

doi:10.3788/gzxb20184712.1231002

基于泵浦探针法研究 VO₂ 薄膜多波段 红外激光相变特性

刘志伟, 路远, 冯云松, 胡杰, 刘瑞煌

(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)

摘 要: 用泵浦探针法实验研究了红外激光辐照二氧化钒薄膜的相变特性. 首先利用氧源-分子束外延法制备了薄膜厚度分别为 20 nm、40 nm、60 nm 的三组 VO₂ 单晶外延薄膜, 并且以 10.6 μm 的 CO₂ 连续激光作为泵浦光, 分别以 1 064 nm 和 3 459 nm 的纳秒脉冲激光作为探针光, 对这三组薄膜分别进行了辐照实验. 实验发现三组薄膜相变后对 1 064 nm 探针光的透过率降低量平均值分别为 5.26%、6.2%、8.92%, 反射率降低量分别为 3.09%、6.56%、4.93%; 对 3 459 nm 探针光透过率降低量平均值分别为 28.4%、47.78%、55.13%, 反射率升高量平均值分别为 6.65%、17.87%、7.49%. 结果表明: 利用分子束外延法制备的纳米级 VO₂ 薄膜相变前后对入射激光为镜面反射; 薄膜对 3 459 nm 探针光的相变特性比对 1 064 nm 探针光相变特性显著; 薄膜厚度的增加会降低相变前透过率, 但是对相变后透过率降低更为明显; 薄膜对 10.6 μm CO₂ 连续激光相变前后始终保持几乎不透, 研究结果可为薄膜的应用提供参考.

关键词: 分子束外延; VO₂ 薄膜; 泵浦探针法; 激光辐照; 相变特性

中图分类号: O434.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)12-1231002-8

Phase Transition Characteristics of VO₂ Thin Films Irradiated by Multiband Infrared Laser Studied by Using Pump Probe Method

LIU Zhi-wei, LU Yuan, FENG Yun-song, HU Jie, LIU Rui-huang

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Countermeasures Institute,
National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: To investigate the phase transformation characteristics of vanadium dioxide thin film irradiated by infrared laser, the experiment was carried out based on pump probe method. First, three groups of VO₂ monocrystalline epitaxial thin films with thickness of 20 nm, 40 nm and 60 nm were prepared by oxy-molecular beam epitaxy, moreover, the CO₂ continuous laser with 10.6 μm was used as the pump beam, nanosecond pulse laser with 1 064 nm and 3 459 nm wavelength were used as probe light respectively, and the three groups of films were irradiated respectively. It was found that the mean values of transmittance reduction of 1 064 nm probe laser after phase transformation of the three groups of films were 5.26%, 6.2% and 8.92%, respectively, and the reflectivity reduction was 3.09%, 6.56% and 4.93%, respectively; for the 3 459 nm probe laser, the mean values of transmittance reduction were 28.4%, 47.78%, 55.13%, and reflectance increase were 6.65%, 17.87% and 7.49% respectively. The results show that the incident laser before and after the phase transformation of VO₂ thin films prepared by molecular beam epitaxy were both mirror reflected; the phase transition properties of 1 064 nm probe were not as significant as that of 3 459 nm probe; the increase of film thickness will reduce the transmittance before the phase change, while the decrease after the phase change is more obvious; before

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No.61405248)和脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金(No.SKL2013ZR03)资助

第一作者: 刘志伟(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光与物质相互作用. Email: LZWundt1439836564@126.com

导师(通讯作者): 路远(1971-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电材料与器件. Email: luyuanmail@163.com

收稿日期: 2018-06-21; 录用日期: 2018-10-08

and after the phase transition, the film keeps almost opaque to CO_2 laser. The investigation will provide a reference for the application of film.

Key words: Molecular beam epitaxy; VO_2 thin films; Pump probe method; Laser irradiation; Phase transition characteristics

OCIS Codes: 310.6870; 140.3470; 140.6810

0 引言

1959年美国贝尔实验室发现二氧化钒(VO_2)具备相变特性^[1],由于 VO_2 属于一种强关联电子氧化物,在低温时呈现半导体态(绝缘态),在高温时呈现金属态,在温度变化过程中能够实现金属-半导体相变,伴随该相变过程会有一些特殊且可逆的物理现象发生^[2]。 VO_2 在太赫兹调制器^[3-4]、节能智能窗^[5-6]、电致光开关器件^[7]、发射率可控的自适应红外隐身材料^[8-9]、记忆功能材料^[10]、航天热控领域的智能型辐射计^[11]、非制冷型红外焦平面探测器^[12-13]、以及抗红外干扰等^[14]诸多领域均有应用。

目前 VO_2 制备方法已比较成熟,可以利用多种方法制备出性能各异的 VO_2 薄膜。其中,张鹏宇等^[15]利用射频磁控溅射法在普通白玻璃上制备出了对可见光透过率为38%的 VO_2 薄膜;刘金城等^[16]对磁控溅射法制备 VO_2 薄膜最佳参量进行了初步研究;朱慧群等^[17]采用室温磁控溅射和空气热氧化法以较低成本制备出相变温度 39°C 、可见光透射比53%、红外透射比差量超过50%的热至变色 VO_2 薄膜;李云龙等^[18]利用直流反应磁控溅射法,在氧分压为6.67%条件下,在Si(100)衬底上制备出了相转变温度为 52°C 的 VO_2 薄膜;唐志武^[19]、唐朝阳^[20]等利用脉冲激光沉积法在c面蓝宝石衬底上制备了相变前后红外透过率的变化为56%、电阻变化为4个数量级的 VO_2 外延薄膜;李尧^[21]以 $\text{VOSO}_4\text{-NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O-H}_2\text{O}_2$ 为原料,通过一种温和的沉淀-胶溶法制备出相变温度为 65°C 的 VO_2 薄膜。还有很多其他的制备方法,如化学气相沉积法^[22]、溶胶-凝胶法等^[23]。但是利用分子束外延法制备高质量的 VO_2 外延单晶薄膜在国内外却少见报道。

目前对 VO_2 薄膜相变特性的研究多是关注其在红外波段的透过率变化情况,如田野等^[24]利用脉冲激光辐照薄膜测试其光限幅效应;李宏哲^[25]、骆永全等^[26]分别研究了纳秒脉冲激光和连续激光辐照薄膜的相变特性。也有报道对具有特殊结构的 VO_2 进行了研究,如俞晓静^[27]、孙瑶^[28]等研究了 VO_2 纳米点阵的红外光学特性,而同时针对薄膜相变前后的透过率、反射率变化情况与薄膜厚度、入射激光波长等因素的研究鲜有报道。

本文首先用分子束外延法制备出表面平整致密,且厚度分别为20 nm、40 nm、60 nm的三组 VO_2 薄膜,并利用波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的连续 CO_2 激光作为泵浦光源,波长分别为1 064 nm和3 459 nm的纳秒脉冲激光作为探针光进行了相变特性辐照实验,得到了薄膜透过率、发射率在相变前后与膜厚度、入射红外激光波长的对应关系。

1 实验

1.1 薄膜制备

利用氧源-分子束外延(Oxygen source Molecular Beam Epitaxy, O-MBE)设备制备高质量的 VO_2 外延单晶薄膜,其装置如图1所示。

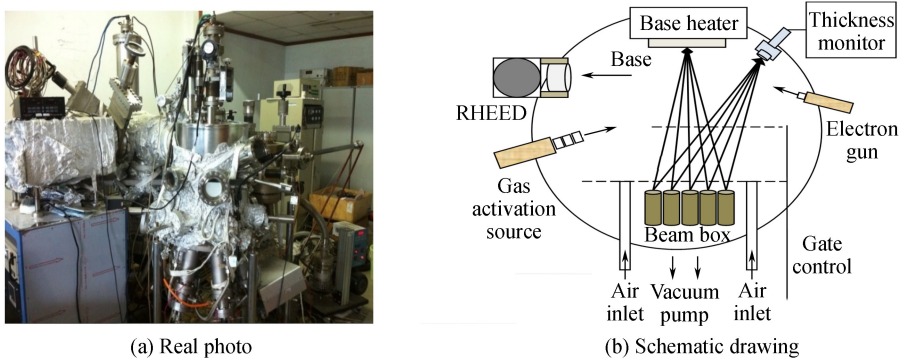


图1 氧源-分子束外延设备

Fig.1 Oxygen source molecular beam epitaxy equipment

该设备主要由腔体、电子束蒸发系统、气体活化源以及真空系统组成.通过机械泵、分子泵、离子泵和钛升华泵组成的三级真空系统,可以使主室本底真空达到 6×10^{-8} Pa.生长室中配备了高温样品架、反射式高能电子衍射(Reflection High-Energy Electron Diffraction, RHEED)、膜厚测试仪、真空检测和温度监控等.同时还配备了射频气体活化源,将 O₂ 裂解成活性更高的原子状态,通过自制电子束蒸发装置可以将难融的金属钒蒸发出钒原子,使反应室内钒原子束流和氧原子束流在蓝宝石 Al₂O₃ 衬底上反应沉积成膜.实验薄膜的生长速度约为 1 nm/min,控制生长时间分别为 20 min、40 min、60 min,对应制备出了厚度为 20 nm、40 nm、60 nm 的三组薄膜,对他们从不同角度拍摄的照片如图 2 所示.

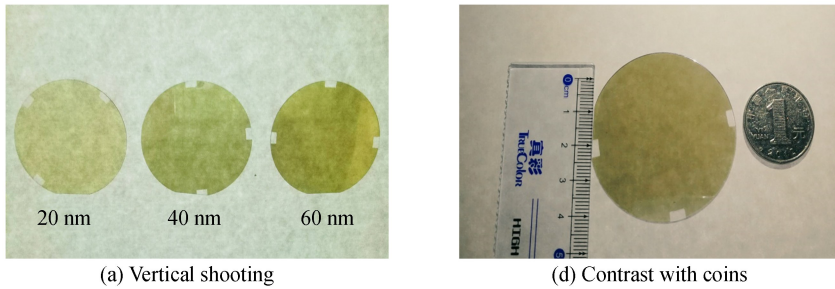


图 2 多组 VO₂ 薄膜可见光照片
Fig.2 Visible light photographs of multiple sets of VO₂ thin film

1.2 泵浦探针法辐照 VO₂ 薄膜实验

泵浦探针法利用两束激光同时照射薄膜,其中能量较强的一束激光辐照薄膜使其加热升温到相变点之上,薄膜发生相变,另一束激光功率相对较小,作为探针光,用来检验薄膜相变前后其透过率、反射率等光学特性的变化情况.实验光路如图 3 所示,以连续的 CO₂ 激光作为泵浦光,其输出功率可调,调节范围为 8~30 W,实验中设置其出射功率为 8.4 W.以 Nd:YAG 1 064 nm 和 3 459 nm 激光作为探针光,他们均为纳秒脉冲激光,脉宽在 50 ns 和 150 ns 之间可调.功率计型号为 COHERENT LABMAX TO Serial# 0004L14R,且功率计 1、2、3、

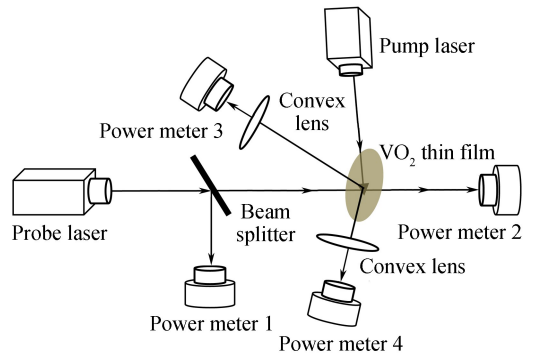


图 3 激光辐照薄膜实验光路示意图
Fig.3 Experimental optical path diagram of laser irradiated thin film

4 分别测得探针光的入射功率、透射功率、反射功率和泵浦光的反射功率,并以反射功率和入射功率之比、透射功率和入射功率之比,分别得到反射率和透射率.在实验中,先开启探针光,由于 1 064 nm 和 3 459 nm 两种探针光的入射功率均较小,分别控制在小于 2.5 W 和 1 W 的范围内,探针光辐照薄膜时一般不会在短时间内使之被加热至相变,故在开启探针光,并等各功率计示数稳定后,再打开泵浦激光,它携带的高能量在辐照薄膜的过程中使薄膜快速升温,直到薄膜温度升高达到甚至超过 VO₂ 相变点温度,并从泵浦光开始辐照薄膜时,对各功率计示数随泵浦光辐照薄膜时间的变化情况进行实时监测,记录薄膜在相变前后对探针激光的反射、透射的变化特性.

2 实验结果

2.1 近红外 1 064 nm 探针光辐照薄膜

当以 1 064 nm 波长的近红外激光作为探针光辐照薄膜时,对各功率计示数及示数随泵浦光辐照薄膜时间的变化情况进行了数据收集和处理.图 4 为 1 064 nm 探针光在入射功率分别为 0.29 W、0.81 W、1.16 W、1.88 W、2.46 W 时,辐照厚度为 40 nm 的 VO₂ 薄膜,探针光的透过率和反射率随泵浦光辐照薄膜时间的变化情况.可以看出薄膜对 1 064 nm 激光的初始透过率在 0.55~0.58 之间,初始反射率在 0.125~0.14 之间,随着泵浦光持续辐照薄膜,透过率和反射率会在辐照一段时间内开始逐渐降低,并最终稳定在一个值,分别约为

0.5 和 0.065,之后便不再随辐照时间而变化,说明薄膜受激光辐照确实发生了相变.由图 4 还可以得到,在泵浦光功率一定的条件下,随着入射探针光功率的逐渐增大,透过率和反射率降低到稳定值所需时间变短,说明薄膜完成相变过程的时间随着探针光功率增大而减小.这主要是因为入射激光功率越大,薄膜对激光能量积累速率越快,进一步说明该相变是由激光辐照造成的热至相变.此外,不同功率的探针光,薄膜初始的透过率和反射率会有所不同,大致趋势是探针光功率越大,初始透过率和反射率越低,这是由薄膜的吸收随功率变大而增强导致的.

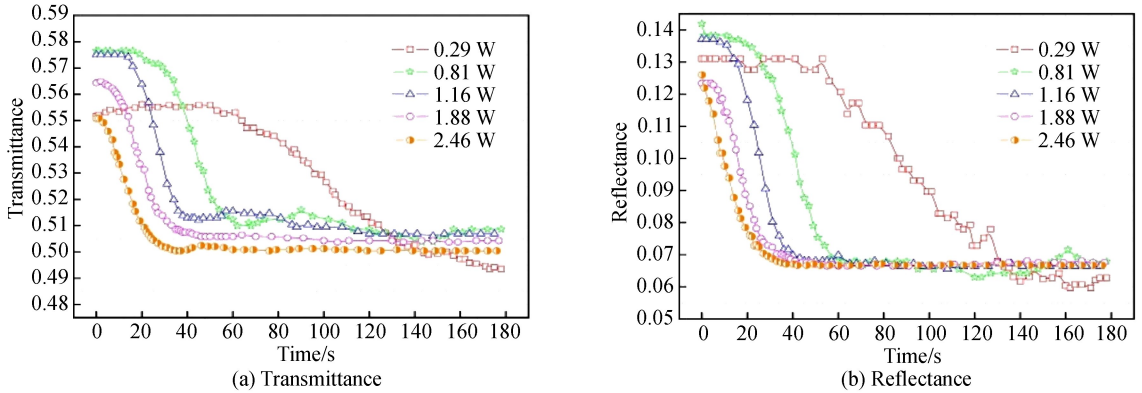


图 4 厚度为 40 nm 薄膜对 1 064 nm 探针光的透过率和反射率随泵浦光辐照薄膜时间变化

Fig.4 The transmittance and reflectance of 40 nm thin film to 1 064 nm probe laser change with the time of the pump beam irradiation film

对 20 nm、40 nm、60 nm 三组薄膜进行了辐照测试实验,得到在不同探针光功率下,他们相变前透过率的初始平均值分别为 0.722、0.564、0.478,反射率的初始平均值分别为 0.096、0.131、0.276,说明薄膜厚度越大,相变前透过率越小,反射率越大.并得到它们在不同探针光功率下的相变前后透过率、反射率的净变化量曲线,如图 5.可以看出在这三组薄膜中,随着薄膜厚度增大,其相变前后透过率净降低量也增大,其净变化量平均值依次为 5.26%、6.2%、8.92%;反射率变化情况则与之不同,随着薄膜厚度增大,相变导致的反射率净降低值依次为 3.09%、6.56%、4.93%,显然并非薄膜厚度越大反射率变化量也越大.由于透过率、反射率和吸收率之和为 1,即

$$\alpha + \tau + \gamma = 1 \tag{1}$$

因此得到三组薄膜的吸收率净增加量分别为 8.35%、12.76%、13.85%,但是增加的幅度并不和膜厚成比例,一种可能的解释是,膜厚增加会导致其吸收激光能力增加,以及薄膜相变现象的累积,这二者共同促使了薄膜吸收率的增加.但是随着膜厚增加,在相变效应累积的同时,薄膜对激光能量的吸收能力增幅是随膜厚增加而衰减的,从而导致 40 nm 到 60 nm 薄膜的吸收率净变化量增幅相比于 20 nm 到 40 nm 薄膜的吸收率净变化量增幅放缓.

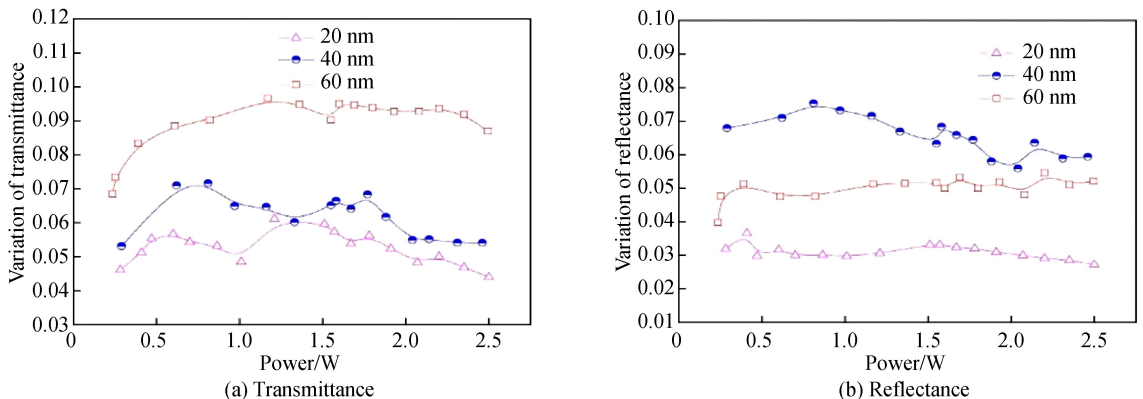


图 5 不同厚度薄膜相变前后对 1 064 nm 探针光透过率、反射率净变化量

Fig.5 The net changes of transmittance and reflectance of thin films with different thickness to 1 064 nm probe laser before and after the phase transition

2.2 中红外 3 459 nm 探针光辐照薄膜

以 3 459 nm 波长的中红外激光作为探针光辐照薄膜,得到了在不同探针光功率下,40 nm 薄膜对探针光的透过率、反射率随泵浦光辐照薄膜时间的变化情况,如图 6.

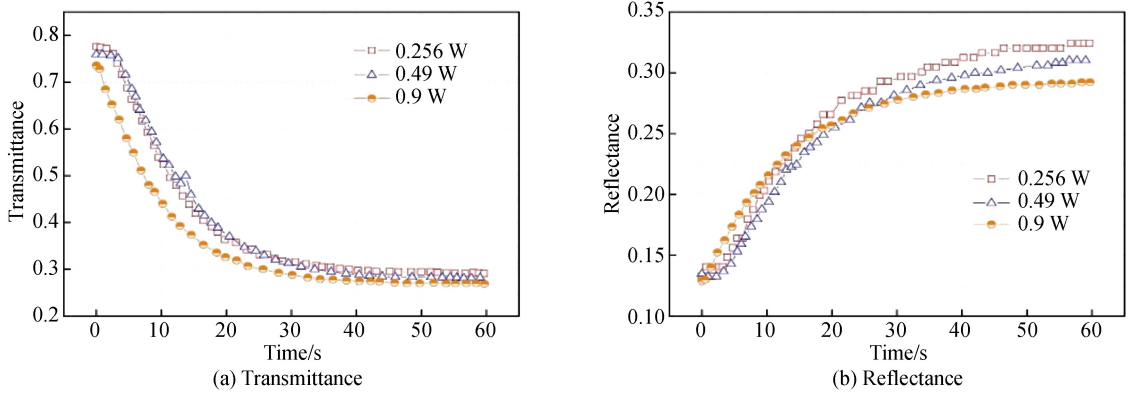


图 6 厚度为 40 nm 薄膜对 3 459 nm 探针光的透过率和反射率随泵浦光辐照薄膜时间变化
Fig.6 The transmittance and reflectance of thin film with 40 nm thickness to 3 459 nm probe changed with the time of pump beam irradiation

由图发现随着泵浦光对薄膜的不断辐照,薄膜的透过率开始下降,同时反射率开始升高,并且最终都稳定于某一值处.利用入射功率为 0.9 W 的探针光,对三组厚度薄膜进行辐照实验,得到了不同膜厚薄膜透过率、反射率随辐照时间变化情况,如图 7.

发现相变前薄膜透过率随着厚度增加有略微降低的趋势,三组薄膜的相变前透过率分别为 0.789、0.758、0.719,而相变之后,厚度越大的薄膜透过率下降得越显著,说明薄膜厚度对初始透过率虽然有一些影响,但是影响较小,而膜厚对相变后的透过率影响较大,可以依据此变化规律有针对性地制备符合应用要求的薄膜,并进一步结合图 8,得到 20 nm、40 nm、60 nm 三组薄膜相变前后透过率平均的净降低值依次为 28.4%、47.78%、55.13%.从图 7 还可以发现,相变前薄膜反射率随着厚度增加有略微升高的趋势,依次为 0.118、0.133、0.139,而相变之后,则呈现出反射率升高量 40 nm 薄膜 > 60 nm 薄膜 > 20 nm 薄膜的关系,结合图 8 可以得到 20 nm、40 nm、60 nm 薄膜的反射率净升高量平均值依次为 6.65%、

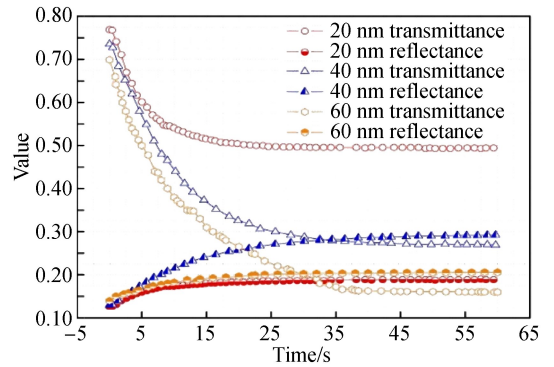


图 7 不同厚度薄膜透过率反射率随辐照时间变化
Fig.7 The transmittance and reflectance of thin films with different thickness varies with irradiation time

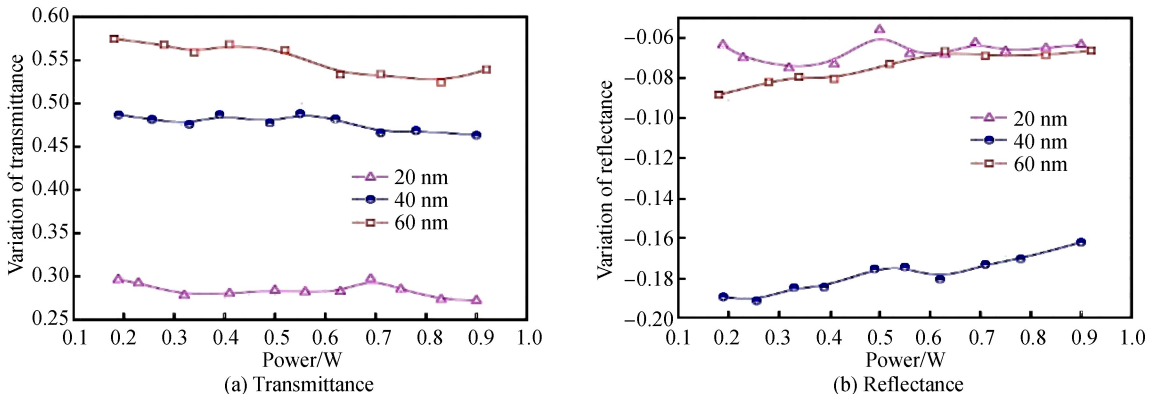


图 8 不同厚度薄膜相变前后对 3 459 nm 探针光透过率、反射率净变化量
Fig.8 The net changes of transmittance and reflectance of thin films with different thickness to 3 459 nm probe laser before and after phase transition

17.87%、7.49%，说明薄膜厚度在 20 nm 到 60 nm 之间，存在最优厚度使得反射率升高值最大。除此之外，还可以发现，薄膜厚度越大，相变发生到透过率、反射率完全稳定所需的时间也越长。大致可以看出，20 nm、40 nm、60 nm 三组薄膜透过率变化至稳定值所需的时间分别约为 20 s、35 s、45 s。

图 8(a) 的趋势和图 5(a) 相同，都是膜厚越大相变后透过率净降低量越大，不同的是图 5(a) 中 20 nm 到 40 nm 薄膜的透过率降低量增幅大于 40 nm 到 60 nm 薄膜透过率降低量增幅，而图 8(a) 则显示的是 20 nm 到 40 nm 薄膜透过率降低量增幅小于 40 nm 到 60 nm 薄膜的透过率降低量增幅。和图 8(b) 相比，图 5(b) 也有反射率净变化量 $40\text{ nm} > 60\text{ nm} > 20\text{ nm}$ 的变化趋势，只不过图 5(b) 表明相变后薄膜对 1 064 nm 探针光的反射率降低，而图 8(b) 是相变后薄膜对 3 459 nm 探针光的反射率升高。

2.3 远红外 10.6 μm 激光辐照薄膜相变特性

同样利用图 1 实验平台，还测试了薄膜对出射功率为 8.4 W 的 CO_2 连续激光的透过率和反射率随辐照时间的变化情况。发现薄膜对 10.6 μm 远红外连续激光的透过率接近于 0，在受辐照的 60 s 内几乎保持不透，而反射率则会有一定幅度变化，结果如图 9 所示。

20 nm 厚薄膜随着激光的不断辐照，其反射率在 10 s 左右开始降低，并最终于 15 s 降低至某一稳定值。而 40 nm 和 60 nm 厚薄膜则随着激光辐照，同样也在辐照 10 s 左右反射率开始升高，辐照 15 s 左右升高至一稳定值。为了避免薄膜基底对实验结果的影响，对 Al_2O_3 基底进行了同样条件下的辐照测试，发现基底对 10.6 μm 激光也始终保持几乎不透，而反射率则一直稳定在 0.51 附近，说明基底在三组薄膜受 10.6 μm 激光辐照相变特性中没有影响到透过率、反射率变化的实验结果。

2.4 讨论及分析

实验中制备的三组不同厚度的 VO_2 薄膜，从拍摄的可见光照片图 2 来看，呈现淡黄褐色，且厚度越厚颜色越深，同时对可见光的透过率也越低，反射率相对地也越高。

经泵浦光辐照后，对 1 064 nm 激光和 3 459 nm 激光的透过率均下降，说明发生了相变，且相变后对 3 459 nm 激光的衰减作用明显大于对 1 064 nm 激光的衰减；薄膜辐照后发现反射激光光斑和入射光斑大小接近，能量仍然很集中，说明薄膜相变后对激光是镜面反射，而不是漫反射。进一步发现其相变后对 3 459 nm 激光的反射率升高；而相变后对 1 064 nm 激光的反射率反而降低，可能是由于薄膜相变后虽然反射率也会升高，但薄膜对激光的吸收导致的反射率降低效应大于薄膜相变导致的反射率升高效应，所以整体呈现出薄膜对 1 064 nm 激光反射率降低。但当膜厚超过一定范围时，如膜厚为 60 nm 时，薄膜相变导致的反射率升高效应会加剧，对薄膜吸收激光导致的反射率降低效应产生了有力遏制，所以相比于 20 nm 到 40 nm 薄膜的反射率变化，40 nm 到 60 nm 薄膜的反射率降低幅度明显放缓，正是因为薄膜相变使反射率升高效应累积而起作用。

薄膜对 10.6 μm 的 CO_2 连续激光几乎不透，说明激光能量被反射和衬底吸收。在辐照过程中，薄膜对 10.6 μm 的反射率变化情况随薄膜厚度不同而异，20 nm 厚薄膜对激光的反射率会降低，说明一定厚度的薄膜本征吸收导致的反射率降低强度大于薄膜相变导致的反射率升高强度，而 40 nm、60 nm 厚薄膜对激光的反射率却会升高，这是由于二者强度对比发生了变化，即薄膜相变导致的反射率升高效应强度大于薄膜本征吸收导致反射率降低效应强度所致，故整体呈现出薄膜的反射率升高。同时，辐照基底的实验过程中，也发现基底对 CO_2 激光不透，但是反射率却有略微的下降趋势，也可以认为是由于基底对激光的吸收从而导致对激光反射降低。

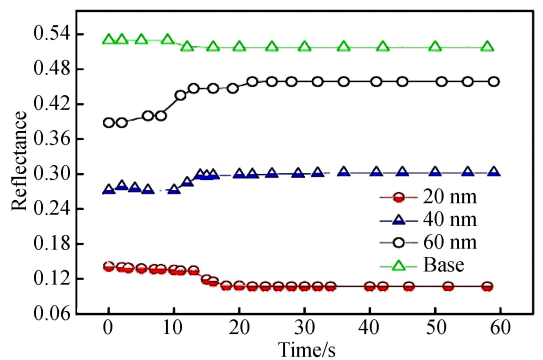


图 9 基底和不同厚度薄膜反射率随 10.6 μm 激光辐照时间的变化

Fig.9 The reflectance of substrate and thin films with different thickness changes with the radiation time of 10.6 μm laser

3 结论

本文通过氧源分子束外延法制备了厚度分别为 20 nm、40 nm、60 nm 的外延单晶 VO₂ 薄膜,肉眼可发现三组薄膜厚度越大颜色越深、对可见光透过率越低、反射率越高,且在相变前后对可见光的透过率反射率均无明显变化,验证了其优异的光学特性。

基于泵浦探针法对近红外和中红外两个波段进行了辐照实验,发现三组薄膜相变后对 1 064 nm 激光透过率衰减幅度均不超过 10%;对 1 064 nm 激光反射率也有较小幅度的降低。三组薄膜相变后对 3 459 nm 激光透过率衰减最大可以达到 55%左右;薄膜厚度的增加,会导致相变前红外透过率小幅度降低,但是相变后红外透过率降低得更加明显,因此一定范围内增加膜厚可以提高薄膜的红外调制特性。蓝宝石基 VO₂ 薄膜对 10.6 μm 的连续 CO₂ 激光不透,说明 10.6 μm 激光被 VO₂ 薄膜吸收或反射,这与 VO₂ 薄膜相变后对远红外具有低透过率的报道有所不同。薄膜相变前后反射激光光斑大小和入射时接近,说明薄膜相变前后对激光均为镜面反射,而不是漫反射。

参考文献

- [1] MORIN F J. Oxide which show a metal insulator transition at the neel temperature[J]. *Physical Review Letter*, 1959, **13**(1): 34.
- [2] HOU Dian-xin, LU Yuan, FENG Yun-song, *et al.* Study on phase transition properties of VO₂ based on pump-probe technique[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, **39**(2): 140-147
侯典心,路远,冯云松,等.采用泵浦探测技术研究 VO₂ 薄膜相变特性[J].*发光学报*,2018,**39**(2):140-147
- [3] LIU Zhi-qiang, CHANG Sheng-jiang, WANG Xiao-lei, *et al.* Thermally controlled terahertz metamaterial modulator based on phase transition of VO₂ thin film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(13): 130702.
刘志强,常胜江,王晓雷,等.基于 VO₂ 薄膜相变原理的温控太赫兹超材料调制器[J].*物理学报*,2013,**62**(13):130702.
- [4] CHEN Chen, LUO Zhen-fei, JIANG Ya-dong, *et al.* Broadband THz modulation characteristics of vanadium dioxide thin film prepared on glass substrate[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, **28**(2): 023104.
陈晨,罗振飞,蒋亚东,等.玻璃衬底二氧化钒薄膜的宽频带太赫兹波调制特性[J].*强激光与粒子束*,2016,**28**(2):023104.
- [5] WANG Chao, ZHAO Li, WANG Shi-min, *et al.* Recent research of vanadium dioxide thin film smart window[J]. *Materials Review*, 2017, **31**(29): 257-262.
王超,赵丽,王世敏,等.二氧化钒薄膜智能窗的研究进展[J].*材料导报*,2017,**31**(29):257-262.
- [6] CEHN Chang, CAO Chuan-xiang, LUO Hong-jie, *et al.* VO₂-based thermochromic smart window: From energy savings to generation[J]. *Science China Press*, 2016, **61**(15): 1661-1678.
陈长,曹传祥,罗宏杰,等.二氧化钒智能节能窗:从镀膜玻璃到节能发电一体化窗[J].*科学通报*,2016,**61**(15):1661-1678.
- [7] HEINLEHTO S T, LAPPALAINEN J H, JANTUNEN H M, *et al.* IR-wavelength optical shutter based on ITO/VO₂/ITO thin film stack[J]. *Journal of Electroceramics*, 2011, **27**: 7-12.
- [8] JI Hai-ning, LIU Dong-qing, ZHANG Chao-yang, *et al.* Application advances of vanadium dioxide in infrared camouflage and stealth technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, **36**(11): 4099-4105.
嵇海宁,刘冬青,张朝阳,等.二氧化钒在红外伪装隐身技术中的应用研究进展[J].*化工进展*,2017,**36**(11):4099-4105.
- [9] LIU Dong-qing, CHENG Hai-feng, ZHENG Wen-wei, *et al.* Applications of VO₂ in adaptive infrared stealth technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(11): 2898-2902.
刘东青,程海峰,郑文伟,等.二氧化钒在红外自适应隐身中的应用[J].*红外与激光工程*,2012,**41**(11):2898-2902.
- [10] DÁVILA N, CABRERA R, SEPULVEDA N. Programming and projection of near IR images using VO₂ films[J]. *Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(20): 1830-1833.
- [11] JIANG Wei, LI Yi, CEHN Pei-zu, *et al.* Design of thermochromic smart radiation device based on VO₂ phase change[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(1): 0131001.
蒋蔚,李毅,陈培祖,等.基于 VO₂ 相变的热致型智能辐射器设计[J].*光学学报*,2017,**37**(1):0131001.
- [12] CHENG Q, PARADIS S, BIU T, *et al.* Design of dual-band uncooled infrared microbolometer[C]. *IEEE*, 2011, **11**(1): 167-175.
- [13] JIN Wei-qi, TIAN Li, WANG Hong-chen, *et al.* Review of THz focal plane detector and the development of its imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(4): 187-194.
金伟其,田莉,王宏臣,等.THz 焦平面探测器及其成像技术发展综述[J].*红外技术*,2013,**35**(4):187-194.
- [14] NING Yong-gang, SUN Xiao-quan. Applications of VO₂ thin films on laser protection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(5): 530-534.
宁永刚,孙晓泉.二氧化钒薄膜在激光防护上的应用研究[J].*红外与激光工程*,2005,**34**(5):530-534.
- [15] ZHANG Peng-yu, HUANG Mei-dong. Study on fabrication and optical properties of VO₂ films by magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2018, **55**(1): 52-55.

- 张鹏宇,黄美东.磁控溅射 VO₂ 薄膜的制备及光学性能研究[J].真空,2018,**55**(1):52-55.
- [16] LIU Jin-cheng, LU Jian-ye, TIAN Xue-song, *et al.* The study of optimizing parameters in preparing VO₂ films by magnetron sputtered method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 65-67.
刘金城,鲁建业,田雪松,等.磁控溅射法制备二氧化钒薄膜最佳参量的研究[J].光子学报,2003,**32**(1):65-67.
- [17] ZHU Hui-qun, LI Yi, WANG Hai-fang, *et al.* Infrared optical properties of thermochromic energy-saving thin films with nanostructure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2794-2799.
朱慧群,李毅,王海方,等.热致变色纳米节能薄膜红外光学特性[J].光学学报,2010,**30**(10):2794-2799.
- [18] LI Yun-long, FU Hua-rui, ZHANG Xiao, *et al.* Vanadium oxide thin films with low phase transition temperature prepared by magnetron sputtering[J]. *Metallic Functional Material*, 2017, **24**(3): 18-24.
李云龙,付花睿,张霄,等.磁控溅射制备低相转变温度氧化钒薄膜[J].金属功能材料,2017,**24**(3):18-24.
- [19] TANG Zhi-wu, XU Ma-ji, TAO Xin, *et al.* Preparation and metal-insulator transition properties of high quality epitaxial VO₂ films[J]. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 2017, **39**(3): 217-221.
唐志武,徐马记,陶欣,等.高质量外延 VO₂ 薄膜制备及其金属-绝缘体相变特性研究[J].湖北大学学报(自然科学),2017,**39**(3):217-221.
- [20] TANG Chao-yang, ZHANG Cong, CEHNG Jing-yun, *et al.* Epitaxial growth and characterization of VO₂ thin film on sapphire by pulsed laser deposition[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2017, **37**(6): 623-627.
唐朝阳,张聪,程静云,等.蓝宝石衬底上 VO₂ 薄膜的 PLD 外延生长[J].真空科学与技术学报,2017,**37**(6):623-627.
- [21] LI Yao. Preparation and thermal-induced phase transition property of VO₂ film through a facile inorganic sol-gel method [J]. *Chemical Engineer*, 2017, **258**(03): 10-12.
李尧.一种无机沉淀-胶溶法制备二氧化钒薄膜及热致相变性能[J].化学工程师,2017,**258**(03):10-12.
- [22] KRI P, WARWICK M E A, RIDLEY I, *et al.* Fluorine doped vanadium dioxide thin films for smart windows[J]. *Thin Solid Films*, 2011, **520**(4): 1363-1366.
- [23] WU Jing, HUANG Wan-xia, *et al.* Effect of annealing temperature on thermochromic properties of vanadium dioxide thin films deposited by organic sol-gel method[J]. *Applied Surface Science*, 2013, **268**: 556-560.
- [24] TIAN Ye, LUO Fei, LIU Da-bo, *et al.* Anti-laser irradiation ability of VO₂ films against pulsed power laser[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, **37**(3): 56-60.
田野,罗飞,刘大博,等.脉冲激光辐射下 VO₂ 薄膜的光限幅性能[J].航空材料学报,2017,**37**(3):56-60.
- [25] LI Hong-zhe, SHENG Chuan-xiang, LI Shen-bo, *et al.* Phase transition properties of vanadium oxide thin films irradiated by nanosecond laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**(5):059001.
李宏哲,盛传祥,厉申博,等.纳秒激光作用下二氧化钒薄膜相变特性[J].强激光与粒子束,2015,**27**(5):059001.
- [26] LUO Yong-quan, WANG Wei-ping, LUO Fei. Experimental study on heating-induced phase transition of vanadium dioxide thin films irradiated by CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5): 713-716.
骆永全,王伟平,罗飞.连续激光辐照下二氧化钒薄膜热致相变实验研究[J].强激光与粒子束,2006,**18**(5):713-716.
- [27] YU Xiao-jing, LI Yi, WANG Hai-fang, *et al.* Infrared optical properties of VO₂ nano-array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 1120-1124.
俞晓静,李毅,王海方,等.二氧化钒纳米点阵红外光学特性研究[J].光子学报,2010,**39**(6):1120-1124.
- [28] SUN Yao, LI Yi, TANG Jia-yin, *et al.* Optical properties of Au/VO₂ double-film nano array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1131001.
孙瑶,李毅,唐佳茵,等.Au/VO₂ 双层薄膜纳米点阵的光学特性[J].光子学报,2015,**44**(11):1131001.

Foundation item: National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No. 61405248), State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(No.SKL2013ZR03)

引用格式:LIU Zhi-wei, LU Yuan, FENG Yun-song, *et al.* Phase Transition Characteristics of VO₂ Thin Films Irradiated by Multiband Infrared Laser Studied by Using Pump Probe Method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1231002

刘志伟,路远,冯云松,等.基于泵浦探针法研究 VO₂ 薄膜多波段红外激光相变特性[J].光子学报,2018,**47**(12):1231002