 吴 昌^{1,2,3} 邹崇文⁴

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

摘 要:激光干扰能够对热像仪产生饱和、眩光等干扰,对成像质量造成严重影响。二氧化钒是一种相变材料,在低温半导体态时,对红外辐射高透射,在高温金属态时,对红外辐射高反射。该特性可以用于红外热像仪对激光干扰的防护。利用分子束外延法制备了自激励二氧化钒薄膜,搭建了实验装置测量了薄膜对中红外激光的透过率。该薄膜在 3.525 μm 波长上半导体态时对激光的透过率为 0.693,高温金属态时透过率为 0.069。利用该薄膜进行了二氧化钒薄膜防护中红外激光干扰热像仪的试验。实验结果表明,二氧化钒薄膜为半导体态时,入射激光能量大部分能够透射二氧化钒薄膜,从而对热像仪造成严重干扰;二氧化钒薄膜为金属态时,入射激光能量绝大部分被衰减,激光对热像仪的干扰程度大幅度降低。二氧化钒薄膜可以用于热像仪对激光干扰的防护。

关键词: 自激励二氧化钒薄膜;中红外激光;热像仪;干扰;防护
中图分类号: TN97 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.30

Self-excited vanadium dioxide film and its prevention of laser interference infrared thermal imaging

Lu Yuan^{1,2,3} Zhou Changqi^{1,2,3} Wu Chang^{1,2,3} Zou Chongwen⁴

(1. Infrared and Low Temperature Plasma Key Laboratory of Anhui Province, College of Electronic Countermeasures, NUDT, Hefei 230037, China; 2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Electronic Countermeasures, NUDT, Hefei 230037, China; 3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, College of Electronic Countermeasures, NUDT, Hefei 230037, China; 4. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230037, China)

Abstract: Laser interference can cause interference such as saturation and glare to thermal imager, it seriously affects the image quality. Vanadium dioxide is a phase change material, which has high transmission of infrared radiation at low temperature semiconductor state. In the high temperature metallic state, vanadium dioxide has highly reflectance of infrared radiation. This characteristic can be used to protect infrared thermal imager from laser interference. Self-motivated phase transition vanadium dioxide thin films were prepared by molecular beam epitaxial method, and the transmittance of thin films to mid-infrared laser was measured by an experimental device. The transmittance of the film in semiconductor state is 0.693 and 0.069 in metallic state at 3.525 μm wavelength. An experiment using the vanadium dioxide thin film to protect the thermal image from the middle infrared laser interfering was done. The experimental results show that when the vanadium dioxide film is semiconductor state, most of the incident laser energy can transmit the vanadium dioxide film, which will cause serious interference to the thermal imager. When vanadium dioxide film is in metallic state, most of the incident laser energy is attenuated, and the interference degree of laser to the thermal imager is greatly reduced. Vanadium dioxide thin film can be used to protect thermal imager from laser interference.

Keywords: self-excited vanadium dioxide film; mid-infrared laser; thermal imager; interference; protect

收稿日期: 2022-10-03 Received Date: 2022-10-03

^{*} 基金项目: 安徽省自然科学基金(1908085MA13)、国防科技大学种子基金(KY22C301)项目资助

0 引言

对于红外成像探测器来说,其探测对象往往都是弱小信号^[1-2],因而探测器一般灵敏度都很高,光电探测器在使用过程中,也容易受到各种各样的杂光干扰,从而对目标探测和测量造成影响^[3]。激光作为一种优质光源,在现代仪器系统中广泛使用。常用于精确测距^[4]、清理异物^[5]、视觉定位^[6]和测量风场^[7]等。激光具有方向性好,能量密度高的特点,当激光入射到探测器表面时,探测器很容易因为入射激光的能量密度大而饱和,激光这种特性也被用于干扰红外热成像系统,并且已经在得到了应用^[8]。

人们对利用激光干扰探测器开展了较多的研究,Ikemoto 等^[9]研究了光导 MCT 探测器的饱和特性,利用红外同步辐射和红外自由电子激光对探测器饱和行为进行了详细的研究。李祉涵^[10]研究了激光对红外导引头成像的干扰以及受激光干扰后对制导性能的影响两个方面。Zhang 等^[11]研究了激光辐照图像传感器的干涉机理。Wang 等^[12]以研究了散射效应引起的激光在探测器上的能量分布。Liu 等^[13]研究了激光武器对红外导弹的软毁伤。杨振等^[14]研究利用高吸收型陶瓷涂层材料增加探测器像面上的饱和功率密度阈值。

为了降低激光对红外探测器的干扰,实现热像仪在激光干扰情况下能够正常成像,本文以二氧化钒薄膜做为防护材料,制备了具有自激励相变功能的二氧化钒复合薄膜,利用该薄膜研究了其对激光干扰红外热像仪的防护作用。

1 二氧化钒薄膜的光电性质

钒是一种稀有金属,它的氧化物具有多种价态,在一定的温度下钒氧化物会发生相变,呈现出不同的光学和电学性质。1959 年,科学家 Miron 在贝尔实验室首次发现钒的氧化物具有半导体—金属相变特性,在氧化钒的众多价态的氧化物中,二氧化钒(VO_2)的相变温度接近室温,为 $68\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。在相变温度附近, VO_2 的禁带宽度将发生变化,发生半导体—金属体的相变。随之材料的各种物理参数(如折射率、红外透射率、电阻率等)都将发生突变,在宏观上表现为相变前后光学和电学性质发生突变。 VO_2 这种相变的特性使其具有很强的应用潜力^[15-16]。分子束外延法(molecular beam epitaxy, MBE)是对薄膜生长的各项参数进行精确控制的比较好的方法,能够制备出质量很高的 VO_2 外延单晶薄膜。二氧化钒在智能窗^[17-18]、光开关^[19]、激光防护^[20]、其他光电传

感器^[21-24]等方面具有众多的应用潜力。本文利用分子束外延法在氮化镓衬底上制备了二氧化钒薄膜,并利用该薄膜进行抗定向红外干扰研究。

在室温下,红外光谱在半导体态的 VO_2 中的透过率很高,当温度升高到相变温度时, VO_2 发生相变,变成金属相以后,由于金属中电子等离子振荡行为,会出现一定的截止频率,当入射光的频率低于金属中电子等离子振荡的频率时,入射光会被反射,所以红外光谱在金属相 VO_2 中的透过率很低,这种相变过程为利用二氧化钒防护红外探测器提供了可能。

图 1 给出了利用分子束外延法所制备的二氧化钒薄膜在高温金属态和低温半导体态时的光谱透过率,可以看到,在红外区,随着波长的增加,二氧化钒薄膜透过率变化幅度在增大。从图 1 可以看出,二氧化钒薄膜在相变前后,其红外辐射透过率很发生很大的变化,金属态二氧化钒薄膜的红外辐射透过率大幅度降低。 VO_2 这种特殊光学特性使其能够用作激光防护材料,来对抗激光对探测器的干扰,其相变前的高透过率不影响探测器接收信号,而相变后的低透过率又使得激光不能对探测器产生伤害,因此可以有效对抗激光对红外探测器的眩光和饱和。

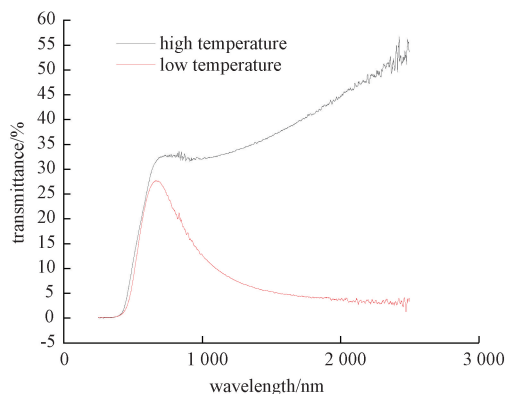


图 1 二氧化钒薄膜在高温金属态和低温半导体态时的光谱透过率

Fig. 1 The spectral transmittance of vanadium dioxide thin films in high temperature metallic state and low temperature semiconductor state

图 1 给出了 VO_2 在高温和低温的红外透过率光谱以及相变前后透过率变化情况。二氧化钒材料的这种特殊的光学特性使其具备对抗激光干扰红外成像探测器的潜力。目前研究二氧化钒薄膜对热像仪的防护,多是通过外加热激励的方式实现薄膜的相变,薄膜温度控制难以精确,本文使用 $\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合衬底,完成 $\text{VO}_2/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合膜结构,实现了可控加热层、红外透射调制层的一体化制备,从而更方便于 VO_2 薄膜的实用。

2 自激励二氧化钒薄膜制备及其性能分析

2.1 自激励二氧化钒薄膜制备及相变性能

二氧化钒薄膜在常温下是半导体态,在高温时相变为金属态,二氧化钒薄膜通常都是镀制在衬底上,当前的研究中,多是通过外加激励的方式控制温度使其发生相变来研究薄膜的相变性能。常用的对二氧化钒薄膜进行加热激励方式有电加热、辐射加热、空气加热、激光辐照加热等,这些加热方式通常都是利用外部热源将薄膜加热到相变温度以上。这些加热方式一般难以实现精确的温度控制,多是通过观察薄膜透射率的变化来判断是否相变。为实现薄膜温度的精确控制,设计一种新式结构来控制二氧化钒薄膜的温度,采用 $\text{VO}_2/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合膜结构。在该结构中,将二氧化钒薄膜温度的控制功能集成到了所制备的器件中,使器件温度控制不再需要外部热源,实现器件自身对相变的温度自激励。器件结构如图2所示,底层为 Al_2O_3 ,在 Al_2O_3 衬底上生长了一层氮化镓(GaN)薄膜,GaN是一种新型半导体材料,具有较大的禁带宽度,采用 GaN 目的是利用其半导体特性,通电后可以产生热量,在 GaN 两端镀上金属 Au 做为电极,通过对电极施加电压,可以对整个器件进行加温。这种加热方式实现了温控部分与功能薄膜的一体化,通过电压和电流的控制可以实现薄膜温度的精准控制,实现薄膜电控相变自激励,为进一步应用打下基础。

二氧化钒薄膜采用分子束外延法制备,在 VO_2 沉积之前,在丙酮、异丙醇和去离子水中超声清洗 $\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (0001)衬底,各清洗 10 min。经过上述处理后,将衬底用 N_2 气体吹干,然后迅速转入真空室。采用射频等离子体辅助氧化 MBE 腔,基压为 3×10^{-7} Pa,在 $\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 衬底上沉积了 VO_2 薄膜。在沉积过程中,衬底温度保持在 530°C 。

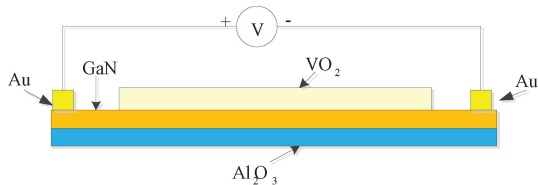


图2 $\text{VO}_2/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合膜结构

Fig.2 $\text{VO}_2/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ Composite film structure

2.2 二氧化钒薄膜阻温特性测试

利用实验室搭建的双探针变温电阻测试平台测试了所得到的 $\text{VO}_2/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜样品的电阻在升温 and 降温过程中随温度的变化曲线(如图3)。由图3可知所得样品在室温下的电阻很高,约为 $1.3 \times 10^5 \Omega$,表现为半导

体态。随着温度的升高,初始电阻值变化较小,在相变温度附近时,电阻发生突变,阻值变化约为3个量级,相变为金属态,其电阻约为 110Ω 。在降温过程中, VO_2 从高温金属态又恢复到室温下的半导体态。这种升降温过程中表现出显著的温度迟滞效应,是二氧化钒相变材料所具有的典型相变特征。

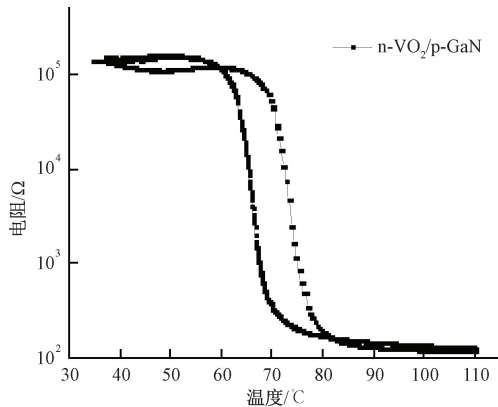


图3 $\text{VO}_2/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 样品阻温特性

Fig.3 The resistance temperature characteristics of $\text{VO}_2/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ film

2.3 薄膜的外延生长分析

为了分析所制备的 VO_2/GaN 薄膜样品的晶体结构和外延生长行为,本文进行了细致的 $\theta-2\theta$ 扫描,如图4所示。在 $\theta-2\theta$ 扫描模式下,可以看到样品表现出很强的 Al_2O_3 单晶衬底衍射峰,此外微米厚度的 GaN 薄膜也出现了很强的 GaN (002) 衍射峰。在 $\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 衬底上外延生长的 VO_2 薄膜在 $2\theta=39.8^\circ$ 的位置具有单一的衍射峰,经过比对,为 $\text{VO}_2(020)$ 的衍射峰。这表明本文所制备的薄膜为 VO_2 薄膜,可以用来开展进一步的研究。

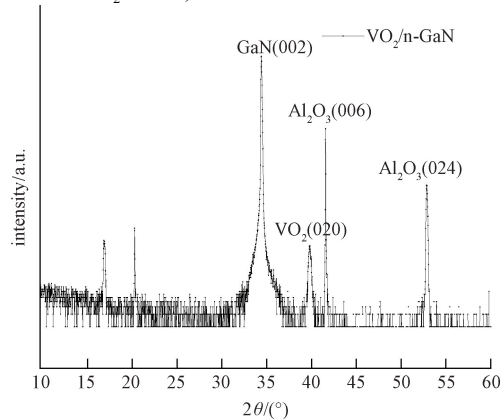


图4 $\text{VO}_2/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 样品的XRD在 $\theta-2\theta$ 扫描模式下的测试

Fig.4 XRD test of $\text{VO}_2/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ samples in $\theta-2\theta$ scanning mode

2.4 薄膜相变特性的拉曼分析

利用变温拉曼光谱能够探测二氧化钒薄膜在相变前后,从低温单斜相到高温金红石相的结构转变。图 5 给出了所测量得到的升温 and 降温过程中所制备器件的拉曼光谱。图 5(a)是升温过程中器件的拉曼光谱,可以看到在 30 ℃ 时,除了来自衬底的拉曼峰,低温绝缘相的 VO₂ 在 196、225、312、395 和 617 cm⁻¹ 处呈现出 VO₂ 单斜相结构的特征拉曼峰。随着温度的升高,这些 VO₂ 的特征拉曼峰逐渐变弱,在 60 ℃ 以下,变化不明显,特征峰很清晰,在 70 ℃ 以上,特征峰突然完全消失。此时表明 VO₂ 已经完全相变,整个晶体结构完全转变为金红石金属相。图 5(b)给出了降温过程中的拉曼光谱图。当温度降低到 60 ℃ 及以下温度时,VO₂ 特征拉曼峰又开始出现,表明在降温过程中,在相变温度下,低温单斜相又开始出现。表明本文制备的二氧化钒薄膜具备金属半导体相变过程的可逆性。同时从变温的拉曼光谱可以看出其升温 and 降温过程所对应的相变温度在 60 ℃ ~ 70 ℃ 之间。

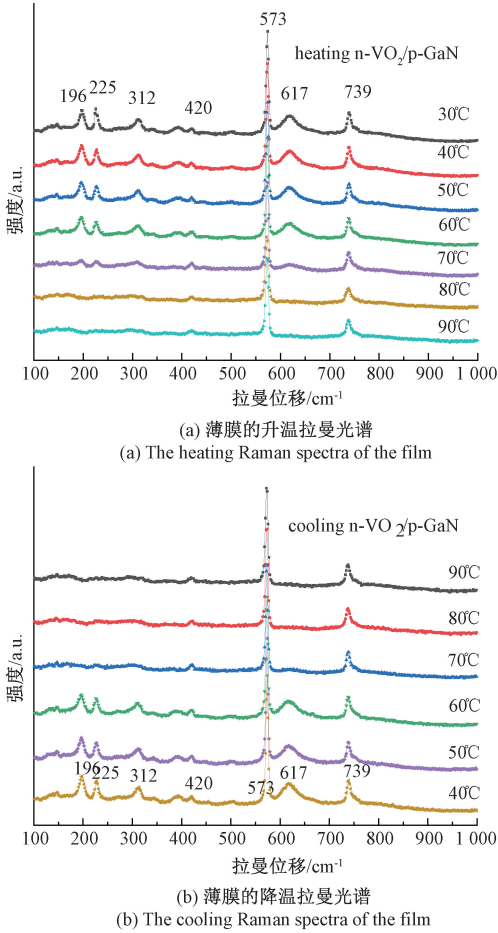


图 5 二氧化钒薄膜的变温拉曼分析
Fig. 5 Raman spectra of temperature varying vanadium dioxide film

3 二氧化钒薄膜抗激光干扰红外热成像测试

3.1 二氧化钒薄膜对中红外激光的衰减测试

搭建测量二氧化钒薄膜相变前后对中红外激光透过率的实验装置如图 6 所示。首先测量薄膜在室温下对中红外激光的透射率,此时薄膜为半导体态,Au 电极外加电压为 0,利用功率计测量入射到二氧化钒薄膜的功率和经过二氧化钒薄膜衰减后的出射功率,计算得到半导体态时薄膜的透过率。然后对金属电极加上直流电,通过 GaN 对二氧化钒薄膜加温,在电压为 4.7 V 时,二氧化钒薄膜透射率发生突变,相变为金属相,为保持二氧化钒薄膜金属相得稳定,将激励电压保持在 5.2 V。分别测量入射到二氧化钒薄膜的激光功率和经过二氧化钒薄膜衰减后的出射激光功率,计算得到在金属相时二氧化钒薄膜对中红外激光透过率。测量结果如表 1 所示。通过表 1 可以看出,二氧化钒薄膜在相变以后,激光输出能量大幅度衰减,透过率由 0.693 衰减到 0.069,表现出了良好的开关特性。相变后二氧化钒薄膜的透过率约为相变前透过率的 10%。

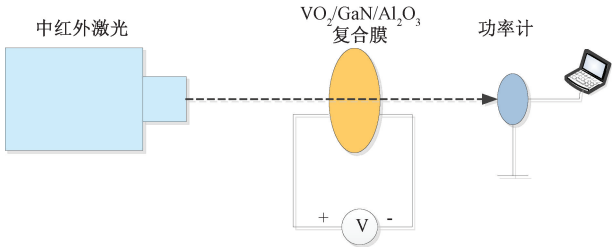


图 6 二氧化钒薄膜对中红外激光的衰减测量
Fig. 6 Attenuation measurement of mid-infrared laser by vanadium dioxide thin film

表 1 二氧化钒薄膜对中红外激光的衰减
Table 1 Attenuation of vanadium dioxide thin film to mid-infrared laser

二氧化钒薄膜 物理状态	波长/ μm	入射功率/ mW	出射功率/ mW	透过率(出射功 率/入射功率)
半导体态(相变前)	3.525	332	230.2	0.693
金属态(相变后)	3.525	332	23.2	0.069

3.2 二氧化钒薄膜抗激光干扰热成像

搭建二氧化钒薄膜防护中红外热像仪实验装置如图 7 所示,中红外激光器产生红外激光,利用 K9 玻璃衰减片对激光进行衰减,经过二氧化钒薄膜以后,最终照射

热像仪(型号 AGEMA 550),观察中红外激光对热像仪的干扰效果并进行记录。对薄膜电极通电,对薄膜进行加热,使二氧化钒薄膜发生相变,观察二氧化钒薄膜相变前后激光对中红外热像仪的干扰效果,分析其抗激光干扰性能。

实验中,中红外激光器的输出激光的波长为 $3.525\ \mu\text{m}$,功率为 330 mW,在距离激光器 3 m 位置放置红外热像仪,实验测得 K9 玻璃对 $3.525\ \mu\text{m}$ 波长激光的透过率为 17%,放置了 2 片 K9 玻璃,因而入射到二氧化钒薄膜的激光功率约为 9.5 mW。激光对中红外热像仪干扰结果如图 8 所示。

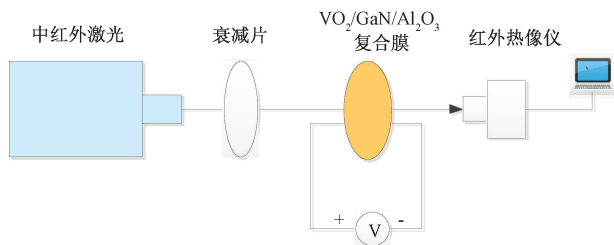


图 7 二氧化钒薄膜防中红外激光干扰热像仪试验

Fig. 7 The test of protecting thermal imager against mid-infrared laser interference with vanadium dioxide film

通过图 8(a)可以看出,热像仪对中红外激光非常敏感,较弱的能量就能使其达到饱和。二氧化钒薄膜在半导体时,对入射激光能量高透过,激光的干扰使热像仪出现眩光现象,使热像仪成像单元大面积饱和,从而无法对所观测的目标进行有效成像。二氧化钒薄膜相变为金属态后,对入射的激光能量大幅度衰减,使其透过能量仅为相变前的 10%。虽然该能量仍然使热像仪局部饱和,但饱和区域很小,热像仪仍能对目标区域进行有效成像观察。二氧化钒薄膜能够对热像仪起到较好的防护作用。

为了进一步研究其防护效果,本文绘制了二氧化钒薄膜相变前后热像仪所成图像的灰度直方图,如图 9 所示。图 9(a)中,因图像饱和区域较大,饱和像素点出现概率远大于其他各灰度级像素数,表现为图像的大面积饱和。图 9(b)中,相变为金属态的二氧化钒薄膜对入射激光光强大幅度衰减,热像仪饱和像素数大幅度降低,图像成像层次明显。二氧化钒薄膜呈现了较好的防护效果。

4 结论

激光方向性好,功率密度高,能够对红外热像仪造成干扰。二氧化钒薄膜是一种相变材料,在半导体态时,二氧化钒对红外辐射高透过;在金属态时,二氧化钒薄膜对红外辐射低透过;该特性可以用于对激光干扰热像仪的



(a) 当薄膜处于半导体状态时,激光会对热成像仪器造成严重的干扰

(a) When the film is in a semiconductor state, the laser causes serious interference in the thermal image instrument



(b) 氧化钒薄膜处于金属状态时,对激光具有明显的保护效果

(b) When vanadium dioxide film is in metallic state, The interference degree of laser to thermal imager is reduced, showing obvious protective effect.

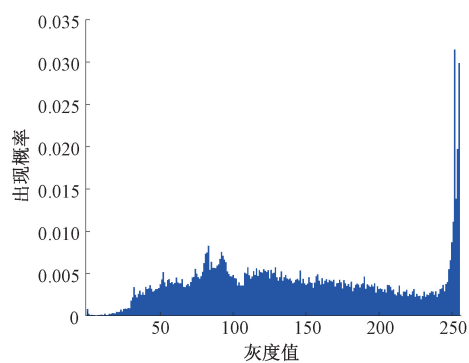
图 8 VO_2 薄膜相变前后激光对热像仪的干扰效果

Fig. 8 Interference effect of laser on thermal imager before and after VO_2 film phase transition

防护。本文制备了具有自激励相变功能的二氧化钒薄膜,所制备的二氧化钒薄膜具有良好的相变性能。通过实验方式研究了二氧化钒薄膜对中红外激光干扰红外热像仪的防护。测量了二氧化钒薄膜在 $3.525\ \mu\text{m}$ 波长上相变前后对激光的透过率,在金属态时,激光透过率仅为半导体态时的 10%。进行了二氧化钒薄膜防护中红外热像仪试验,实验结果表明,二氧化钒薄膜相变为金属态后,激光对热像仪的干扰能力大幅度降低。利用二氧化钒薄膜的相变特性能够防护激光干扰红外热成像系统。

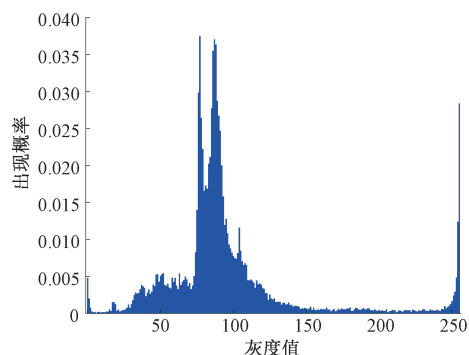
参考文献

- [1] 武杰, 蔺素珍, 禄晓飞, 等. 基于多特征融合的红外弱小目标检测[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 108-115.
WU J, LIN S ZH, LU X F, et al. Infrared small target detection based on multi-feature fusion[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(8): 108-115.
- [2] 蔡军, 谭静, 邱会然. 基于局部加权对比的红外弱



(a) 相变前热成像的灰度直方图

(a) The gray histogram of infrared thermal imaging before phase transition of vanadium dioxide.



(b) 相变后热成像的灰度直方图

(b) Gray histogram of infrared thermal imaging after the phase transition of vanadium dioxide

图 9 红外热成像的灰度直方图

Fig. 9 Gray histogram of infrared thermal imaging

小目标检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 133-141.

CAI J, TAN J, QIU H R. Infrared dim small target detection based on local product weighted contrast[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 133-141.

- [3] 黄喆, 赵世艺, 周卫斌, 等. 面向盾构导向激光标靶的抗杂光算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 172-181.

HUANG ZH, ZHAO SH Y, ZHOU W B, et al. Research on the anti stray light algorithm for shield guided laser target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 172-181.

- [4] 吴江, 兀伟, 杨银芳. 脉冲激光测距主放电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(4): 125-132.

WU J, WU W, YANG Y F. Pulse laser ranging main discharge circuit design [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(4): 125-132.

- [5] 姜来, 周洁, 杨静琦, 等. 激光异物清理系统的光束发射系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 26-30.

JIANG L, ZHOU J, YANG J Q, et al. Beam emission system design of laser foreign body remover device[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(1): 26-30.

- [6] 张旭辉, 沈奇峰, 杨文娟, 等. 基于三激光点标靶的掘进机机身视觉定位技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 178-186.

ZHANG X H, SHEN Q F, YANG W J, et al. Research on visual positioning body based on three technology of roadheader laser point target [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 178-186.

- [7] REN Y, WU X, TAO F, et al. Effect of peak power and pulse width on coherent Doppler wind lidar's SNR[J]. Instrumentation, 2022, 9(2): 26-32.

- [8] U. S. Air Force (USAF), U. S. Military. Large Aircraft Infrared Countermeasures (LAIRCM) Systems Engineering Case Study-Details of the Laser Transmitter Pointer/Tracker and Missile Warning Sensor (Paperback) [Z]. September 10, 2017.

- [9] IKEMOTO Y, ZEN H. HgCdTe detector saturation using infrared free electron laser and infrared synchrotron radiation[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 106: 103268.

- [10] 李祉涵. 激光干扰红外导引头成像制导性能仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

LI ZH H. Modeling and simulation of infrared imaging guidance seeker with laser jamming effects[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.

- [11] ZHANG Y, NIU C, ZHAO S, et al. Investigation of interference on photodetector CCD by lasers with different wavelengths[J]. Optik, 2020, 202: 163660.

- [12] WANG Y, WANG G, CHEN Q, et al. Laser energy distribution on detector under the different incident angle[C]. Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences held June - July 2015. SPIE, 2015, 9795: 622-631.

- [13] LIU Y W. Research on 10.6 μm laser disturbance to infrared detector system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1682(155-156): 810-814.

- [14] 杨振, 郭鑫民, 张建隆, 等. 陶瓷涂层对中红外探测器抗激光性能的影响[J]. 红外技术, 2019, 41(10): 935-940.

YANG ZH, GUO X M, ZHANG J L, et al. Effect of ceramic coating on laser irradiation resistance for mid wave infrared detector, [J]. Infrared Technology, 2019, 41(10): 935-940.

- [15] 徐凯, 路远, 凌永顺, 等. 氧化热处理对 VO_2 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 SH. et al. Effects of oxidational annealing on infrared optical phase transition properties of VO₂ thin films[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(1): 53-57.
- [16] MAAZA M, HAMIDI D, GIBAUD A, et al. Optical activity of VO₂ based nanophotonics [C]. 2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks. IEEE, 2011: 1-7.
- [17] HUANG Z, CHEN S, LV C, et al. Infrared characteristics of VO₂ thin film for smart window and laser protection applications [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(19): 191905.
- [18] ZHOU J, GAO Y, ZHANG Z, et al. VO₂ thermochromic smart window for energy savings and generation [J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1-5.
- [19] HUANG W, YIN X, HUANG C, et al. Optical switching of a metamaterial by temperature controlling[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(26): 261908.
- [20] 路远, 凌永顺, 冯云松, 等. 二氧化钒薄膜对红外脉冲功率激光的智能防护分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11), 2887-2891.
- LU Y, LING Y SH, FENG Y S, et al. Analysis of VO₂ thin film intelligent protection against pulsed power infrared-laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11), 2887-2891.
- [21] DRISCOLL T, KIM H, CHAE B, et al. Memory Metamaterials[J]. Science, 2009, 325, 1518-1521.
- [22] LI Z, HU Z, PENG J, et al. Ultrahigh infrared photoresponse from core-shell single-domain-VO₂/V₂O₅ heterostructure in nanobeam[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(13): 1821-1830.
- [23] YANG Z, KO C, RAMANATHAN S. Oxide electronics utilizing ultrafast metal-insulator transitions[J]. Annual Review of Materials Research, 2011, 41(1): 337-367.
- [24] HAN Y H, KIM K T, SHIN H J, et al. Enhanced characteristics of an uncooled microbolometer using vanadium-tungsten oxide as a thermometric material[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(25): 254101.

作者简介



路远(通信作者),现为国防科技大学研究员,博士生导师,主要研究方向为光学工程研究。

Lu Yuan (Corresponding author) is a researcher and doctoral supervisor at National University of Defense Technology. His main research interest includes optical engineering research.