

doi:10.3788/gzxb20154405.0531003

脉冲激光辐照下 VO₂ 薄膜温升的有限元分析

徐凯, 路远, 凌永顺, 乔亚

(电子工程学院, 红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 合肥 230037)

摘 要:为掌握高功率脉冲激光防护中脉冲激光各参量对 VO₂ 薄膜温升的具体影响, 采用有限元分析程序 ANSYS 的热分析模块分析了 VO₂ 薄膜在脉冲激光辐照下的温度场变化, 分析讨论了 CO₂ 脉冲激光的光斑尺寸、功率密度、脉冲宽度、重复频率四个参量, 对 VO₂ 薄膜达到相变温度的时间与相变区域尺寸的影响. 结果表明, 光斑尺寸等四个参量共同影响薄膜达到相变温度的时间, 在一定范围内增大光斑尺寸和功率密度可缩短薄膜相变的时间, 而薄膜相变区域尺寸所占光斑面积的比例与二者并无直接关系, 增大脉宽或重频都有利于缩短薄膜达到相变的时间, 但前者对单脉冲产生热量的提升比后者效果更明显.

关键词:脉冲激光; 二氧化钒; 薄膜; 热传导方程; 温度场; 有限元分析

中图分类号: O484.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)05-0531003-6

Finite Element Analysis of Temperature Rising in VO₂ Thin Films Under Irradiation of CO₂ Pulse Laser

XU Kai, LU Yuan, LING Yong-shun, QIAO Ya

(Infrared and Low Temperature Plasma Key Laboratory of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to know the influence of parameter of pulse laser on the temperature filed in the researches of protection to high power pulse laser, the change of temperature filed of the films was analyzed by thermal analysis module of ANSYS. The influence of laser facula radius, power density, pulse width and repetition frequency on the time and area size of the VO₂ thin films phase transition was analyzed in the module. The results of analysis show that, the four parameters effect the transition reaching time of thin films together. The time can be shortened by amplifying laser facula radius and power density, but the proportion of area radius to laser facula radius can't be effected directly. Amplifying pulse width or repetition frequency can shorten the transition reaching time, while the former is better to amplifying the heat production by one pulse than the latter.

Key words: Pulsed laser; Vanadium dioxide; Thin films; Thermal conduction equations; Temperature field; Finite element analysis

OCIS Codes: 140.3470; 140.6810; 310.6870

0 引言

随着激光技术的发展, 利用激光能量高、方向性好等优点研制的激光武器已实现装备化与实战化. 与连续激光相比较, 脉冲激光具有能量输出时间短、瞬时功率大、光束发散半径小的特点, 因此美日欧等发达国家

致力于发展以脉冲高功率激光为能量源的激光武器, 所以对脉冲激光武器的防护显得非常重要. 目前基于线性和非线性防护材料的激光防护技术发展较成熟^[1], 其中 VO₂ 材料由于具有相变前后透射率发生突变, 且具有较低的相变温度(一般为 68℃)^[2]的优势而成为研究热点.

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金项目(No. SKL2013ZR03)资助

第一作者:徐凯(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外光学与材料. Email: xukai0110@foxmail.com

导 师:凌永顺(1937—), 男, 教授, 主要研究方向为电子对抗、光学工程等. Email: lingysmail@163.com

收稿日期:2014-12-17; **录用日期:**2015-03-14

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

薄膜在激光作用下发生光致相变,其过程可看作瞬态温度场引发的热致相变,路远等^[3]从理论上论证了对高功率脉冲激光防护可行性, Jin P^[4]等设计了一种可用于激光防护的新型多功能智能窗口结构. 然而由于理论研究与制备技术不成熟,目前仍无法完成 VO₂ 薄膜对 CO₂ 激光等高功率脉冲激光防护的实际应用,甚至对其系统性的定量分析也仍较少. 结合激光辐照条件下薄膜的温升的分析方法^[5-11],本文综合分析了脉冲激光辐照下 VO₂ 薄膜的温升规律,明确了脉冲激光的功率密度、光斑尺寸、脉冲宽度、重复频率等各参量对 VO₂ 薄膜温度场变化的影响,为其在 CO₂ 激光等高功率脉冲激光防护应用的研究提供了理论指导.

1 理论模型

激光束照射下的 VO₂ 薄膜可简化为如图 1 所示的薄膜结构.

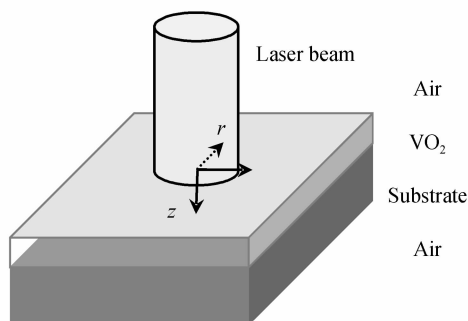


图 1 激光辐照下的薄膜模型

Fig. 1 Model of thin films irradiated by laser beam

如图 1 所示,设薄膜厚度为 d ,基底厚度为 D ,入射激光光束在薄膜表面 ($z=0$) 呈 Gauss 型空间分布,其光强分布为^[12]

$$I(r, t) = [P_0(t) / (\pi r^2)] \exp[-(r/R)^2] \quad (1)$$

R 为入射激光光斑半径, r 为薄膜表面某点与激光光斑中心的距离, $P_0(t)$ 为激光的瞬时输出功率. 当激光照射于薄膜表面,激光能量不仅被材料表面吸收,由于薄膜与基底内部存在导热,整个膜系内部的任意一点都可能吸收激光能量形成“内热源”,其热源分布函数可以表示为

$$Q(r, z, t) = \alpha I_0 \exp[-(r/R)^2 - \beta z] \quad (2)$$

α 为薄膜或基底的吸收系数,根据不同的入射激光波长 λ ,结合材料对应的消光系数,可得到

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3)$$

将薄膜与基底都看作导热系数各项同性的材料,因此激光照射下的薄膜系统内部的温度场 $T(r, z, t)$ 满足热传导方程^[13-15],即

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \epsilon \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(r, z, t) g(t) \quad (4)$$

初始条件和边界条件为

$$\begin{cases} T(r, z, 0) = T_0 & -\epsilon \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{z=0} = h(T - T_0) \\ -\epsilon \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{z=d} = h(T - T_0) & -\epsilon \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r=r_0} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$g(t)$ 为激光的波形函数,对于脉冲激光, $g(t)$ 可设为单位阶跃函数, ϵ 、 ρ 、 c 分别为 VO₂ 膜层或基底材料的导热系数、密度、比热容, T_0 为整个薄膜系统所处环境的初始温度(室温 20℃), n 为表面法向, h 为表面与空气的热交换系数.

在 ANSYS 热分析模型构建过程中,薄膜模型参数的设置与薄膜制备实验中测得的数据保持一致,如表 1 所示.

表 1 热分析模型参量

Table 1 Parameters in thermal analysis model

Material	Density/ (kg · m ⁻³)	Heat conductivity/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Specific heat/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	Thickness/ μm
Si substrate	2400	610	700	200
VO ₂ thin film	4 339	150	10.8	0.3

本文采用磁控溅射法制备的 VO₂ 薄膜的升温相变中心温度约为 60℃,当膜层温度未达到 60℃ 时, VO₂ 膜层不满足相变条件而维持半导体态,可假设相变前的光学常量、导热系数、比热容等物理属性为常量,考虑到薄膜相变后的物理属性发生突变,且瞬态热分析的重点在于分析激光热效应对激励正向相变的影响,而相变后的状态暂不在分析范围内,因此瞬态热分析的温度上限可设为 60℃. 由于该热分析模型具有轴对称性,因此只需对模型的一部分进行分析,可大大减少计算量.

2 分析与讨论

2.1 光斑尺寸的影响

采用 ANSYS 有限元分析软件模拟激光辐照点中心的温度达到相变温度 60℃ 前的瞬态热效应,设入射激光为单脉冲 CO₂ 激光,波长为 10.6 μm,功率密度为 2 × 10⁴ W/cm²,光斑半径分别设为 0.25 mm、0.50 mm、0.75 mm、1.00 mm、1.25 mm,空气热对流系数为 8 W/(m² · °C),得到如图 2 所示的对应不同光斑尺寸入射激光辐照中心的时间-温度变化曲线.

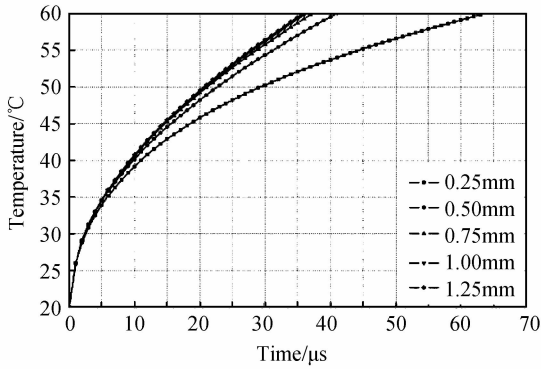
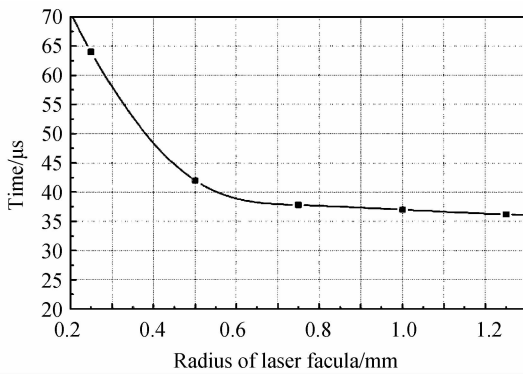


图2 不同光斑半径的温度-时间变化曲线

Fig. 2 Temperature-time curves of different laser facula radius

由图2可以看出,随着光斑半径增大,薄膜的升温速度增大,但增大幅度随着光斑半径增大而减小,最终升温曲线趋于稳定,薄膜达到60℃的时间对比如图3.

图3 VO₂ 薄膜达到相变温度的时间Fig. 3 Reaching phase transition time of VO₂ thin films

由图3可以看出,当光斑半径不断增大,辐照点达到60℃的时间也由64 μs缩短并保持约为36 μs,表明适当增大光斑尺寸可以缩短VO₂薄膜达到相变的时间,但光斑尺寸对相变时间的影响也有限度,对于一定的入射激光功率密度,增大光斑尺寸只能将该时间值收敛至某一极小值.当辐照中心温度达到60℃时,根据分析得到的温度场分布结果,可得如图4所示的光斑半径与温度中心区域半径的关系.

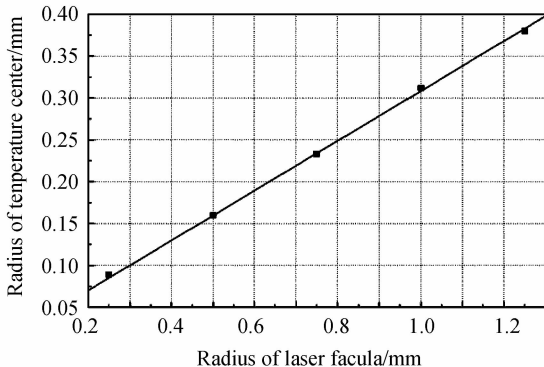


图4 光斑半径与辐照中心相变区域半径的关系

Fig. 4 Relationship between phase transition area radius and laser facula radius

由图4可以看出,光斑半径与中心温度区域半径的变化基本呈线性递增关系,通过计算后者所占光斑半径的比例可得,其所占比例较稳定的保持约为31%,并不随光斑半径增大而增大,表明增大光斑半径会增大热效应的累积效应,然而其产热效率保持不变,因此可通过入射激光的光斑半径推导得到VO₂薄膜实现相变区域的面积.

2.2 功率密度的影响

设入射激光为单脉冲CO₂激光,波长为10.6 μm,光斑半径为1.00 mm,功率密度分别设为0.5 × 10⁴ W/cm²、0.75 × 10⁴ W/cm²、1 × 10⁴ W/cm²、1.5 × 10⁴ W/cm²、1.75 × 10⁴ W/cm²、2 × 10⁴ W/cm²,空气热对流系数为8 W/(m² · °C),得到如图5所示的对应不同功率密度入射激光辐照点中心的时间-温度变化曲线.

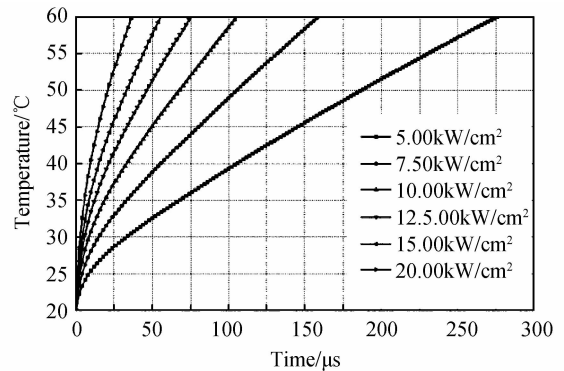
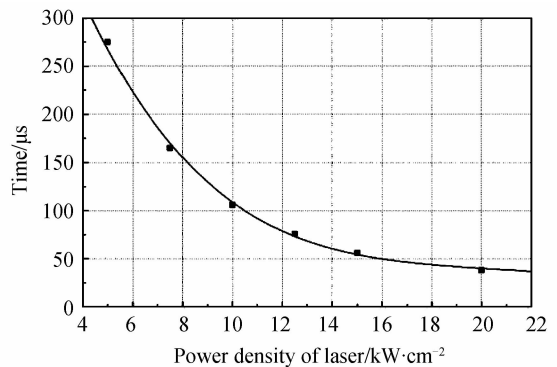


图5 不同功率密度的中心温度-时间变化曲线

Fig. 5 Temperature-time curves of different laser power density

由图5可以看出,辐照中心升温速度同样随激光功率增大而增大,但增大幅度随着光斑半径增大而减小,薄膜达到60℃的时间对比如图6所示.

图6 VO₂ 薄膜达到相变温度的时间Fig. 6 Reaching phase transition time of VO₂ thin films

由图6可以看出,随着功率密度增大,薄膜达到60℃的时间278 μs缩短为38 μs,同时升温速度的变化幅度逐渐减小并趋于稳定,表明对于一定光斑尺寸的入射激光,适当增大入射激光功率密度可以缩短VO₂薄膜达到相变的时间,然而增大功率密度不可能无限

缩短薄膜达到相变的时间,该时间应收敛于某一极小值.当辐照中心温度达到相变温度时,根据分析得到的温度场分布结果,可得如图7所示的光斑半径与温度中心区域半径的关系.

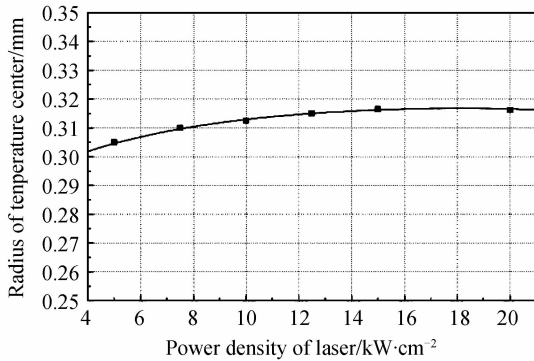


图7 功率密度与辐照中心相变区域半径的关系

Fig.7 Relationship between phase transition area radius and laser power density

由图7可以看出,随着功率密度增大,激光辐照中心相变区域的半径有微弱增大趋势,但曲线最终收敛于0.31 mm,占光斑半径比例为31%,同上节的分析结果一致.增大激光功率可增大热效应,但对辐照中心薄膜相变区域面积的影响有限,结合上节的分析结果,表明对于一定光斑半径、功率密度的入射激光,其辐照中心的薄膜相变区域半径随着二者增大将收敛于某常量,其成因与激光束的高斯特性有关,光斑上距辐照中心越远的点光强越小,则该点吸收的热量越少,同时在吸收系数、导热系数各向同性的薄膜材料内部总是存在稳定的导热效应,因此当光斑中心温度达到60℃时,距中心光斑半径31%的点处于热吸收与热释放相平衡的状态,该范围以外点的升温速度相对于其内部较慢,因此光斑中相变区域占光斑总面积的比例总是能保持某一特定常量.

2.3 脉冲宽度的影响

设入射激光为重频CO₂短脉冲激光,重复频率为10 kHz,波长为10.6 μm,光斑半径为1.00 mm,空气热对流系数为8 W/(m²·℃),功率密度为2×10⁴ W/

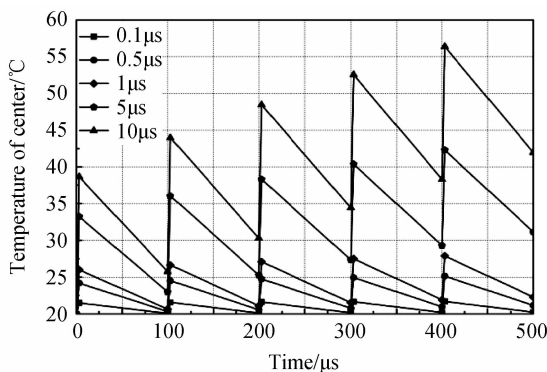


图8 不同脉冲宽度的中心温度-时间变化曲线

Fig.8 Temperature-time curves of different laser pulse width

cm²,脉宽分别设为0.1 μs、0.5 μs、1 μs、5 μs、10 μs,可得如图8所示的5个激光脉冲作用时间内辐照中心温度的变化.

由图8可以看出,由于激光载荷以脉冲形式作用于薄膜表面,同时激光作用间隙存在空气对流导热作用,因此激光辐照中心重复发生升温与冷却过程,且二者几乎都为线性变化,薄膜的温度呈锯齿状上升趋势.由于脉冲周期不变,随着脉宽增大,其温度累积效应不断增大,表明脉宽对辐照中心的温升规律有较明显的影响.由于中心温度在单脉冲时间内快速波动,为便于计算分析辐照中心的升温速度,可推算若干脉冲周期内温度变化的总体速度,结果如图9所示.

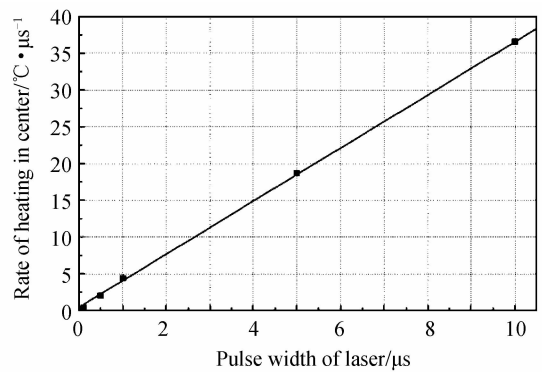


图9 不同脉宽激光辐照薄膜的升温速度

Fig.9 Temperature rising speed of different laser pulse width

由图9可以看出,激光辐照中心的升温速度变化与脉宽变化呈线性关系,当脉宽较小时,薄膜受激光辐照时间相对较短,而冷却时间相对较长,二者共同作用使得薄膜的升温速度较低,此时温度累积效应较小,随着脉宽增大,辐照中心的温度上升速度随之增大.因此根据如图所示的脉宽与升温速度的关系,可推算得到不同脉宽激光使薄膜达到相变温度(60℃)的时间,对于一定重频的脉冲激光,脉宽越大导致薄膜达到相变温度的时间越短,而脉宽过小可能会导致升温与冷却效果相抵消,导致薄膜无法产生温度累积.

2.4 重复频率的影响

设入射激光为重频CO₂短脉冲激光,脉宽为10 μs,波长为10.6 μm,光斑半径为1.00 mm,空气热对流系数为8 W/(m²·℃),功率密度为2×10⁴ W/cm²,重频分别为100 Hz、1 kHz、5 kHz、10 kHz,可得如图10所示的5个激光脉冲作用时间内辐照中心温度的变化.

由图10可以看出,对于不同重频的入射激光,从时间角度分析,重频越高的激光产热速度越快,导致薄膜达到相变时间显然越短,然而从单脉冲产热量分析,在相同数量的脉冲作用后,薄膜的温度曲线变化规律却较相似,令单脉冲作用后的温升为ΔT₀,不同重频对

应的 ΔT_0 关系如图 11 所示.

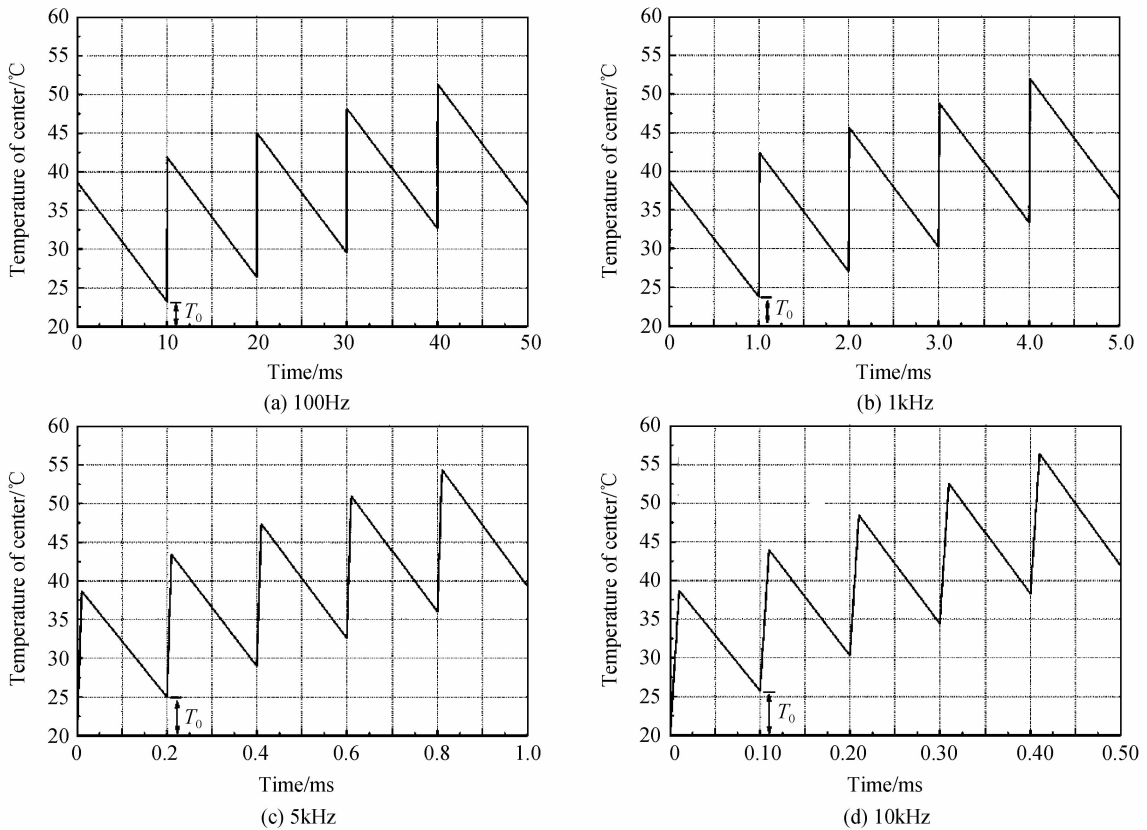


图 10 不同重复频率的中心温度-时间变化曲线

Fig. 10 Temperature-time curves of different laser repetition frequency

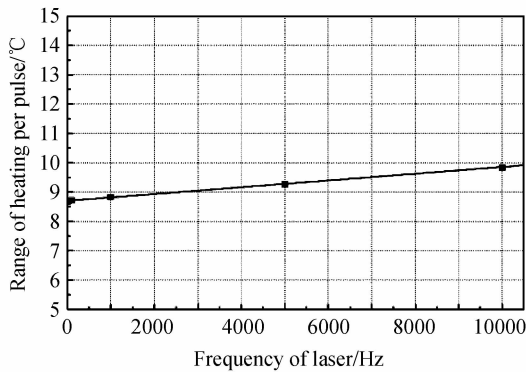


图 11 不同重频激光的单脉冲温升 ΔT_0 .

Fig. 11 Temperature rising range of one laser pulse of different repetition frequency

由图 11 可以看出,单个脉冲产生的升温幅度 ΔT_0 与重复频率 f 基本呈斜率较小的线性递增关系,当重频由 100 Hz 增大到 10 kHz,单个脉冲产生的升温由 8.71°C 增大到 9.83°C,重频提高 100 倍仅造成单脉冲升温幅度 ΔT_0 变化 1.12°C,结合上节分析结果,可以看出脉宽和重频共同决定薄膜达到相变的时间,但脉宽才是决定单脉冲产热量的主要因素,而重复频率对其影响则较小.表明在时间角度上,增大激光重频有利于缩短激励 VO₂ 薄膜发生相变的时间,但在单脉冲的产热量角度上,增大激光重频对产热量的提升并无较

明显效果.

3 结论

本文采用有限元程序 ANSYS 建立具有高斯光束特性的 CO₂ 脉冲激光($\lambda=10.6 \mu\text{m}$)辐照 VO₂ 薄膜模型,模拟分析了脉冲激光的光斑尺寸、功率密度等四个参量对 VO₂ 薄膜温升的影响.结果表明,四个参量都在不同程度上影响激光激励 VO₂ 薄膜达到相变温度的时间,其中适当增大光斑尺寸与功率密度可缩短薄膜达到相变的时间,但随着二者不断增大,时间值将收敛为常量而无法无限缩短;增大脉宽可缩短达到相变时间,然而脉宽过小可能导致升温与冷却效果相抵,使薄膜无法实现热致相变;增大重频可缩短薄膜达到相变时间,但无法有效提高单脉冲产热量.通过改变各参量,发现激光辐照中心发生相变的薄膜区域尺寸与光斑尺寸的比例总是收敛为常量,表明光斑尺寸等激光参量与该比例值并无直接关系,可推断其值可能与材料的吸收系数、导热系数等参量有关.通过对脉冲激光辐照下薄膜温升进行有限元热分析,讨论了脉冲激光不同参量对 VO₂ 薄膜温升的影响,可为实现高功率脉冲激光武器防护的实用化提供理论参考.

参考文献

[1] MA De-yue, LI Xiao-xia, GUO Yu-xiang, *et al.* Research

- progress in nonlinear protective materials against high energy laser[J]. *Laser & Infrared*, 2014, **44**(6): 593-599.
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.
- [2] MORIN F J. Oxide which show a metal-insulator at the neel temperature[J]. *Physical Review Letters*, 1959, **13**(1): 34-36.
- [3] LU Yuan, LING Yong-shun, FENG Yun-song, *et al.* Analysis of VO₂ thin film intelligent protection against pulsed power infrared-laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(11): 2886-2890.
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): 2886-2890.
- [4] JIN P. A novel multifunctional smart window with VO₂ and TiO₂ coatings[J]. *Journal of Shanxi University of Science & Technology*, 2004, **22**(5): 1-7.
- [5] MA Jian, ZHAO Yang, GUO Rui, *et al.* Numerical simulation of temperature rise of material surface irradiated by the laser[J]. *Laser Technology*, 2013, **37**(4): 455-459.
马健, 赵杨, 郭锐, 等. 激光辐照材料表层温升规律的数值模拟[J]. *激光技术*, 2013, **37**(4): 455-459.
- [6] WANG Yan-ru, LI Bin-cheng, LIU Ming-qiang, *et al.* Laser-induced temperature distributions in finite radial-size optical mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(2): 335-340.
王艳茹, 李斌成, 刘明强, 等. 激光照射有限尺寸高反射光学元件的温度场[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(2): 335-340.
- [7] ZHOU Wei-jun, YUAN Yong-hua, GUI Yuan-zhen, *et al.* Thermal effect of TiO₂/SiO₂ film irradiated by pulse laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1): 23-26.
周维军, 袁永华, 桂元珍, 等. 脉冲激光辐照 TiO₂/SiO₂ 薄膜热效应研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1): 23-26.
- [8] LI Da-wei, MENG Wen, MA Li-hua, *et al.* Finite element study on heat damage of moving target under the high energy laser irradiating[J]. *Optical Technique*, 2012, **38**(5): 624-629.
李大为, 蒙文, 马丽华, 等. 强激光干扰下运动目标热损伤效应的有限元研究[J]. *光学技术*, 2012, **38**(5): 624-629.
- [9] XU Hong-yu, ZHANG Yuan-chong, SONG Ya-qin, *et al.* Research progress in pulse laser heating thin film microscale heat transfer[J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(2): 152-162.
徐红玉, 张元冲, 宋亚勤, 等. 脉冲激光加热薄膜微尺度热传递研究进展[J]. *物理学进展*, 2004, **24**(2): 152-162.
- [10] ZHOU Wei-jun, YUAN Yong-hua, GUI Yuan-zhen, *et al.* Thermal effect of TiO₂/SiO₂/K9 film by 1.06 μm CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1307-1311.
周维军, 袁永华, 桂元珍, 等. 1.06 μm 连续激光辐照 TiO₂/SiO₂/K9 薄膜元件温升规律研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9): 1307-1311.
- [11] WANG De-fei, YU Ji-ping, GUO Chun-feng, *et al.* Thermal effect analysis of metal film ablation by ultra-short laser pulses[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(10): 1579-1584.
王德飞, 于继平, 郭春风, 等. 超短脉冲激光烧蚀金属薄膜材料的热效应分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1579-1584.
- [12] DAI Fu, XIONG Sheng-min, GONG Zi-zheng, *et al.* The temperature rise in films at the repeat rate pulse laser irradiation determined based on finite element method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **26**(6): 510-514.
代福, 熊胜明, 龚自正, 等. 重复频率脉冲激光辐照下光学薄膜元件温升的有限元分析[J]. *航天器环境工程*, 2009, **26**(6): 510-514.
- [13] LUO Fu, DU Xiang-wan, SUN Cheng-wei. Near-infrared laser beam diameter effect on damage threshold in K9 glass[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, **22**(1): 61-65.
罗福, 杜祥琬, 孙承伟. 光斑尺寸对 K9 玻璃近红外激光损伤阈值的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2002, **22**(1): 61-65.
- [14] 胡于进, 王璋奇. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 163-180.
- [15] DAI Fu, XIONG Sheng-min, ZHANG Yun-dong. Analysis of temperature rise of films at laser irradiation based on finite element method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 714-718.
代福, 熊胜明, 张云洞. 激光辐照下光学薄膜元件温升的有限元分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(4): 714-718.