

引用格式:贺琦璐,王一青,黄鹰,等.基于二氧化钒相变材料的光电器件激光防护研究[J].信息对抗技术,2023,2(3):44-51.[HE Qilu, WANG Yiqing, HUANG Ying, et al. Research on laser protection of photoelectric devices based on vanadium dioxide phase change material[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(3):44-51. (in Chinese)]

基于二氧化钒相变材料的光电器件激光防护研究

贺琦璐^{1,2},王一清¹,黄鹰^{1*},赖建军^{1*}

(1. 华中科技大学武汉光电国家研究中心,湖北武汉 430074; 2. 中航凯迈(上海)红外科技有限公司,上海 201306)

摘要 随着激光致盲武器的快速发展,与之对应的激光致盲防护技术逐渐成为了一项重要的研究。相变材料二氧化钒(VO_2)因在合适的热、光、场等激励下发生半导体相与金属相的可逆相变导致光学和电学特性的显著变化而受到激光防护领域的持续关注。使用 Drude-Lorentz 模型对 VO_2 的光学常数进行了研究,针对单层二氧化钒在半导体相红外透过率不够高的问题进行了多层膜设计和优化,并实际制作了多层膜系。使用激光器与傅里叶红外光谱仪测试制备的 VO_2 薄膜,得到了薄膜的相变与防护效果等性能,验证了 VO_2 良好的激光致盲防护性能,实际测试表明半导体相的透过率大于 92%,相变前后多层膜系的红外开关率超过 98%。

关键词 激光防护;相变材料;二氧化钒薄膜;硅光电池

中图分类号 TN 977

文章编号 2097-163X(2023)03-0044-08

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.03.004

Research on laser protection of photoelectric devices based on vanadium dioxide phase change material

HE Qilu^{1,2}, WANG Yiqing¹, HUANG Ying^{1*}, LAI Jianjun^{1*}

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Aviation Kai Mai (Shanghai) Infrared Technology Co., Ltd, Shanghai 201306, China)

Abstract With the rapid development of laser blinding weapons, the technique of laser blinding protection has attracted a surge of interest in the research community. Vanadium dioxide (VO_2) is a phase change material which has attracted continuous attention in the field of laser protection due to the remarkable change of its optical and electrical properties caused by the reversible phase transition between semiconductor phase and metal phase under appropriate heat, light and field excitation. In this paper, the Drude-Lorentz model was exploited to research the optical constants of VO_2 . Design and optimization of vanadium-dioxide based multilayer film were carried out to overcome the shortcoming of low transmittance of semiconductor phases of single-layer VO_2 . Lasers and a fourier infrared spectrometer were adopted to evaluate the characteristics and protective effects of the prepared VO_2 film, which verified the promising performance of VO_2 for laser blinding protection. Experimental measurement shows that the transmittance of semiconductor phase is greater than 92%, and the infrared switching ratio of multilayer film system before and after the phase transition is more

than 98%.

Keywords laser protection; phase transition material; VO₂ film; silicon photocell

0 引言

激光武器是利用高亮度激光束携带的巨大能量摧毁或杀伤敌方飞机、导弹、卫星、车辆和人员等目标的高技术新概念定向能武器。它可以用来实现硬杀伤(对目标壳体或部件进行直接破坏),也可以用来实现软杀伤(对光学系统、光电器件进行干扰或致盲,使之在一定时间里丧失探测功能^[1-2])。目前用于光学系统和光电传感器的激光防护技术主要有光谱滤波技术、光学限幅技术和光学开关技术^[3-5]。光谱滤波技术需要知道激光的波长,再根据波长针对性设计光学薄膜或结构来反射、散射或衍射激光,属于波长防护型技术;光学限幅技术是利用强光与物质的非线性相互作用原理使透射激光光强限制在一定水平以下的技术,属于具有宽谱响应的光强型防护型技术;光学开关技术也是基于非线性光学原理,在激光光强达到一定阈值时光学薄膜的透射率发生开关状的突变导致激光被反射回去从而保护探测装置,同样属于具有宽谱响应的光强型防护型技术。光学限幅和光学开关2种技术均具有一定的智能响应特性^[6]。

一种常用的光学开关技术是基于二氧化钒(VO₂)薄膜材料。VO₂是一种相变材料,当温度低于68℃时,VO₂为单斜M相呈绝缘体(半导体)态;温度高于68℃时,VO₂(R)为四方金红石结构相的金属性质材料;相变前后电阻率可相差3~5个数量级。同时,相变前后光学特性也发生较大的变化,特别是在中长波红外波段。在低于相变温度时,红外光对单层VO₂薄膜的透过率可以达到60%以上;而当温度高于68℃时,红外光的透过率急剧减小到10%以下。除了少量吸收外,大部分红外光将被反射,表明VO₂具有良好的红外开关特性,因而可用于红外光学系统和光电器件的激光防护^[7]。美国Westinghouse公司成功研制了一种以VO₂为主的激光防护膜,用以保护卫星上的光学探测系统免受激光武器的干扰和破坏^[8]。国内对于VO₂作为防护材料应用于激光防护中的研究相对于国外起步较晚,但是

近些年来也取得了许多成果。如脉冲功率激光技术国家重点实验室的路远等用CO₂脉冲激光验证了VO₂具有保护探测器的作用,能够在激光对器件造成损伤前有效地保护HgCdTe红外探测器^[9]。中国科学院可再生能源重点实验室利用等效介质理论设计并实际制备了一种VO₂-SiO₂复合薄膜,有效提高了可见波段VO₂的透过率。相对于单一VO₂薄膜在可见光波段平均29.6%的透过率,VO₂-SiO₂复合薄膜将可见光波段的透过率提升到了48.5%,同时VO₂相变前后红外波段透过率仍有一定的变化^[10]。如华中科技大学通过优化退火温度得到了高质量VO₂防护薄膜,在3.6μm波长处,相变前防护薄膜透过率为77%,相变后薄膜的透过率为5%,红外开关率达94%^[11];哈尔滨工业大学研究的VO₂薄膜,在CO₂激光作用下,相变前半导体的透过率为70.8%,相变后降低到11.3%^[12]。新近的探索包括基于超表面或频率选择表面等表面微纳结构的谐振模式实现宽带高开关率的限幅目标的研究^[13-14]。

虽然VO₂具有智能激光防护的潜力,但是实际应用还要解决低温相光学透射率不高、开关率不足、相变阈值较高和损伤阈值不高等问题。这些问题除了与VO₂物化结构有关外,还与其制备工艺有关。制备VO₂薄膜的主要方法包括化学气相沉积法、溶胶-凝胶法、脉冲激光沉积法以及溅射沉积法。使用不同工艺制备的VO₂薄膜的特性会存在一定的差异。本文采用反应离子束溅射沉积与后退火工艺两步法制备VO₂薄膜^[9]。之后对实际制备的VO₂薄膜椭圆偏参数测试,并结合色散模型曲线的拟合获得VO₂薄膜在红外波段的光学常数,然后采用多层膜优化设计增透膜系,获得高开关率的红外相变开关,最后将该开关用于近红外和中波红外激光的激光防护实验,验证膜系的激光防护性能。

1 多层薄膜材料的设计和制作

单层VO₂薄膜制备工艺简单,但是低温相透过率低,不能满足实际应用要求。例如厚度为80nm的单层VO₂薄膜在3~5μm红外窗口区

的低温平均透过率低于 80%，高温平均透过率约为 8%。虽然可以通过减小薄膜厚度来提高信号光透过率，但是如果厚度小于 80 nm，由于吸收较小，薄膜高温平均透过率较大，在有致盲激光攻击时无法达到较好的防护效果。此外，实验发现厚度较小的薄膜在实际制备中均匀性较差。因此，实用的方法是设计多层膜系以提高低温透过率，减少高温透过率。

1.1 VO₂ 薄膜的光学常数

设计防护膜系时需要用到 VO₂ 的复折射率。通常使用 Drude-Lorentz 色散模型来描述 VO₂ 材料的介电常数与入射光子能量的关系^[15]：

$$\epsilon(E) = \epsilon_{\infty} - \frac{E_{p1}^2}{E^2 + iE/\tau_1} - \sum_{j=2}^4 \frac{E_{pj}^2}{E^2 - E_{0j}^2 + iE/\tau_j} \quad (1)$$

式中， $\epsilon(E)$ 代表材料的介电函数；第一项 ϵ_{∞} 是高频介电常数；第二项 $\frac{E_{p1}^2}{E^2 + iE/\tau_1}$ 是标准 Drude 模型，与材料的自由载流子有关， E_p 表示等离子体频率， τ 表示自由载流子碰撞时间；第三项是考虑了能带间电子跃迁的谐振子模型， E_{pj} 表示谐振子频率， E_{0j} 表示共振的能量， τ_j 表示谐振子碰撞时间。文献[15]分别给出了光子能量大于 1.2 eV 和小于 1.2 eV 中两段曲线对应的色散参数值和光学常数。由于具体制备工艺和材料的不同，文献中得到的 VO₂ 的光学常数往往差异较大，因此需要对实际制作的 VO₂ 薄膜进行测量求得精确的光学常数。通常获得光学常数的方法为通过椭圆偏振光谱仪测量实际制备 VO₂ 薄膜的椭圆偏参数，然后结合上述的色散模型拟合反演确定介电常数 ϵ ，进而得到光学常数：折射率 n 和消光吸收 k 。

本文实验采用反应离子束溅射沉积与后退火工艺两步法制备 VO₂ 薄膜^[9]。反应离子束溅射设备为美国 Denton 公司的 HDG 系统。实验所用靶材为金属钒靶，纯度达 99.95%；溅射气体为 Ar，纯度达 99.999%；反应气体为 O₂，纯度达 99.999%。基底选择直径为 5.08 cm，厚度为 400 μ m 的蓝宝石片 (c-Al₂O₃)。设备可加热并旋转基底，增加沉积薄膜的均匀度。后退火工艺使用真空管式高温烧结炉，型号为 OTF-1200X，设

备炉膛是由高纯度氧化铝微晶纤维经过高温真空吸附制备成型的，内炉膛表面涂有耐 1 750 $^{\circ}$ C 高温的涂层材料。该设备可在真空或者多种气氛状态下对金属、非金属及其他化合物进行退火处理，使用 N₂ 作为退火气氛。

由于缺少红外椭圆偏仪，本文首先使用工作在可见光-近红外波段 (244~1649 nm) 的椭圆偏仪进行 VO₂ 薄膜椭圆偏参数的测量，在获得色散参数后，再外推到 3~5 μ m 波段，得到其中波红外的光学常数。实际测量采用美国 J A Woolam 公司的 RC2 型光谱椭圆偏仪获得椭圆偏光学参数，而薄膜的各种光学常数经由椭圆偏仪自带的软件 CompleteEASE 对数据进行拟合后计算得到。通过椭圆偏仪得到被测样品的 p 偏振与 s 偏振反射光之间的振幅比例和相位差数据，分别由 ψ 和 Δ 表示。然后采用 Drude-Lorentz 色散模型对测得的 ψ 和 Δ 数据进行拟合计算。在拟合过程中， ψ 和 Δ 的实验测得值被用来同拟合模型预测值进行比较，拟合模型中的各种参数则通过不断的变化和调整使实验测得值同拟合模型预测值之间的差别尽可能的小，该差值通过定义如下的均方差 (mean square error, MSE) 来量化描述：

$$\varphi_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{2N - M} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\psi_i^{\text{Mod}} - \psi_i^{\text{Exp}}}{\sigma_{\psi,i}^{\text{Exp}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_i^{\text{Mod}} - \Delta_i^{\text{Exp}}}{\sigma_{\Delta,i}^{\text{Exp}}} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

式中， N 是测量时 ψ 和 Δ 对的数量， M 是模型中拟合变量的数量， σ 代表每次测量时实验标准偏差，上标“Mod”和“Exp”分别代表模型拟合和实验测量。 φ_{MSE} 越小表明拟合结果的准确度越高，本文得到的 $\varphi_{\text{MSE}} < 1$ 。

图 1 所示为在可见光-近红外波段通过椭圆偏仪得到的椭圆偏参数与拟合曲线的软件显示界面。外推得到低温相 VO₂ 的中波红外光学常数，如图 2 所示。由图 2 可见，实际制备的薄膜复折射率 n 与 k 拟合值分别约为 2.87 与 0.09，与文献[13]中得到的 n 与 k 值 ($n = 3.16, k = 0.07$) 存在差异，但是该曲线在 3~5 μ m 波段的变化趋势与该文献基本一致，即随着波长增加， n 值先逐渐增加后趋于稳定，而 k 值则逐渐减小。在高温下的光学常数则与文献[13]中的差异不明显。

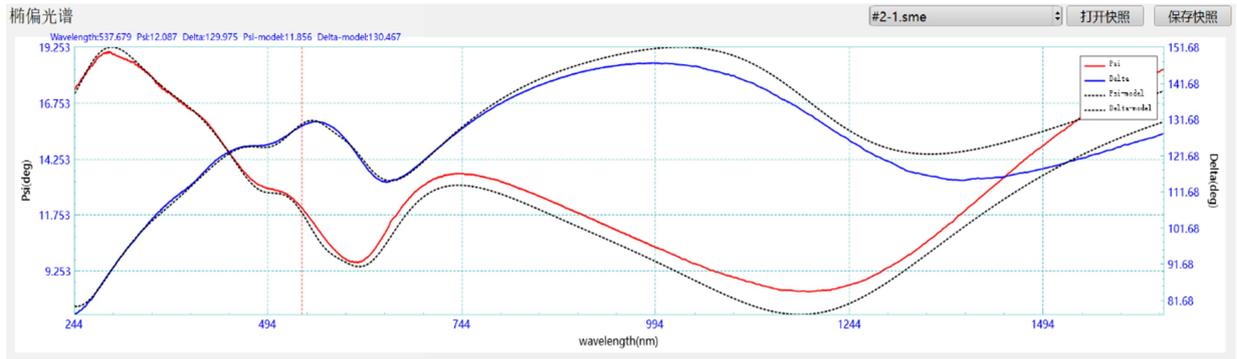


图 1 显示椭偏参数和模型拟合曲线的椭偏仪测试软件界面

Fig. 1 Ellipsometer software interface with ellipsometer parameters and fitting model curves

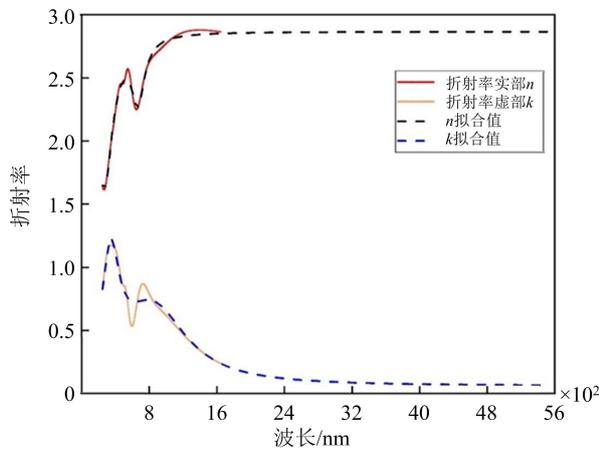


图 2 低温态 VO₂ 薄膜的复折射率测试数据与拟合曲线

Fig. 2 Complex refractive index test data and fitting curve of low temperature phase VO₂ film

1.2 多层膜系的设计

获得 VO₂ 的红外光学常数后,采用 TFCalc 光学薄膜设计软件设计应用于红外衬底上 VO₂ 薄膜在 3~5 μm 波段的多层增透膜,目的是提高无致盲激光攻击时信号光的低温透过率。选择厚度为 0.4 mm 的蓝宝石玻璃作为中波红外衬底材料。VO₂ 薄膜参数设置为低温相变前的复折射率,使用连续优化目标对透过率进行目标设置,优化波段略大于防护波段,设置为 2.8~5.2 μm。用设置可变材料以及计算等效膜堆的方法,先对可变材料的厚度和折射率进行优化,再用计算等效膜堆功能用高低 2 种折射率材料来替换可变材料。有高低高(HLH)折射率和低高低(LHL)折射率 2 种替换方式。替换材料在考虑了折射率、透明波段以及制备方法等因素后选择了锗(Ge)、硒化锌(ZnSe)、氟化钇(YF₃)材料。优化设计的宽带增透膜系结构如图 3 所示。

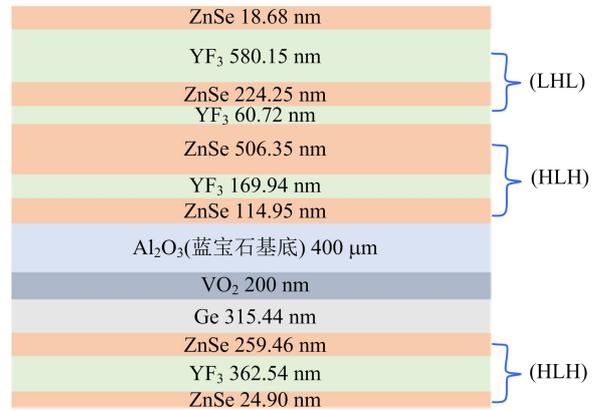


图 3 蓝宝石衬底两侧增透膜系的组成结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of composition of anti-reflection film system on both sides of sapphire substrate

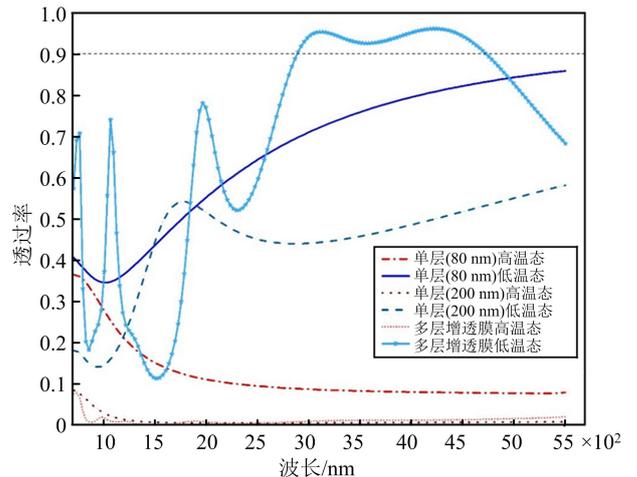


图 4 含有单层 VO₂ 薄膜以及多层增透膜系蓝宝石片的高低温态透过率曲线

Fig. 4 High and low temperature phase transmittance curves of sapphire substrate containing single layer VO₂ film and multi-layer anti-reflection films

在优化的膜系结构下,得到的高低温红外透过率如图 4 所示。从图中可以看出,在蓝宝石两

侧加入增透膜后,3~5 μm 的低温红外透过率明显增加,高温透过率虽然也有少许增加,但是仍在一个较低的范围内。多层增透膜片的低温平均透过率(T_l)由单层 VO_2 薄膜时的 48.80% 提高为多层的 93.19%,高温平均透过率(T_h)为 1.13%,红外开关率定义为 $K = (T_l - T_h)/T_l$,因此 $K = 98.79\%$ 。在 3~5 μm 红外窗口区,设计的多层增透膜达到了预期的低温平均透过率大于 90% 且红外开关率大于 95% 的要求。

1.3 膜系制备和测试

首先用得到的最佳工艺参数在蓝宝石基底上制备厚度为 200 nm 的 VO_2 薄膜,工艺参数如下:离子束溅射工艺中 O_2 流量为 1.2 sccm,基底温度为 200 $^\circ\text{C}$,溅射时间 80 min;退火工艺中 N_2 流量为 30 mL/min,退火温度为 520 $^\circ\text{C}$,退火时间为 2 h。然后根据设计的膜系结构,在衬底有 VO_2 薄膜的一侧使用 Ge、ZnSe、 YF_3 3 种材料镀制 4 层增透膜,另一侧使用 ZnSe、 YF_3 2 种材料镀制 7 层增透膜。多层增透膜的制备采用型号为 ZZS700 的电子束蒸发镀膜机。该设备可用膜厚控制仪对膜厚进行实时监控,各层薄膜厚度根据仿真值设置。

膜系制作完成后,采用傅里叶红外光谱仪测试其红外透过率。傅里叶红外挂光谱仪型号为 Thermo Nicolet NEXUS FI-IR,光谱分辨率为 0.09 cm^{-1} 。同时测试单层 VO_2 薄膜的红外透过率,以便与膜系测试片进行对比。

2 实验结果与讨论

2.1 膜系测试结果

图 5 为增透前后薄膜片的红外透过率曲线,在 3~5 μm 波段内,单层 VO_2 薄膜片的低温态透过率平均值为 54.24%,含有增透膜片的低温态透过率平均值为 92.66%,3~5 μm 波段内的低温态透过率平均值提高了 38.42%。用 70 $^\circ\text{C}$ 的云母片加热增透膜,在 3~5 μm 波段内,高温态下膜片的平均透过率为 1.40%,开关率为 98.49%。表 1 为仿真与实际制备的多层增透膜片在红外窗口区的平均透过率对比。可以看到,实际制备多层膜片的高低红外透过率与仿真结果基本一致,说明实际制备的多层膜片的每层薄膜的厚度与设计的误差较小,达到了仿真的设计要求。

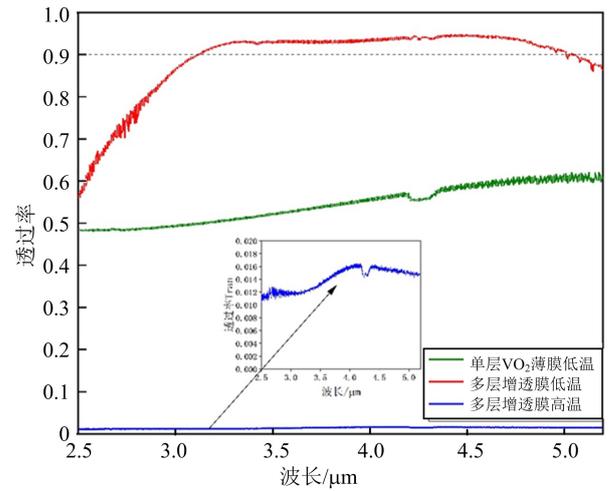


图 5 增透前后薄膜片的中红外透过率

Fig. 5 Mid-infrared transmittance curves of coated sheets before and after anti-reflection

表 1 仿真与实际制备的多层增透膜 3~5 μm 波段平均透过率对比表

Tab. 1 Comparison of average transmittance of 3~5 μm band of simulated and actual multilayer anti-reflection film

	低温态 透过率(%)	高温态 透过率(%)	开关率 (%)
多层宽带增透膜(仿真)	93.19	1.13	98.79
多层宽带增透膜(制备)	92.66	1.40	98.49

2.2 近红外激光防护实验

为验证 VO_2 薄膜对红外激光的防护效果,选择价廉的硅光电池作为光电探测器代表,进行近红外激光防护实验。搭建如图 6 所示的实验测试装置。激光光源使用内置准直装置的 1.08 μm 激光器,输出激光光斑半径为 3 mm,最大功率为 30 W,脉冲宽度为 180 ns。为防止 VO_2 薄膜相变后突然增大的反射光对激光器造成损伤,入射光不垂直入射到防护薄膜表面,而是与防护薄膜有小角度的倾斜,反射光用挡光板遮挡,硅光电池的输出电压用万用表测量。

根据图 7 的测试结果,无 VO_2 防护薄膜时,ab 段曲线硅光电池的输出电压随入射光功率的增加而增加,硅光电池正常工作,当激光功率达到 1.328 W 时,硅光电池两端电压开始下降,当入射光功率达到 2.217 W 时,硅光电池两端电压突然大幅下降,说明此时达到了硅光电池的损伤

阈值。有 VO₂ 防护薄膜时, *de* 段硅光电池正常工作, *ef* 段硅光电池两端电压减小, 说明此时达到了 VO₂ 薄膜相变阈值, 相变阈值约为 5.84 W/cm², *fg* 段硅光电池仍正常工作。光功率增加到 26.347 W 时, VO₂ 薄膜上出现白斑, 硅

光电池两端电压突然下降, 说明达到了 VO₂ 薄膜的损伤阈值, 薄膜损伤阈值约为 93.18 W/cm²。测试结果表明, VO₂ 防护薄膜的加入使硅光电池的损伤阈值提高了约 11.8 倍。

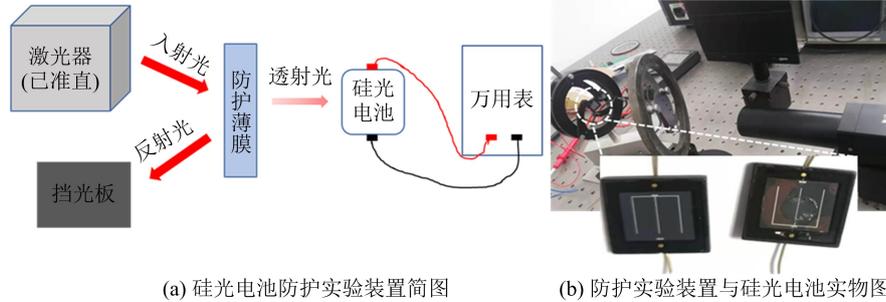


图 6 硅光电池防护实验测试装置图
Fig. 6 Setup schematic of laser protection of silicon photocell

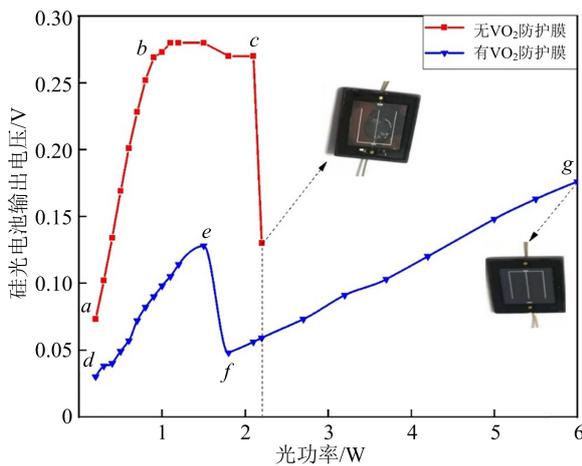


图 7 有无防护膜时硅光电池的输出电压随激光功率变化曲线
Fig. 7 Variation of output voltage of silicon photocell with laser power or without protective film

2.3 中红外激光防护测试

设计了如图 8 所示的中红外激光测试装置来验证优化后的多层增透膜的激光防护作用效果。激光器波长为 3.7 μm, 功率在 0~8.73 W 范围内可调, 脉宽为 180 ns, 激光重复频率为 12 kHz。激光经过聚焦透镜后入射到防护膜系, 透过防护膜系的红外光功率用红外探测器测试。

用刀口法测出的激光光斑半径约为 0.16 cm。测出光斑大小后, 将防护膜系放置在原刀口法测试装置的位置, 使防护膜系上的光斑与刀口法测量的光斑大小相同。图 9 为激光防护实验的测试结果, 大图为使用 Logistic 曲线拟合的透过率-激光功率曲线, 内嵌图为使用高斯拟合的差分曲线。初始激光功率 1.06 W, 对应的透过率为 93.01%, 随着激光功率的增加, 防护膜系的

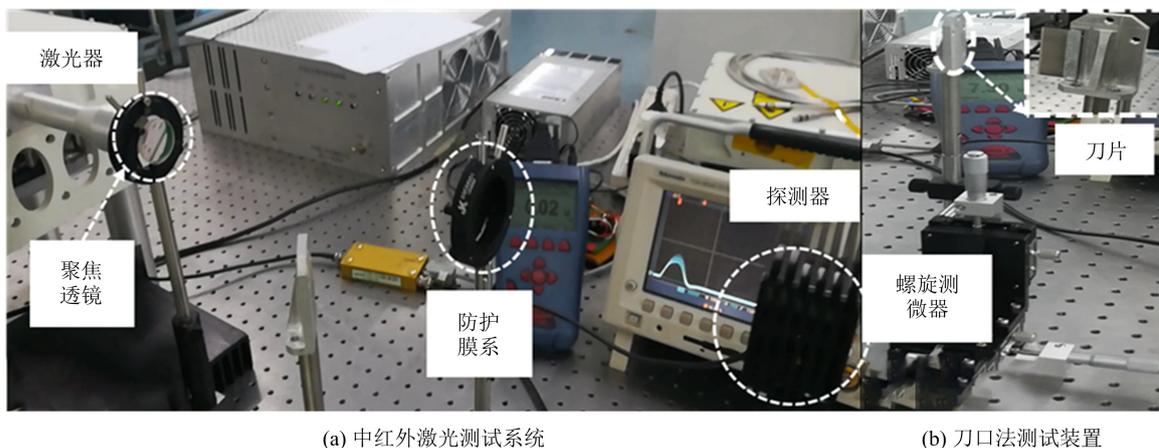


图 8 红外激光防护效果测试装置
Fig. 8 Setup for evaluation of the effect of protection film against infrared laser radiation

透过率由于 VO_2 的相变而逐渐降低,相变结束后防护膜系的透过率降低至 1.35%,红外开关率为 98.55%,与图 5 中的傅里叶红外光谱仪结果以及设计值基本一致。高斯拟合曲线的极小值对应的激光功率在增加功率与降低功率时分别为 2.041 W 与 1.536 W,因此增加功率与降低功率时的相变阈值分别为 25.39 W/cm^2 与 19.11 W/cm^2 。这说明实际制备的多层增透膜在 $3.7 \mu\text{m}$ 处兼具信号光的接收与激光防护功能。

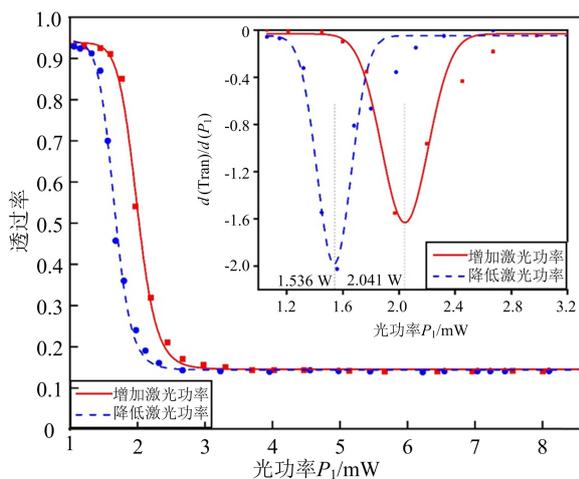


图 9 防护膜系透过率随中红外激光辐照功率的变化规律以及差分拟合曲线

Fig. 9 Transmission of protective film varies with mid-infrared laser power

3 结束语

本文首先基于 Drude-Lorentz 模型计算了 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 红外窗口区的 VO_2 光学常数,用椭偏仪测试得到了实际制备薄膜的低温态光学常数。接着用膜系仿真软件 TFCalc 设计了一种宽带多层增透膜,解决了无致盲激光攻击时单层 VO_2 薄膜在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 红外窗口区信号光透过率低的问题,优化后的膜系低温平均透过率由 48.80% 提高为 93.19%,信号光透过率在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 较宽波段内有明显提高。在获得高低温透过率的基础上,开展了将 VO_2 膜系用于针对近红外激光和中红外激光防护的实验研究。对硅光电池的近红外激光防护验证实验表明,防护膜系可以大大提高硅光电池的损伤阈值。另外,通过对中红外激光经过 VO_2 膜系后的相变和开关特性的测试,表明低温透过率高,而高温红外开关率也得到大大提高,对红外探测器的防护应用具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 乔凯,高超,高秀娟,等. 光学遥感卫星的激光威胁及防护体制探讨[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(2): 59-67.
QIAO Kai, GAO Chao, GAO Xiujuan, et al. Discussion on the laser threat and protection system for optical remote sensing satellites[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(2): 59-67. (in Chinese)
- [2] 李振华. 激光武器在无人机反制中的发展趋势[J]. 武警学院学报, 2021, 37(10): 34-38.
LI Zhenhua. Development trend of laser weapons in UAV countermeasures[J]. Journal of the Armed Police Academy, 2021, 37(10): 34-38. (in Chinese)
- [3] 程立,童忠诚,柳旺季. 国外激光武器的发展现状与趋势[J]. 舰船电子对抗, 2019, 42(2): 56-58.
CHENG Li, TONG Zhongcheng, LIU Wangji. Present status and tendency of foreign laser weapon[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019, 42(2): 56-58. (in Chinese)
- [4] 马德跃,李晓霞,郭宇翔,等. 非线性高能激光防护材料研究进展[J]. 激光与红外, 2014, 44(6): 593-599.
MA Deyue, LI Xiaoxia, GUO Yuxiang, et al. Research progress in nonlinear protective materials against high energy laser[J]. Laser and Infrared, 2014, 44(6): 593-599. (in Chinese)
- [5] 姜百汇,马春勋. 光电制导武器的激光致盲防护技术[J]. 飞航导弹, 2009(1): 21-25.
JIANG Baihui, MA Chunxun. Laser blinding protection technology for photoelectric guided weapons[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2009(1): 21-25. (in Chinese)
- [6] 郑佳艺,马壮,高丽红. 智能化高能激光防护材料新进展[J]. 现代技术陶瓷, 2020, 41(3): 121-133.
ZHENG Jiayi, MA Zhuang, GAO Lihong. Development of intelligent anti-high power laser materials[J]. Advanced Ceramics, 2020, 41(3): 121-133. (in Chinese)
- [7] HUANG Z L, CHEN S H, LV C H. et al. Infrared characteristics of VO_2 thin films for smart window and laser protection applications[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101: 191905.
- [8] 付伟. 激光防护技术及发展现状[J]. 航天电子对抗, 2002(1): 43-46.
FU Wei. Laser protection technology and development status [J]. Aerospace Electronic Countermeasures, 2002(1): 43-46. (in Chinese)
- [9] 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, 2023, 52(1): 1-8.

2012, 41(11): 2886-2890.

LU Yuan, LING Yongshun, FENG Yunsong, et al. Analysis of VO₂ thin film intelligent protection against pulsed power infrared-laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2886-2890. (in Chinese)

- [10] ZHAO L, MIAO L, LIU C, et al. Solution-processed VO₂-SiO₂ composite films with simultaneously enhanced luminous transmittance, solar modulation ability and anti-oxidation property[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 7000.
- [11] XIAO X Y Y, SU D, CHENG Q, et al. The VO₂ thin film of highly optical switching rate for laser protection in infrared detector [C]//Proceedings of Advanced Spectroscopy and Applications. [S. l. : s. n.], 2017: 127-135.
- [12] 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.
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. (in Chinese)
- [13] HOWES A, ZHU Z H, CURIE D, et al. Optical limiting based on Huygens' metasurfaces[J]. Nano Letters, 2020, 20: 4638-4644.
- [14] WAN C H, ZHANG Z, SALMAN J, et al. Ultrathin broadband reflective optical limiter[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(6): 2100001.
- [15] GIANNETTI C. Dynamics of non-equilibrium states in solids induced by ultrashort coherent pulses[D]. Kentucky: Brescia University, 2004 .

作者简介

贺琦璐

女, 1996年生, 硕士研究生, 研究方向为激光防护技术

E-mail: h13006380103@163.com



王一清

女, 1998年生, 硕士研究生, 研究方向为薄膜设计和制备技术

E-mail: yiqing_wang09@163.com



黄鹰

男, 1962年生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为相变材料及应用

E-mail: hying@hust.edu.cn



赖建军

男, 1968年生, 博士, 研究员, 研究方向为光电材料与器件

E-mail: jjlai@hust.edu.cn



责任编辑 钱静