

连续激光辐照下的 TiO_2 薄膜热传导性质

李代林*, 杨丹, 崔纪琨, 王宁, 朱化凤
(中国石油大学(华东)理学院, 山东青岛 266580)

摘要:热传导规律的研究在激光诱导薄膜材料改性等应用中有着重要的作用,本文针对二氧化碳激光器辐照下的二氧化钛(TiO_2)薄膜表面的热效应进行了理论仿真和实验研究。首先,对具有粗糙上表面的 TiO_2 薄膜,利用有限元法构建了连续激光作用下的 TiO_2 薄膜的立体模型并得到了其三维温度场分布。然后使用 CO_2 激光器进行辐照实验,分析了辐照时间和功率等参数对 TiO_2 薄膜形貌、晶相以及颜色的影响。仿真表明,连续激光辐照下 TiO_2 薄膜的瞬态温度场呈高斯分布,且与激光功率、光斑半径、辐照时间等因素有关。当表面温度小于分解温度时,薄膜上表面最大平均温度与激光功率满足线性关系,与光斑半径满足ExpAssoc非线性关系。实验结果表明,激光辐照引起 TiO_2 薄膜材料表面粗糙度降低且颜色变化。激光功率过小或辐照时间过短会导致有效作用面积小且不均匀,反之会产生热形变。结合仿真和实验可知使用功率为6 W,半径为3 mm的连续激光辐照 TiO_2 薄膜10 s时取得的处理效果最优。

关键词:连续激光;二氧化钛薄膜;传热规律

中图分类号:O436 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20191203.0628

Heat conduction properties of TiO_2 films irradiated by a continuous laser

LI Dai-lin*, YANG Dan, CUI Ji-kun, WANG Ning, ZHU Hua-feng
(College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)
* Corresponding author, E-mail: qd_ldl@upc.edu.cn

Abstract: The laws of heat conduction play an important role in the application of laser-induced film material modification. In this paper, the thermal effects of titanium dioxide (TiO_2) film surfaces irradiated by a carbon dioxide laser was studied theoretically and experimentally. Firstly, a three-dimensional model of titanium diox-

收稿日期:2018-08-10;修订日期:2018-10-12

基金项目:国家自然科学基金重大项目(No. 61890964);国家重点研发计划项目(No. 2017YFC1404000);国家科技重大专项(No. 2017ZX05019-006);山东省重点研发计划项目(No. GG201809250065);中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 19CX05003A-10, No. 18CX02046A)

Supported by Major Program of the National Natural Science Foundation of China(No. 61890964); National Key Research and Development Program Project(No. 2017YFC1404000); National Science and Technology Major Project(No. 2017ZX05019-006); Key Research and Development Project of Shandong Province(No. GG201809250065); Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 19CX05003A-10, No. 18CX02046A)

ide thin film with a rough surface was constructed using a finite element method and their three-dimensional temperature distribution were calculated. Then, the TiO₂ thin films were irradiated by a CO₂ laser and the effects of irradiation time, power on the morphology, crystal phases and color were analyzed. Simulation results show that the transient temperature field of titanium dioxide irradiated by a CW laser is a Gaussian distribution, which is related to laser power, spot radius, irradiation time and other factors. When the surface temperature is less than the decomposition temperature, the maximum average surface temperature of the film meets the linear relationship with the laser power, and the ExpAssoc nonlinear relationship is satisfied with laser spot radius. Experimental results show that because of laser irradiation, the roughness of TiO₂ thin film decreased and the color of the film changed. Small laser power or short irradiation time leads to small and uneven effective area, on the contrary thermal deformation will occur. Combined with the simulation and experiment results, it is found that the best treatment effect can be obtained when irradiating TiO₂ thin film 10 seconds with a laser with a power of 6 W and a radius of 3 mm.

Key words: continuous laser; titanium dioxide film; heat transfer rule

1 引言

环境污染及能源枯竭是当今人类面临的两大难题,大规模开发利用可再生能源是解决环境污染与能源问题的重要途径。染料敏化太阳能电池由于其成本、制造工艺等方面的优势成为目前的研究热点,而这种太阳能电池的效率及寿命受到薄膜材料等电池器件的影响较大。传统的光阳极TiO₂薄膜材料的禁带宽度较大,导致电子与空穴的复合率、电子注入率较低,可利用太阳能光谱范围较窄以及对染料敏化剂吸附量较低等问题,极大限制了染料敏化太阳能电池的光电转化效率。为此各种TiO₂薄膜改性技术层出不穷,主要有贵金属沉积、离子掺杂修饰、有机染料敏化等^[1-4],但传统的化学改性方法具有污染较大,反应时间长,生产成本高等不足。

激光表面改性技术基于激光与物质相互作用理论,利用能量的转移和传递产生各种物理、化学和生物等方面的效应^[5]。另外,其可精确控制对TiO₂材料的改性位置、面积、程度,并在对于复杂工件的处理上具有独特的优势,能够克服制造工艺上的难题。

国内外众多学者对于激光表面改性技术展开了大量研究^[6-7]。将激光表面改性技术应用于TiO₂薄膜材料改性的关键在于研究激光辐照于

TiO₂薄膜材料上的热效应。尽管有限元热分析方法已经广泛应用于模拟激光与物质的相互作用^[8-12]。但针对TiO₂薄膜材料的研究不足,且对于激光辐照TiO₂薄膜材料的实验研究鲜有报道。本文利用有限元分析方法与实验研究相结合,研究了激光辐照TiO₂薄膜的瞬态热量传导规律并定量分析了激光功率、光斑半径和辐照时间对于材料上表面温度分布的影响。通过实验与仿真相结合得出连续激光辐照TiO₂薄膜的最佳功率和辐照时间。

2 基本原理与实验方法

2.1 基本原理

本文采用有限元分析方法对连续激光垂直辐照于TiO₂薄膜粗糙表面的三维固体传热效应进行了研究。通过求解热传导方程得出激光作用前后试样随时间的温度分布规律,分别讨论了激光功率、辐照时间、光斑半径对TiO₂薄膜热传导的影响。

当激光辐照TiO₂时,TiO₂表面吸收激光能量并转化为热量,当材料是各向同性的均匀介质时,考虑入射激光具有高斯分布的特性,在直角坐标系中,热传导方程^[11,13-14]和高斯激光脉冲理论模型^[15]为:

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

$$q(x, y, z) = \alpha(1 - R)I_0 \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2a^2}\right) \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2a^2}\right) \exp(-\alpha z), \quad (2)$$

$$f(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \tau \\ 0, & \tau \leq t < \infty \end{cases}, \quad (3)$$

$$Q(x, y, z, t) = q(x, y, z) * f(t). \quad (4)$$

综上,考虑上表面与外界的对流和热辐射可得激光辐照在材料表面的热传导方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(1 - R)f(t)I_0 \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2a^2}\right) \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2a^2}\right) \exp(-\alpha z) + \nabla(k \nabla T) - h(T - T_0) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4), \quad (5)$$

通过求解以上方程 $T(x, y, z)$, 就可以得到激光辐照于材料表面的温度场分布。上式中, α 为材料对激光的吸收系数, R 为材料的表面反射率, I_0 为激光的中心功率密度, a 为光斑半径, $q(x, y, z)$ 为激光光强的空间分布函数。 $f(t)$ 为激光的

时间分布函数, τ 为激光持续时间。

初始条件为:

$$T|_{t=0} = T_0 = 293.15 \text{ K}, \quad (6)$$

几何模型各边界控制方程为:

$$\begin{cases} K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=d} = Q(x, y, z, t) + h[T' - T(r, 0, t)] + \varepsilon\sigma[T^4 - T'^4(r, 0, t)] \\ K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = h[T' - T(r, 0, t)] + \varepsilon\sigma(T^4 - T'^2(r, 0, t)) \\ K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0 \\ K \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, K \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=l} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

上式中, h 为材料的对流换热系数, ε 为材料的表面辐射率, σ 为斯特潘常量。根据试样表面实际粗糙度 (19.326 6), 采用 MATLAB 软件构建了一个三维随机粗糙表面, 经参数化后将其作为该模

型的上表面 (18.635 9)。图 1、图 2 分别给出了 MATLAB 构建的粗糙上表面面型及参数化后的几何模型。在仿真中激光参数和材料特性参数的设置与实验中测量的数据保持一致, 表 1 中给出了计算过程中所用的相关特性参数。

3D Gaussian Rough Surface

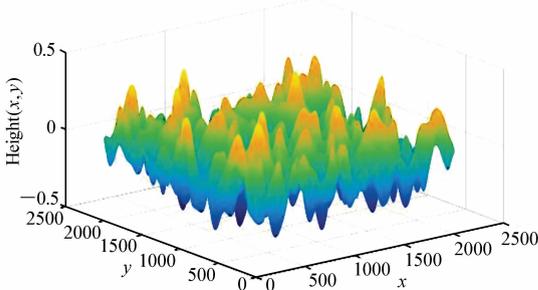


图 1 MATLAB 构建的随机粗糙面型

Fig. 1 Random rough face constructed by MATLAB

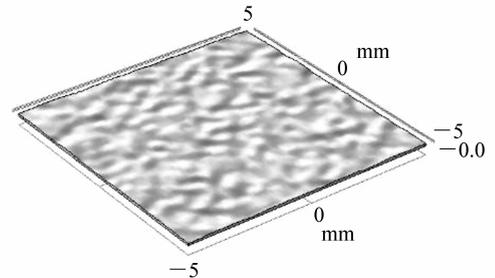


图 2 几何模型

Fig. 2 Geometric model

表1 特性参数

Tab.1 Characteristic parameters

Parameters	Abbr.	Unit	Value
Constant pressure heat capacity	<i>C</i>	$J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$	710
Thickness	<i>d</i>	mm	0.1
Length	<i>l</i>	mm	3.35
Laser radius	<i>a</i>	mm	3
Thermal conductivity	<i>k</i>	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	8.4
Absorption coefficient	α	m^{-1}	1 800
Scattering coefficient	σ_s	m^{-1}	2.647
Density	ρ	$kg \cdot m^{-3}$	3 313
Thermal radiation rate	ε	1	0.1
Surface heat transfer coefficient	<i>h</i>	$W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	156

2.2 实验方法

连续激光辐照 TiO₂ 薄膜材料的验证实验在以 CO₂ 激光器 (CD1000, 南京来创激光科技有限公司) 为主要器件构建的光路中进行, 其中激光器的出射波长为 10.6 μm、激光输出功率为 0~30 W 可调, 激光辐照时间可通过脚踏开关控制, 激光功率通过激光功率计测量 (VPL-2000-30W, 北京研邦科技有限公司)。实验采用的 TiO₂ 薄膜是粒径为 20 nm 的 TiO₂ 浆料通过丝网印刷机涂覆于

K9 玻璃基底上, 静置 10 min 后在 100 °C 下烘干 2 h 得到。实验中针对不同的激光功率和不同的激光辐照时间做了多组重复实验, 分析了 TiO₂ 薄膜在激光辐照前后的表面形貌和晶相的变化。

3 结果与讨论

3.1 仿真结果与讨论

首先根据上述模型计算了 TiO₂ 薄膜在功率

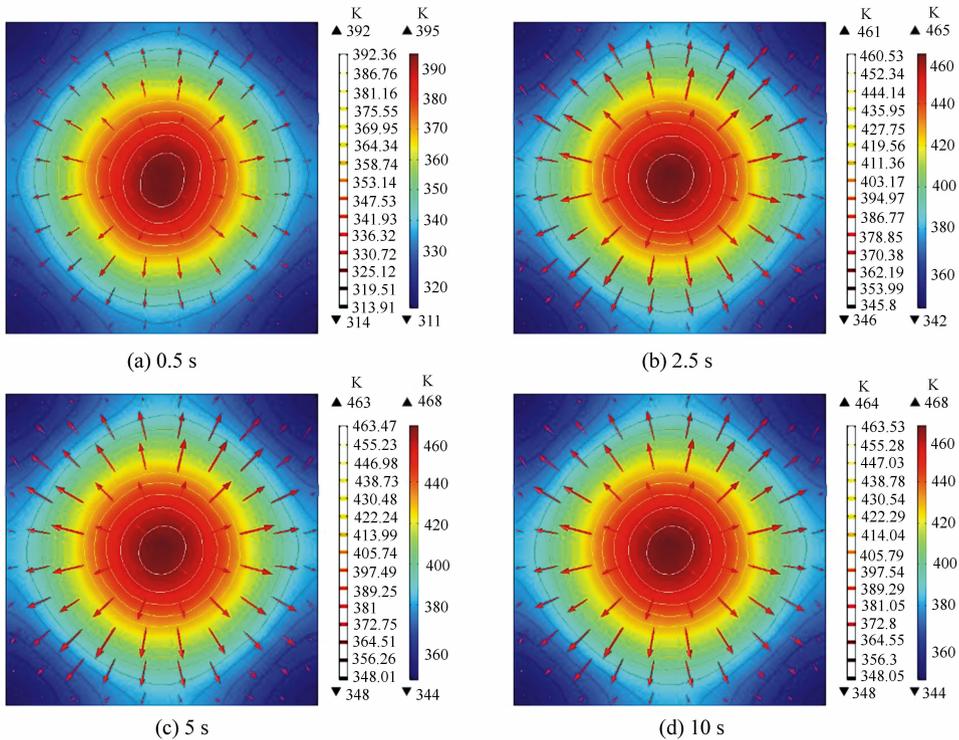


图3 0.5、2.5、5、10 s 时的上表面等温线及热量传导方向示意图

Fig.3 Schematic diagram of isotherm and heat conduction direction on the upper surface at 0.5, 2.5, 5 and 10 s

为 9 W、半径为 3 mm 的连续激光下辐照 10 s 的温度场分布。图 3 中给出了第 0.5、2.5、5、10 s 时薄膜表面的温度场分布,激光作用下 TiO₂ 薄膜上表面温度整体表现为从光斑中心沿半径方向递减。在激光束作用下光斑中心处温度最高;越靠近激光束的边缘,TiO₂ 薄膜的温度越低。激光束作用范围之外的区域,也会由于热传导的存在发生温度变化。且入射光中心沿半径方向的温度梯度先增大后减小。

第 0.5、2.5、5、10 s 时 TiO₂ 薄膜上表面温度最大值分别为 395、465、468、468 K。在连续激光持续作用下,TiO₂ 薄膜上表面温度逐渐增加最终趋于稳定,此时上表面的热量交换达到平衡状态,热量持续传导但温度不发生变化。

针对不同激光功率对 TiO₂ 材料表面温度的影响。图 4 中给出了 TiO₂ 薄膜在功率分别为 3、6、9、12、15、18 W 时光斑半径为 3 mm 的激光下辐照 10 s、20 s 内材料上表面平均温度-时间变化曲线。可见,随着激光功率的增大,材料表面升温速率变快,所能达到的最高温度也随之增加。为进一步研究薄膜上表面最大平均温度与激光功率之间的关系,取激光辐照时间为 10 s、激光功率为 3~20 W 以 1 W 为研究步长作参数化扫描,并对计算结果进行线性拟合,得出上表面最大平均温度与激光功率存在如下关系:

$$T = 11.661P + 293.584, \quad (8)$$

其中, T 为上表面最大平均温度, P 为激光功率。

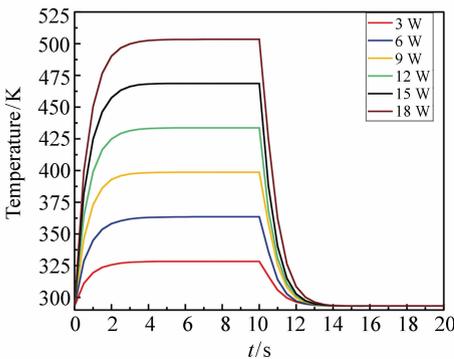


图 4 不同激光功率下上表面平均温度-时间曲线

Fig. 4 Average temperature-time curves of upper surface under different laser powers

拟合曲线在图 5 中给出。由图 5 可见,激光功率为 20 W 时上表面最大平均温度为 530 K 左右,并未达到 TiO₂ 材料的熔点(883.15 K),可知激光功率不大于 20 W 时每提高 1 W,材料上表面最大平均温度将升高 11.661 K。

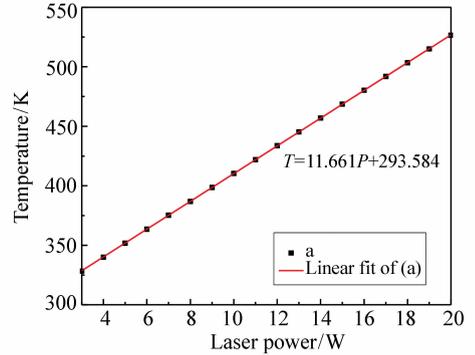


图 5 激光功率与上表面最大平均温度的线性拟合

Fig. 5 Linear fitting of laser power and maximum mean temperature on the upper surface

当激光辐照结束时,不同激光功率下 TiO₂ 薄膜材料上表面中心线上的瞬态温度分布在图 6 中给出,研究中光斑半径为 3 mm,激光功率分别为 3、6、9、12、15、18 W。横坐标原点位置为上表面中心点。由图 6 可知,随着激光功率的增加,材料表面温度升高。不同激光功率辐照下薄膜上表面中心温度由低到高依次为 351、409、467、525、582、640 K。对 6 条散点曲线进行高斯函数拟合分别得出函数表达式及相关性系数并在表 2 中给

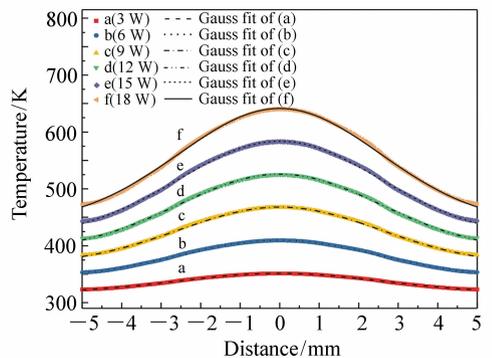


图 6 不同激光功率下上表面中心线上温度分布曲线

Fig. 6 Temperature distribution curves of upper surface centerline under different laser powers

出。图6中6条拟合曲线的相关性系数都大于0.999。激光光强的高斯分布及热传导速率在薄

膜材料内的各向同性导致瞬态温度在中心线上呈高斯分布。

表2 高斯函数拟合公式及相关系数拟合参数

Tab.2 Gauss functions and their fitting parameters

Laser power/W		Equation	R ²
a	3	$y = 317.5087 + 34.03 * \exp\{-2 * [(x + 1.9595e - 4)/5.0947]^2\}$	0.999 1
b	6	$y = 341.8283 + 68.0073 * \exp\{-2 * [(x + 1.9607e - 4)/5.0956]^2\}$	0.999 1
c	9	$y = 366.8283 + 101.9044 * \exp\{-2 * [(x + 1.9626e - 4)/5.0969]^2\}$	0.999 1
d	12	$y = 390.3105 + 135.7004 * \exp\{-2 * [(x + 1.9633e - 4)/5.0986]^2\}$	0.999 1
e	15	$y = 414.45 + 169.3716 * \exp\{-2 * [(x + 1.9626e - 4)/5.1007]^2\}$	0.999 1
f	18	$y = 438.5033 + 202.8924 * \exp\{-2 * [(x + 1.9634e - 4)/5.1032]^2\}$	0.999 1

激光半径也是影响薄膜材料温度场分布的重要因素。本文还研究了 TiO₂薄膜在功率为 9 W, 光斑半径分别为 1、2、3、4 mm 的激光下辐照 10 s 时,薄膜上表面平均温度随时间的变化情况并在图7中给出。可见,几种光斑半径下,上表面最大平均温度分别为 422、419、398、373 K。即激光光斑越小,薄膜材料表面在激光结束时刻的平均温

度越高,这是由于激光功率一定时,激光光斑越小其功率密度越大,光斑中心区域能量越高。且光斑半径越小即辐照过程中与外界热交换面积越小,热量损失越低。采用 ExpAssoc 和 Allometrical 函数拟合了薄膜上表面最大平均温度与激光光斑半径之间的关系,并在图8中给出,两种函数公式及相应的拟合参数见表3。由表3知 ExpAssoc 函数具有更高的相关性系数。

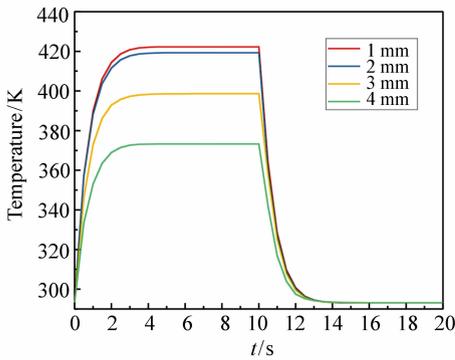


图7 不同激光光斑半径下上表面平均温度-时间曲线

Fig.7 Average temperature-time curves of upper surface under different laser radius

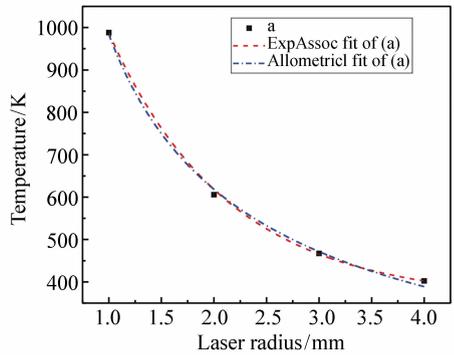


图8 激光功率与上表面最大平均温度的线性拟合
Fig.8 Linear fitting of laser power and maximum mean temperature on the upper surface

表3 ExpAssoc 函数及 Allometrical 函数形式及相应拟合参数

Tab.3 ExpAssoc function, Allometrical function and their fitting parameters

Function name	Equation	R ²
ExpAssoc	$y = 188.785 5 - 1 525.934 4 * [1 - \exp(-x/1.130 9)]$	0.999 3
Allometrical	$y = 983.785 4 * x^{(-669 9)}$	0.997 3

激光辐照结束时刻,不同激光光斑半径下

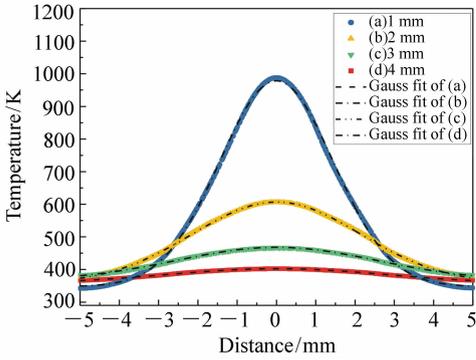


图 9 不同光斑半径下上表面中心线温度分布曲线

Fig.9 Temperature distribution curves of upper surface centerline under different laser radius

TiO₂薄膜材料上表面中心线上的瞬态温度分布曲线在图 9 中给出。可见,随着激光光斑半径的增加,材料上表面中心点温度升高。不同激光光斑半径所得的薄膜上表面中心温度依次为 988、605、467、402 K。同时对 4 条散点曲线进行高斯函数拟合分别得出函数表达式及相关性系数并在表 4 中给出。图 9 中所有曲线的相关性系数都大于 0.999。同理可知,瞬态温度在中心线上呈高斯分布。激光光斑半径为 1 mm 时,薄膜上表面中心温度高达 988 K,高于 TiO₂ 材料的相变温度 (883.15 K),高温下可能会产生部分金红石晶型 TiO₂。此时,锐钛矿 TiO₂ 的热物性参数不再适用于该薄膜材料。

表 4 拟合参数

Tab.4 Fitting parameters

Lasers radius/mm	Equation	R ²
a	$y = 356.5106 + 45.9932 * \exp\{-2 * [(x - 7.6126e - 4)/5.5986]^2\}$	0.999 1
b	$y = 347.7367 + 630.6741 * \exp\{-2 * [(x + 5.7232e - 5)/2.8963]^2\}$	0.999 2
c	$y = 356.8013 + 249.8764 * \exp\{-2 * [(x + 0.0013)/4.2904]^2\}$	0.999 4
d	$y = 366.0817 + 101.9233 * \exp\{-2 * [(x + 2.1173e - 4)/5.0977]^2\}$	0.999 1

3.2 实验结果与讨论

图 10 为未处理的 TiO₂ 薄膜的显微照片,可见其表面呈淡黄色且存在较多孔隙,较为粗糙。图 11 为未处理的 TiO₂ 薄膜 X 射线衍射图谱,下方曲线为锐钛矿 TiO₂ 的标准图谱 (21-1272)。通过对比分析可知实验中采用的 TiO₂ 浆料经烧结后主要晶相为锐钛矿相。



图 10 TiO₂ 薄膜显微图

Fig.10 Micrograph of TiO₂ film

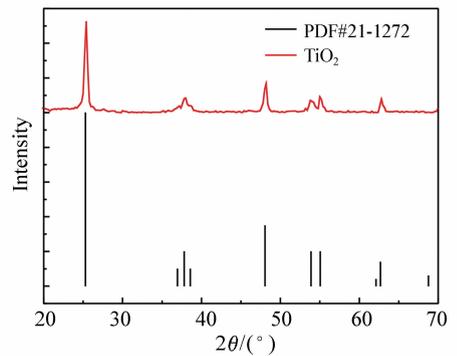


图 11 TiO₂ 薄膜 X 射线衍射图谱

Fig.11 X-ray diffraction patterns of TiO₂ film

时间是影响 TiO₂ 薄膜处理效果的主要影响因素。本文首先采用功率分别为 5.4、6、6.6 W 的激光 ($t = 10$ s, $r = 3$ mm) 对同批次 TiO₂ 薄膜进行了实验。其样品表面显微图在图 12 中给出。可见,激光辐照后 TiO₂ 薄膜表面颜色发生变化,辐照中心颜色变深,远离辐照中心颜色逐渐变淡;激光能量的高斯分布导致热处理效果呈现不均匀性,即温

根据前文仿真实验结果可知激光功率、辐照

度越高的部分颜色变化越明显;激光辐照区域内结构细化,表面粗糙度降低。图12(c)中激光辐照的中心区域开始变透明,这是由于激光功率较大,激光辐照的中心区域温度较高,浆料中部分成分达到沸点发生汽化,导致TiO₂含量降低。

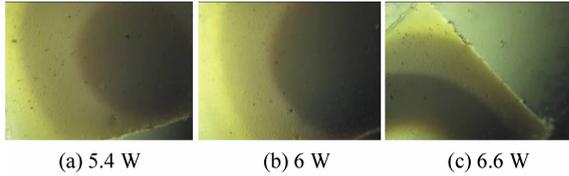


图12 不同激光功率下的样品表面显微图

Fig. 12 Micrographs of sample surface under different laser powers

3组试样分别对应的XRD图谱在图13中给出。激光($t = 10\text{ s}$, $r = 3\text{ mm}$)辐照前后TiO₂的晶相都为锐钛矿相。结合仿真结果可知,TiO₂薄膜在6.6 W的激光下辐照10 s时,中心位置所能达到的最高温度必然在409 K到467 K之间,远低于其开始发生相变的最低温度(883.15 K)。激光功率为6 W时的X射线衍射图谱的效果最好,特征峰明显且噪声干扰小。其余两种功率处理下的样品只有主峰较为明显,但峰的强度较小,其余峰不明显,噪声影响较大。

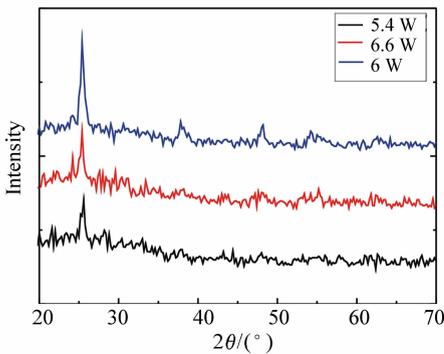


图13 不同激光功率下样品的X射线衍射图谱

Fig. 13 X-ray diffraction spectra of sample with different laser powers

本文还研究了不同激光($P = 6\text{ W}$, $r = 3\text{ mm}$)辐照时间对薄膜的影响,采用功率为6 W的激光对TiO₂薄膜分别辐照8、10、12 s。处理后的样品显微图在图14中给出。由图14可见,随着激光辐照时间的增加,深色区域面积逐渐增大,材料表

面粗糙度降低,且激光辐照的区域较为光滑。图14(c)中激光辐照中心区域的薄膜发生了形变,这是由于样品表面的光热累积效应所导致的。图15给出了相应样品的X射线衍射图,可见,经过激光($P = 6\text{ W}$, $r = 3\text{ mm}$)处理后TiO₂材料的晶相并没有发生变化。只是衍射峰的强度有所差别,辐照时间为10 s时衍射峰强度最大。

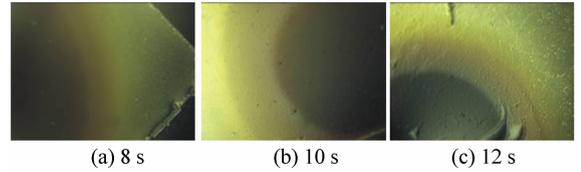


图14 不同辐照时间下样品表面显微图

Fig. 14 Micrographs of sample surface under different irradiation times

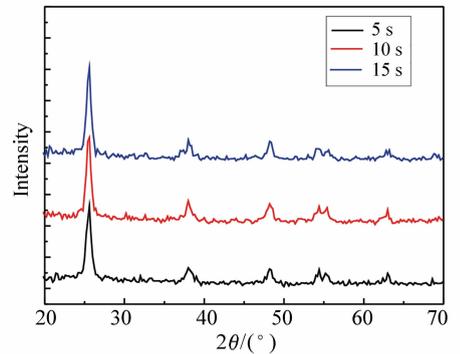


图15 不同激光辐照时间下样品的X射线衍射图谱

Fig. 15 X-ray diffraction spectra of sample under different laser irradiation times

结合仿真与实验结果可知采用激光功率为6 W,半径为3 mm,激光辐照TiO₂薄膜10 s时将取得最优处理效果。

4 结 论

本文针对连续激光辐照在TiO₂薄膜表面的热效应进行了理论和实验研究。仿真表明,激光辐照下TiO₂薄膜的温度场分布呈高斯分布且与激光功率、光斑半径、辐照时间等因素有关。当薄膜表面最大温度未达到分解温度时,薄膜上表面最大平均温度与激光功率满足线性关系,与光斑半径满足ExpAssoc非线性关系。实验结果表明,

激光辐照使得薄膜材料表面发生颜色变化、粗糙度降低。激光($P \leq 6.6 \text{ W}$, $t \leq 12 \text{ s}$, $r = 3 \text{ mm}$)辐照前后 TiO_2 的晶相不变(锐钛矿相)。当激光功率和辐照时间处于一个最优值的时候,能得到较好的处理效果。激光功率过大或过小会导致薄膜材料发生汽化或辐照效果较弱。而在材料热力学性质的影响下,激光的辐照时间也会导致辐照效果不同,当辐照时间超过薄膜的热形变阈值,薄膜表

面会发生不同程度的形变。

仿真模型为实验参数的选取提供了有力参考,且对于实验结果的分析提供了理论支持。结合仿真和实验可知使用功率为 6 W , 半径为 3 mm 的连续激光辐照 TiO_2 薄膜 10 s 时将取得最优处理效果。本文为进一步研究激光对于 TiO_2 薄膜材料改性奠定了理论依据和实验基础。

参考文献:

- [1] GARESO P L, SAMPE N, PALENTEK V, *et al.*. Influence of annealing on Fe-doped TiO_2 powders using co-precipitation technique[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1801(1): 020002.
- [2] SPINELLI P, MACCO B, VERSCHUUREN M A, *et al.*. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ nano-pattern antireflection coating with ultralow surface recombination[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(23): 233902.
- [3] CHOU J C, YANG H Y, CHEN CH W. Glucose biosensor of ruthenium-doped TiO_2 sensing electrode by co-sputtering system[J]. *Microelectronics Reliability*, 2010, 50(5): 753-756.
- [4] MIRGHANI M, AL-MUBAIYEDH U A, NASSER M S, *et al.*. Experimental study and modeling of photocatalytic reduction of Pb^{2+} by WO_3/TiO_2 nanoparticles[J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 141: 285-293.
- [5] YAMAMOTO A, MIZUNO Y, TERAMURA K, *et al.*. Visible-light-assisted selective catalytic reduction of NO with NH_3 on porphyrin derivative-modified TiO_2 photocatalysts[J]. *Catalysis Science & Technology*, 2015, 5(1): 556-561.
- [6] HÜHM S, ROSENFELD A, KRÜGER J, *et al.*. Laser-induced periodic surface structures on zinc oxide crystals upon two-colour femtosecond double-pulse irradiation[J]. *Physica Scripta*, 2017, 92(3): 034003.
- [7] 袁志刚, 李亚国, 陈贤华, 等. 光学元件改性处理对激光损伤阈值的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 2956-2961.
YUAN ZH G, LI Y G, CHEN X H, *et al.*. Effect of chemical modification technology laser damage threshold of fused silica optical elements[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12): 2956-2961. (in Chinese)
- [8] TRTICA M S, GAKOVIC B M, RADAK B B, *et al.*. Material surface modification by ns, ps and fs laser pulses[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 221-227.
- [9] 周海娇, 孙文军, 刘中洋. 脉冲激光辐照 GaAs 材料热效应研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(11): 21-25.
ZHOU H J, SUN W J, LIU ZH Y, *et al.*. Research of nonlinear absorption effect of pulse laser irradiation for GaAs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 43(11): 21-25. (in Chinese)
- [10] 王伟树. 毫秒激光辐照半导体材料的热力效应数值模拟[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
WANG W SH. Numerical simulation of thermal-mechanical effects during millisecond laser irradiate semiconductor materials[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese).
- [11] SAID-BACAR Z, LEROY Y, ANTONI F, *et al.*. Modeling of CW laser diode irradiation of amorphous silicon films[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(12): 5127-5131.
- [12] 张宏伟, 任妮, 薛红涛, 等. 聚酰亚胺基底金属薄膜激光刻蚀温度场分布[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 94-101.
ZHANG H W, REN N, XUE H T, *et al.*. Temperature distribution for laser etching of metal thin films on polyimide substrate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 94-101. (in Chinese)
- [13] 周维军, 袁永华, 桂元珍, 等. 脉冲激光辐照 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜热效应研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(1): 23-26.
ZHOU W J, YUAN Y H, GUI Y ZH, *et al.*. Thermal effect of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ film irradiated by pulse laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(1): 23-26. (in Chinese)
- [14] 宋宏伟, 黄晨光. 激光辐照诱导的热与力学效应[J]. *力学进展*, 2016, 46(1): 201610.
SONG H W, HUANG CH G. Progress in thermal-mechanical effects induced by laser[J]. *Advances in Mechanics*, 2016,

46(1):201610. (in Chinese)

- [15] HOSSAIN M M, CHOWDHURY M H. Heat transfer simulations for pulsed laser annealing of silicon thin film[C]. Proceedings of IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems, IEEE, 2013:732-735.

作者简介:



李代林(1973—),男,山东青岛人,副教授,2004年于上海光学精密机械研究所获得光学工程博士学位,现为中国石油大学(华东)理学院副教授,主要从事偏振光相关方面的研究。E-mail: qd_ldl@upc.edu.cn

《发光学报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org