

doi:10.3788/gzxb20184710.1031001

VO₂ 薄膜受脉冲激光辐照实验及理论计算

刘志伟, 路远, 冯云松, 刘瑞煌, 胡杰

(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:为了探究在脉冲激光辐照 VO₂ 薄膜过程中, 影响薄膜相变响应时间的因素, 基于 COMSOL 对辐照过程进行仿真计算. 建立辐照 VO₂ 薄膜的物理模型, 并设置模型的边界条件, 利用红外脉冲激光辐照三组通过分子束外延法制备的 VO₂ 薄膜, 间接得到了薄膜平均吸收率, 并将吸收率实验数据带入计算模型中. 在仿真计算中, 考虑了激光的功率密度、薄膜基底厚度和薄膜初始温度等因素对仿真结果的影响. 实验结果表明: 增大激光功率密度和初始温度, 减小基底厚度均可缩短薄膜辐照中心相变时间, 并且相变时间和激光功率密度呈指数衰减趋势. 5 000 W/mm² 的激光辐照基底厚度分别为 0.15 mm、0.3 mm、0.5 mm 的三组 VO₂ 薄膜, 达到相变的时间分别为 157 ns、250 ns、455 ns, 相变时间随薄膜初始温度升高线性减小. 在入射激光功率不明确时, 可以通过给 VO₂ 薄膜施加一个接近相变点的偏置温度, 适当控制薄膜基底厚度等来缩短相变时间, 这对 VO₂ 薄膜防护激光干扰中相变响应时间的相关研究具有一定的借鉴意义.

关键词: 激光辐照; 防护激光干扰; 相变响应时间; COMSOL 仿真; VO₂ 薄膜

中图分类号: O434.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)10-1031001-7

Experiments and Theoretical Calculations of VO₂ Thin Films Irradiated by Pulse Laser

LIU Zhi-wei, LU Yuan, FENG Yun-song, LIU Rui-huang, HU Jie
(Electronic Countermeasures Institute of National University of Defense Technology,
State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to explore the factors that affect the phase transition response time of VO₂ thin films irradiated by pulse laser, we simulated the irradiation process based on COMSOL. The physical model of irradiation VO₂ thin films was established first, and the boundary conditions of the model were set, the infrared pulse laser irradiated three groups of VO₂ thin films prepared by molecular beam epitaxy, and the average absorptivity of the film was obtained indirectly, the absorptivity experimental data was brought into the calculation model. The influence of laser power density, substrate thickness and initial temperature of VO₂ thin films on the simulation results were considered in the simulation. Experimental results show that: increasing the laser power density and initial temperature, decreasing the base thickness can shorten the phase transition time of the film irradiation center. What's more, the phase transition time and the laser power density show exponential decay trend. The 5 000 W/mm² laser irradiated three groups of VO₂ thin films, respectively, their base thickness are 0.15 mm, 0.3 mm, 0.5 mm, the time of phase change is 157 ns, 250 ns and 455 ns respectively. The phase transition time decreases linearly with the initial temperature of the film. When the incident laser power level is not specified, we can apply a bias temperature which is close to the phase transition point on the VO₂ film, and control the film substrate thickness to shorten the phase transition time. This study has certain

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, 博导, 主要研究方向为光电材料与器件. Email: luyuanmail@163.com
收稿日期: 2018-05-07; 录用日期: 2018-08-12

<http://www.photon.ac.cn>

guiding significance for the study of phase change response time in the VO_2 thin films defending laser jamming.

Key words: Laser irradiation; Defending laser jamming; Phase transition response time; COMSOL simulation; VO_2 thin films

OCIS Codes: 310.6870; 140.3470; 140.6810

0 引言

VO_2 是一种相变功能材料,可在相变点前后实现金属-绝缘体之间的相互可逆转变^[1],在相变前后对红外波透过率具有特殊的调制特性,低于相变温度时对红外线高透射,高于相变温度时对红外线低透射,在绿色节能建筑、国防工业等领域具有较大的应用前景^[2-5].在军事应用领域,由于激光武器的快速发展,寻求相关的激光防护技术也显得日益迫切,而 VO_2 这种相变前后特殊的红外调制特性可被用来作为一种激光加固材料,以对抗敌方红外激光武器对我方光电设备的干扰或致盲^[6].但在实际应用中需要考虑诸多问题,如透过率调制深度、防护带宽、激光的能量级别等,还有一个关键问题即薄膜对激光防护的响应时间.一般要求从薄膜受到激光辐照开始,到薄膜发生相变实现防护效能这个过程耗时尽可能短,通常这个响应时间要求小于光电探测器对激光的响应时间,一般为微秒、纳秒级别^[7].尽管目前 VO_2 的相变时间可以在纳秒甚至更短的时间内完成^[8-9],但诱发其相变的响应时间仍然相对较长.理论上可从两个角度寻找解决途径,一是从薄膜本身出发,对薄膜进行合理设计,比如降低薄膜的相变温度,较常见的有引入离子液体法^[10]、氢化处理法^[11]和掺杂法等.张娇等^[12]采用直流磁控溅射与后退火工艺相结合的方法,在掺氟 SnO_2 (FTO)导电玻璃基底上制备了高质量的掺钨 VO_2 薄膜,测得掺杂后其相变温度降低到 32°C .但掺杂法降低相变温度会产生一个副作用,即掺钨会使载流子浓度增加,使薄膜的金属态更加稳定,降低薄膜的透过率^[13],这对依赖光信号进行工作的光电探测器是非常不利的.二是从薄膜之外的条件入手,比如在电致相变中提高阈值电压^[14-15]、光致相变中提高激光功率等.虽然在对抗激光干扰的实战中,激光是作为矛的一方,无法对敌方的激光源进行控制,但仍然需要考虑防护中可能出现的激光和其它因素对防护效能影响的实际情况,探究在激光辐照 VO_2 薄膜中影响其相变响应时间的因素.徐凯^[16]等利用ANSYS有限元分析了入射的脉冲激光功率密度、激光光斑尺寸、脉冲宽度和激光重复频率对 VO_2 薄膜受激光辐照响应时间的影响,得到了在一定范围内增大激光光斑尺寸和功率密度会缩短薄膜相变响应时间,增大脉宽或重复频率有利于缩短薄膜相变响应时间的结论.但是徐凯等人在仿真过程中的薄膜吸收率参数来源缺乏一定的说服力,并且在仿真计算中只考虑到激光的相关参数,而没有考虑到薄膜本身相关因素.因此,在仿真计算之前,通过实验测得薄膜的平均吸收率,并将其作为仿真参数代入到仿真模型中,同时考虑激光功率密度、薄膜的基底厚度和初始温度等因素对薄膜相变响应时间的影响,则更加具有参考意义.

1 物理模型

高斯激光辐照薄膜的物理模型如图1.

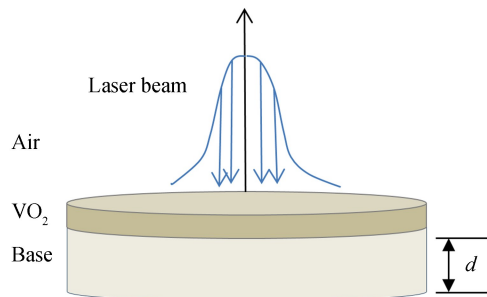


图1 高斯激光辐照薄膜模型

Fig.1 Model of thin films irradiated by Gaussian laser beam

利用COMSOL5.2中的固体传热模块,并选择三维瞬态预研究,加载脉宽、激光光斑半径、重频和功率密度大小均可调的脉冲激光.该模型中的相关参数设置如表1.

表 1 模型中的相关参数
Table 1 Related parameters in the model

Parameters	Laser spot radius	Laser pulse width	Laser repetition frequency	Film initial temperature
Value	0.5 mm	20 ns	20 KHz	
Parameters	Environment temperature	Al ₂ O ₃ size	VO ₂ size	293.15 K
Value	293.15 K	2 mm×2 mm×Ψ mm	2 mm×2 mm×50 nm	

其中基底的厚度 Ψ 可以在计算中按照要求进行设置.将薄膜视为热传导均匀的各向同性材料,其中 VO₂ 材料选择[solid, a-axis],它的导热系数设置为 150 W/(m·k),常压热容为 10.8 J/(kg·K)^[16],而热膨胀系数、密度等参数为模块默认值. Al₂O₃ 选择(alpha)[solid polycrystalline sapphire],它的相关参数,如导热系数、常压热容、密度、杨氏模量、泊松比、体积模量、剪切模量等,均为模块默认值.模块中的热通量边界只选择 VO₂ 和激光接触层,且初始温度和环境温度均设置为 293.15 K.薄膜在受到加载脉冲激光辐照时,其温度场分布 $T(x, y, z, t)$ 满足热传导方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中的 ρ, κ, c 分别是薄膜材料的密度、导热系数、比热容, $Q(x, y, z, t)$ 为激光产生的外热源,在该传热模型中势之为内热通量,其表达式为

$$Q(x, y, z, t) = \bar{I} \exp \{ -[(x-1)^2 + (y-1)^2]/a^2 - \beta z \} f(t) \quad (2)$$

式中 α 为薄膜对激光的吸收率,它和透射率 τ 、反射率 γ 的关系为

$$\alpha + \tau + \gamma = 1 \quad (3)$$

因此可由实验先测得透射率和反射率,间接得到吸收率. \bar{I} 为脉冲激光的平均强度, β 为材料的吸收系数,它和消光系数 k 和入射波长 λ 有关

$$\beta = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (4)$$

加载的脉冲激光,其波形函数为 $f(t)$, Γ, τ 分别为脉冲激光的脉冲周期和脉冲宽度,则 $f(t)$ 的表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 1, & (n-1)\Gamma < t < (n-1)\Gamma + \tau \\ 0, & (n-1)\Gamma + \tau < t < n\Gamma \end{cases} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

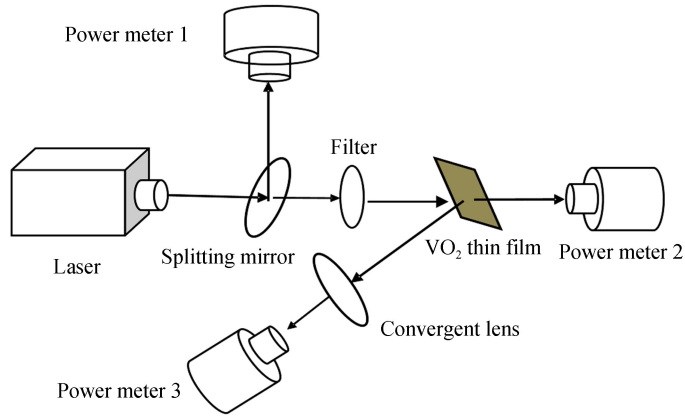
模型的初始条件和边界条件设置为

$$\begin{cases} T(x, y, z, t=0) = T_0 = 293.15 \text{ K}, T_e = 293.15 \text{ K} \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{z=z_0} = h(T - T_e) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_e^4) \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{z=0} = h(T_e - T) + \varepsilon\sigma(T_e^4 - T^4) \\ -\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x, y=0, x, y=2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, T_0 和 T_e 分别为薄膜初始温度和环境温度, h 为薄膜和周围空气的换热系数,由于薄膜在吸收激光能量的同时,还在向周围环境辐射热量,因此根据斯特潘-玻尔兹曼公式,认为 $\varepsilon = \alpha$,其中 σ 为斯特潘-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$,由于薄膜极薄,忽略其侧面对环境的散热作用,即可认为其侧面与环境热绝缘.

2 实验

为了通过式(3)得到薄膜对激光的吸收率 α ,需要测出薄膜对激光的透过率和反射率,搭建的实验平台如图 2.

图2 脉冲激光辐照 VO₂ 薄膜实验图Fig.2 Experimental schematic diagram of pulse laser irradiated VO₂ thin film

图中功率计 1、2、3 分别是测出入射的激光功率、透过薄膜后的激光功率、被薄膜反射的激光功率 P_1 、 P_2 、 P_3 。用 P_2/P_1 表示薄膜对激光的透过率 τ ，用 P_3/P_1 表示薄膜对激光的反射率 γ 。因此可以根据式(3)得到相应的吸收率。对三组膜厚均为 50 nm 的薄膜样品在相同外界环境下进行激光辐照实验，得到各组样品的透过率、反射率、吸收率曲线，如图 3。

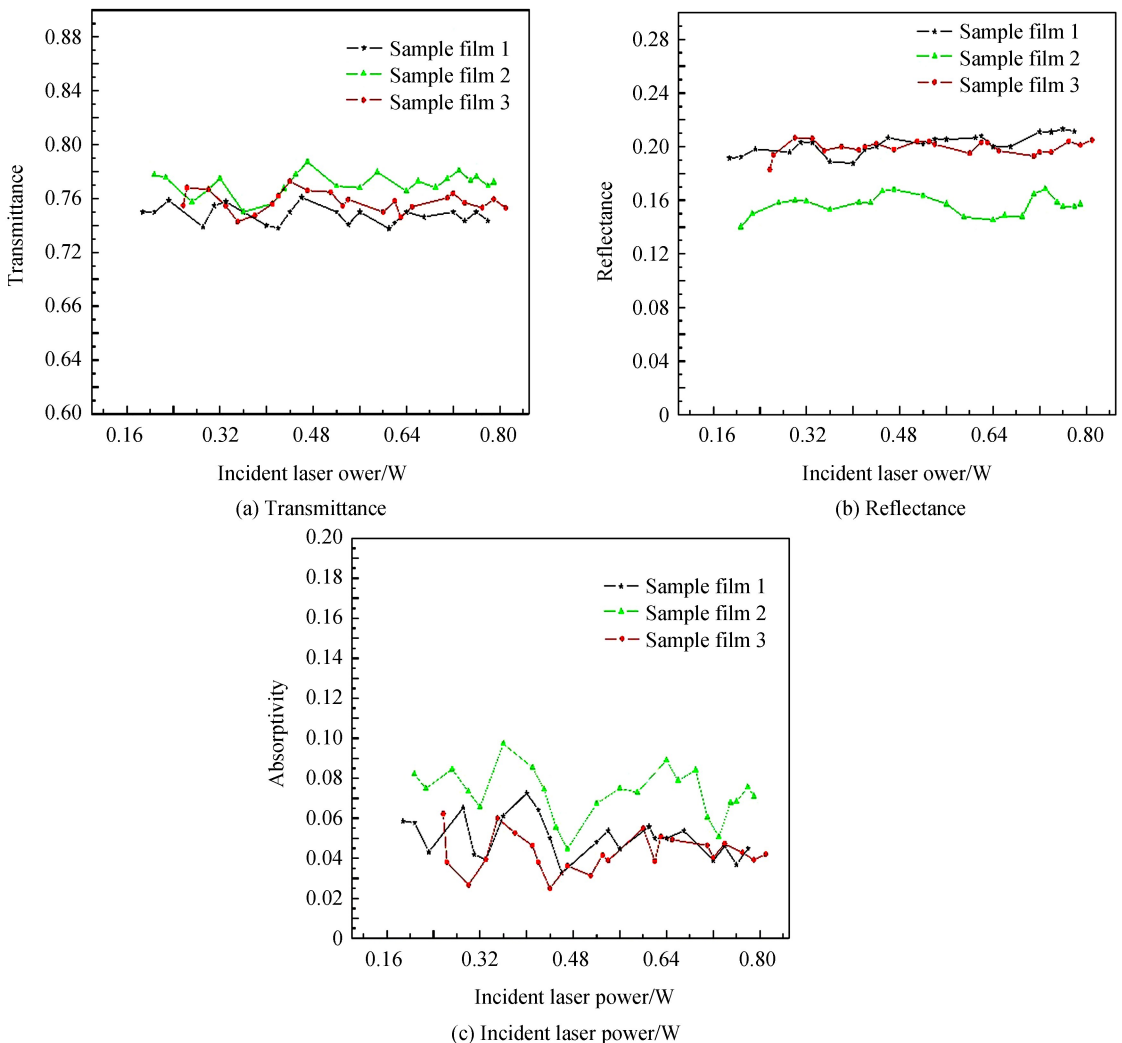


图3 各组样品的透过率、反射率和吸收率

Fig.3 The transmittance, reflectance and absorptivity of samples in each group

对各组实验数据进行整理得到表 2.

表 2 各组样品薄膜的平均透过率、平均反射率和平均吸收率

Table 2 The average transmittance, reflectance and absorptivity of VO₂ thin films in each sample group

Catalogue	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Average
Transmittance	$\bar{\tau}_1=0.748$	$\bar{\tau}_2=0.771$	$\bar{\tau}_3=0.758$	$\bar{\tau}=0.759$
Reflectance	$\bar{\gamma}_1=0.202$	$\bar{\gamma}_2=0.156$	$\bar{\gamma}_3=0.199$	$\bar{\gamma}_1=0.186$
Absorptivity	$\bar{\alpha}_1=0.05$	$\bar{\alpha}_2=0.073$	$\bar{\alpha}_3=0.043$	$\bar{\alpha}=0.055$

由此得到三组 VO₂ 薄膜样品的平均透过率、反射率和吸收率分别为 0.759、0.186 和 0.055.所以在实际的仿真过程中,式(2)里的吸收率取值 0.055.

3 仿真结果及分析

研究中,利用分子束外延法(Molecular Beam Epitaxy, MBE)制备了相变温度约为 50°C (324 K) 的 VO₂ 单晶薄膜,因此可认为薄膜被激光辐照加热到 324 K 时,可实现由半导体相到金属相的转变.仿真中,为了探究不同基底厚度对薄膜达到相变的时间影响,以及入射激光的功率密度对薄膜达到相变的时间影响,设置了基底厚度为 0.15 mm、0.3 mm、0.5 mm 的三组样品,并对他们分别施加 25 W/mm²、50 W/mm²、75 W/mm²、100 W/mm²、125 W/mm²、150 W/mm²、175 W/mm²、200 W/mm² 功率密度的入射激光,得到仿真结果如图 4.

随着入射激光功率密度的增大,VO₂ 薄膜受激光辐照温度达到相变温度的时间逐渐缩短,同时温度升高的速度也逐渐趋于缓和.这表明在其他参数不变的前提下,提高入射激光的功率密度可以缩短薄膜相变时间,但是功率增大不会使相变时间无限缩小,而是会收敛于某个极小值.这和徐凯^[16]等人得到的仿真结论一致.薄膜基底厚度越大,在同样的激光辐照下,其达到相变的时间也就相应越长,这可能是由于基底厚度增大导致薄膜对激光的吸热深度变大.在同样辐照时间内,VO₂ 膜层吸收的激光能量相同,但它们向基底传递的热量与基底的厚度正相关,基底越厚则会从 VO₂ 膜层吸收掉更多热量,所以 VO₂ 膜层的热损失也就相应越大,从而延缓 VO₂ 膜层的温升速率.

由图 5 的三组厚度分别为 0.15 mm、0.3 mm、0.5 mm 的基底,在 200 W/mm² 的激光辐照下温度随时间的变化曲线,可知他们的变化趋势一致,即薄膜辐照中心温度随着辐照时间线性增加,但达到相变温度 324 K 的时间随着基底厚度减小而减小.在该激光辐照下,薄膜中心温度达到 324 K 的时间分别为 53.8 μs、55.95 μs、60.2 μs.为了缩短相变反应时间,依据图 4 适当增大激光功率密度可以缩短温升时间,当把激光功率密度增大到 5 000 W/mm² 时,得到三组不同厚度基底的中心温度达到相变条件的的时间分别为 157 ns、250 ns 和 455 ns,其辐照表面的温度分布如图 6.

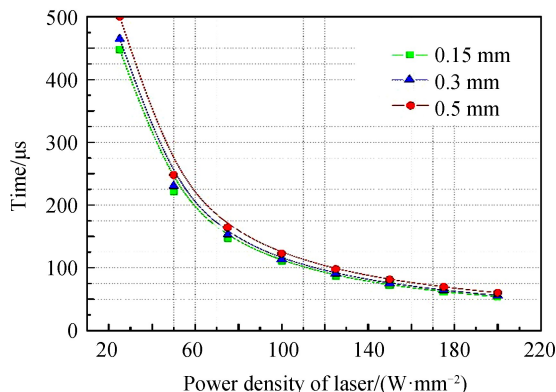


图 4 不同厚度基底薄膜达到相变温度的时间
Fig.4 Reaching phase change time of VO₂ thin films with different thickness of base

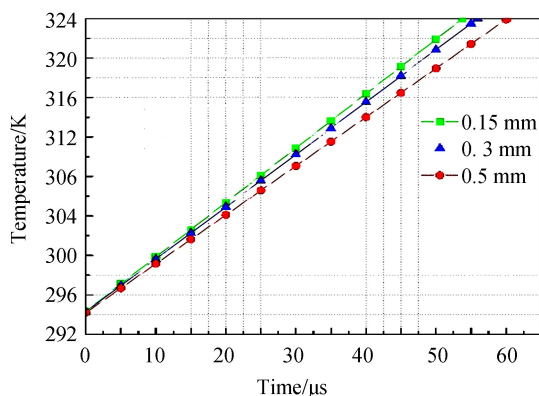


图 5 不同基底厚度的中心温度随时间变化曲线
Fig.5 Temperature-time curves of different base thickness

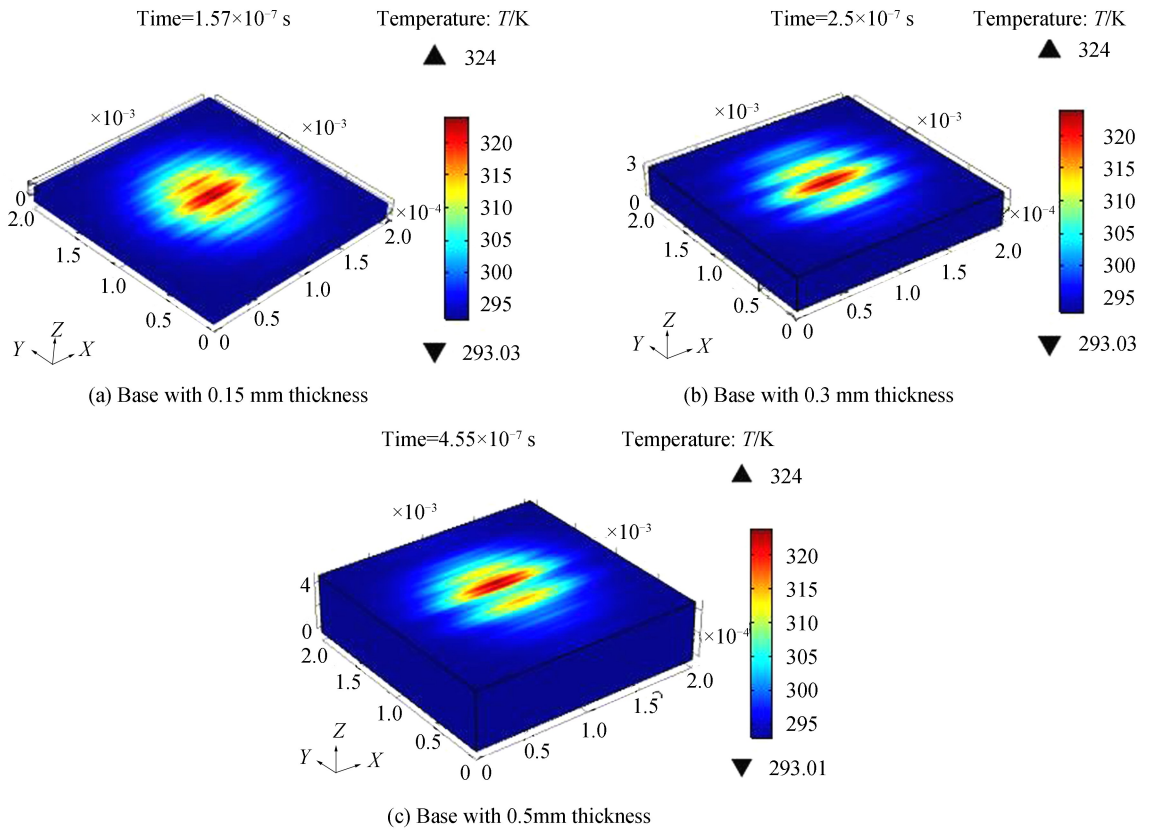


图 6 达到相变点时薄膜温度场分布
Fig.6 The distribution of temperature field when the film reaching the phase transition point

图 6 为薄膜受激光辐照的热分布图,加载的是高斯激光,因此理想的辐照面热分布情况应该是同心圆,由内向外温度逐渐降低.但图 6 中的各分布图并不是理想情况,主要是由于在网格划分的时候,对网格的细分设置为“较粗糙”,而不是设置为“精细”.因为网格划分得越精细,得到的数据也就相对越精确,温度分布图也就越趋于理想情况,这就涉及到计算机的计算量问题.

图 7 是在入射激光功率密度为 25 W/mm^2 ,基底厚度为 0.5 mm 时得到的薄膜中心温度达到相变点时间和初始温度的关系图,即相变时间随着初始温度的降低线性减小,因此在激光功率密度一定的条件下,可以提高薄膜的初始温度进而缩小相变时间.

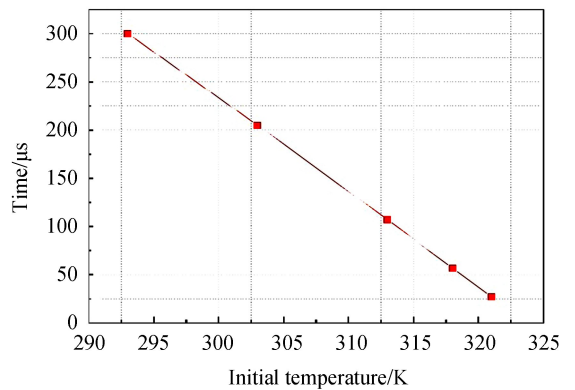


图 7 不同初始温度下薄膜达到相变温度的时间
Fig.7 The time that the film reaches the phase transition temperature under different film initial temperature

4 结论

利用分子束外延法,在厚度为 0.5 mm 的蓝宝石基底上制备了厚度为 50 nm 的 VO_2 外延薄膜,通过对薄膜的激光辐照实验,得到三组薄膜样品的平均透过率、平均反射率、平均吸收率分别为 0.759 、 0.186 、 0.055 .基于 COMSOL 多物理场的热传导模块,建立脉冲激光辐照薄膜的物理模型,分别探究了入射激光的功率密度、薄膜的基底厚度、薄膜的初始温度等因素对薄膜达到相变点时间的影响,结果表明:入射激光功率密度越大,薄膜达到相变时间越短,但是随着激光功率密度一直增大,相变时间减小的速度非线性,会不断减缓最终趋于某个极小值,类似于“指数衰减”;薄膜基底厚度的增大会延缓相变的时间;提高薄膜的初始温度有利于降低相变时间.在入射激光功率密度 200 W/mm^2 时,薄膜中心温度达到相变点的时间为微秒级,而入射激光

功率密度扩大为 5 000 W/mm²时,基底厚度为 0.15 mm、0.3 mm、0.5 mm 的薄膜辐照中心达到相变温度的时间分别为 157 ns、250 ns 和 455 ns.

本文通过辐照实验间接得到薄膜的吸收率,并默认其在相变前后保持不变,将其带入 COMSOL 模型中进行仿真计算是有一定误差的,因为薄膜在相变前后吸收率会发生一定幅度的变化,即吸收率是相变过程中的一个变量,这给后期更为精确的仿真计算带来一定挑战.

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] CHEN Zhang, CAO Chuan-xiang, LUO Hong-jie, et al. VO₂-based thermo chromic smart window: From energy savings to generation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(15): 1661-1678.
陈长,曹传详,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.
- [3] WANG Ya-qin, YAO Gang, HUANG Zi-jian, et al. Infrared laser protection of multi-wavelength with high optical switching efficiency VO₂ film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(5): 057102.
王雅琴,姚刚,黄子健,等. 用于红外激光防护的高开关率 VO₂ 薄膜[J]. 物理学报, 2016, **65**(5):057102.
- [4] LI Yu, FANG Hui, TAN Guo, et al. Development of high-performance 17 μm uncooled VOx infrared focal plane array [J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(9): 785-797.
李煜,方辉,谭果,等. 高性能 17 μm 非制冷氧化钒红外焦平面探测器的研制[J]. 红外技术, 2017, **39**(9):785-797.
- [5] LIU Ying, WANG Wei, ZHONG Yi, et al. Study on infrared stealth performance of thermo chromic-emissivity fabrics with VO₂ coating[J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(6): 639-644.
刘影,王薇,钟毅,等. 热致变发射率 VO₂ 涂层织物的红外隐身性能研究[J]. 激光与红外, 2013, **43**(6):639-644.
- [6] 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.
- [7] MA Qi, DENG Gong-rong, SU Yu-hui, et al. Response of InSb infrared detector with Mesa PN structure[J]. *Infrared Technology*, 2016, **38**(4): 305-309.
马启,邓功荣,苏玉辉,等. 台面 PN 结 InSb 红外探测器响应时间研究[J]. 红外技术, 2016, **38**(4):305-309.
- [8] 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.
- [9] 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的相变特性[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**(5):059001.
- [10] NAKANO M, SHIBUYA K, OKUYAMA D, et al. Collective bulk carrier delocalization driven by electrostatic surface charge accumulation[J]. *Nature*, 2012, **487**(7408): 459.
- [11] WARNICK K H, WANG B, PANTELIDES S T. Hydrogen dynamics and metallic phase stabilization in VO₂[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(10): 101913.
- [12] ZHANG Jiao, LI Yi, LIU Zhi-min, et al. Characteristics of electrically-induced phase transition in tungsten-doped vanadium dioxide film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(23): 238101.
张娇,李毅,刘志敏,等. 掺钨 VO₂ 薄膜的电致相变特性[J]. 物理学报, 2017, **66**(23):238101.
- [13] TAKAMI H, KANKI T, et al. Filling-controlled Mott transition in W-doped VO₂[J]. *Physical Review B*, 2012, **85**(20): 205111.
- [14] HAO Ru-long, LI Yi, LIU Fei, et al. Optical modulation characteristics of VO₂ thin film due to electric field induced phase transition in the FTO/VO₂/FTO structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(19): 198101.
郝如龙,李毅,刘飞,等. 基于 FTO/VO₂/FTO 结构的 VO₂ 薄膜电压诱导相变光调制特性[J]. 物理学报, 2015, **64**(19):198101.
- [15] XIONG Ying, WEN Qi-ye, TIAN Wei, et al. Researches on the electrical properties of vanadium oxide thin films on Si substrates[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(1): 017102.
熊瑛,文岐业,田伟,等. 硅基二氧化钒相变薄膜电学特性研究[J]. 物理学报, 2015, **64**(1):017102.
- [16] XU Kai, LU Yuan, LING Yong-shun, et al. Finite element analysis of temperature rising in VO₂ thin films under irradiation of CO₂ pulse laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 0531003.
徐凯,路远,凌永顺,等. 脉冲激光辐照下 VO₂ 薄膜升温的有限元分析[J]. 光子学报, 2015, **44**(5):0531003.

Foundation item: Supported by 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. Experiments and Theoretical Calculations of VO₂ Thin Films Irradiated by Pulse Laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1031001

刘志伟,路远,冯云松,等. VO₂ 薄膜受脉冲激光辐照实验及理论计算[J]. 光子学报, 2018, **47**(10):1031001