

激光辐射致热单层薄膜温度响应

汤雪飞 范正修 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

用热传导方程计算了在脉宽 10 ns、波长 1.06 μm 的激光辐射下, TiO_2 单层膜的温度场分布。结果表明: 膜层的热参数增大, 其峰值温度明显降低, 而基板热参数变化对膜层温度响应影响很小, 温度场分布由电场分布决定, 1/4 波长薄膜的峰值温度低于半波长薄膜的峰值温度。

关键词 温度场分布, 光学薄膜, 热学参数。

1 引 言

抗激光损伤阈值是高功率激光装置中薄膜元件的一个重要参数。激光辐射下光学薄膜的损伤是由于吸收辐射能量, 薄膜加热、薄膜/基板系统的热力学响应三个因素而引起的^[1]。薄膜的温度场分布是薄膜加热过程和热学响应的重要反映。薄膜吸收能量, 膜层温度升高。在强激光作用下, 这一结果会导致薄膜破坏。考察薄膜的温度响应有助于认识薄膜在强激光辐射下的热过程和损伤机理。

薄膜的光致热效应除了与辐射光的参数有关, 还同膜层的光学和热学性质密切关联。薄膜的制备手段决定了其光学和热学性质与块状材料有较大的区别。就热导率而言, 薄膜的热导率要比相应的块状材料低几个数量级, 主要由不同制备条件下薄膜的结构决定^[2]。因此在同样的光辐射下, 薄膜的热效应会有较大的差异。

本文应用含热源的热传导过程^[3], 建立了多层膜系的温度场分布数值计算程序。通过计算在脉宽 10 ns, 波长 1.06 μm 的激光脉冲辐射下热蒸发沉积和离子束溅射沉积下 O_2 单层膜的温度场分布, 考察了不同的薄膜和基板的热参数(热容、热导率)及电场分布对薄膜光致热效应的影响。

2 计算模型

从 $t=0$ 时刻开始, 中心对称的高斯光束垂直入射于一多层膜上, 如图 1 所示。图中 z 轴垂直于薄膜表面, r 轴平行于薄膜表面, 原点 O 位于薄膜表面入射光束中心处。膜系结构参数为: 膜厚 d_0 , 折射率 n_0 , 消光系数 k_0 , 层数为 N , 为方便计算, 基板作为第 $N+1$ 层。入射光强分布为

$$I(r, t) = [P_0(t)/(\pi r_0^2)] \exp[-(r/r_0)^2]. \quad (1)$$

式中 r_0 为入射光的高斯半径, $P_0(t)$ 为激光输出功率的时间分布.

用麦克斯韦方程可求出在单位光强的入射光辐射下膜层和基板内电场和磁场分布

$$E_i(z), H_i(z), 1 \leq i \leq N+1$$

E 和 H 确定之后, 应用坡印廷矢量可计算出单位时间内通过垂直于 z 轴平面单位面积内的平均能量为

$$Y(z) = \text{Re}[E(z)H^*(z)/2]. \quad (2)$$

这样, 在(1)式确定的激光辐射下, 膜系中任一点单位时间和单位体积内吸收的能量 $g(r, z, t)$ 可由下式求出

$$g(r, z, t) = \frac{d[I(r, t)Y(z)]}{ds dr dz}. \quad (3)$$

假定薄膜表面因热对流散失的热量与表面高出环境的温度成正比, 并用 $T(r, z, t)$ 代表高于环境的温度值, 可以得到下面的热传导方程^[4]

$$C_i(\partial/\partial t)T(r, z, t) - k_i \nabla^2 T(r, z, t) = g(r, z, t), \quad (4)$$

$$(\partial/\partial z)T(r, z, t) = jT(r, z=0, t), \quad (5)$$

$$T(r, z=\infty, t) = T(r=\infty, z, t) = 0, \quad (6)$$

$$T(r, z, t=0) = T_0(r, z). \quad (7)$$

在式(4)~(7)中, C_i 和 k_i 分别是第 i 层膜的热容和热导率, j 是控制热量从表面流失的常数; $T_0(r, z)$ 是初始的温度分布. 用数值计算中交替方向隐式原理可以求解方程式(4)~(5)^[5], 从而得出膜系在空间和时间上的温度场分布.

3 计算参数和计算结果

3.1 计算参数

考察在同一激光脉冲作用下, 薄膜的热容、热导率, 基板的热容, 热导率、薄膜表面的热流速率 j , 以及薄膜内部电场分布对薄膜温度场分布的影响.

根据测量薄膜激光损伤值的条件, 激光脉宽为 10 ns, 波长为 1.06 μm , 高斯半径为 20 μm , 能量密度为 20 J/cm², 这时脉冲功率波形如图 2 所示. TiO_2 单层膜和基板的光学常数和热参数见表 1^[2,6,7]. 为便于比较, 把不同薄膜和基板的光学常数取同一值, 不考虑基板的吸收. 为了考察薄膜表面热流速度的影响, 分别取 $j=0$ 和 $j=1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$. 薄膜光学厚度分别取 $\frac{1}{2}$ 波长和 $\frac{1}{4}$ 波长值.

3.2 计算结果

在强激光辐射下, 由于膜层吸收激光能量而导致升温, 当峰值温度超过某一数值(例如超过薄膜材料的熔点时)就会导致薄膜破坏. 如在图 2 所示功率分布的激光脉冲辐射下, 当 $t=10 \text{ ns}$ 时, 峰值温度达到最大值. 下面讨论 $t=10 \text{ ns}$ 时, 在不同条件下薄膜的温度场分布.

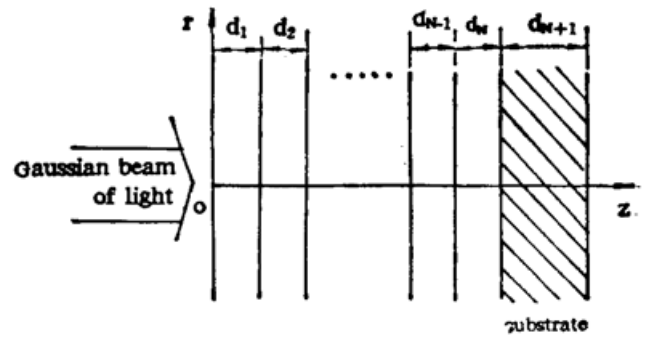


Fig. 1 Structure of a multilayer system

Table 1 Optical and thermal parameters

Layer	Thickness d (nm)	Refractive index n	Specific heat C (J/cm ³ ·°C)	Heat conductivity K (J/cm·°C·s)	
Bulk material	240		3.54	0.097	[6]
evaporated	or	$2.21 \sim 1.4 \times 10^{-3}i$	3.0	1.8×10^{-4}	[2]
Ion Beam sputtered	120		3.54	1.6×10^{-8}	[2]
Substrate 1	∞	1.52	2.0	0.014	[7]
Substrate 2	∞		3.0	0.07	[7]

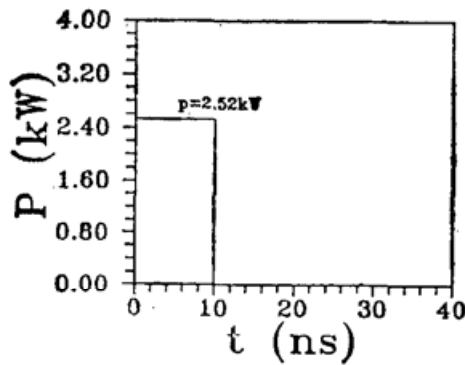
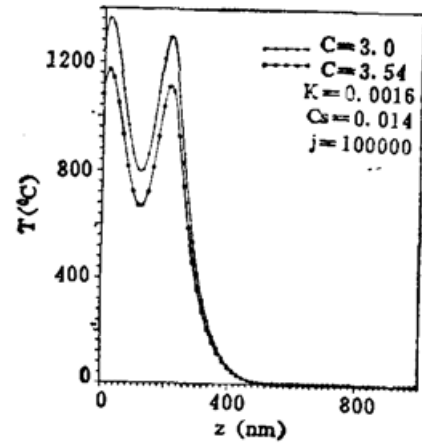
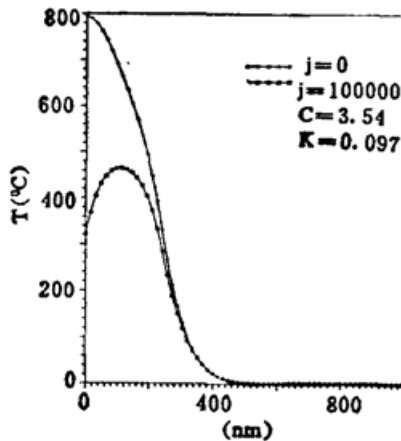
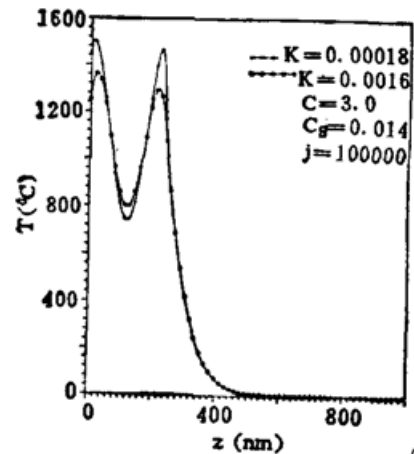


Fig. 2 10 ns pulse with peak power of 2.52 kW and total energy of 0.252 mJ

Fig. 3 Temperature distribution with different specific heat ($t=10$ ns)Fig. 4 Temperature distribution with thermal parameters of bulk material ($t=10$ ns)Fig. 5 Temperature distribution with different thermal conductivity ($t=10$ ns)

3.2.1 薄膜热参数对温度场分布的影响

薄膜的制备方法与制备条件对薄膜热参数有很大影响,不同方法制备的薄膜热导率可能会有数量的差异.薄膜与块状材料的热导率差别更大.因此要考察不同薄膜的热参数对温度场分布的影响.

图3所示为 $K=0.0016$, C 分别取 3.0 和 3.54 时,膜厚为 240 nm ($\frac{1}{2}$ 波长光学厚度) 的 TiO_2 单层膜的温度场分布图.比较图中 $C=3.54$ 与 $C=3.0$ 两种情况,可以看出温度响应

成比例地下降,这是由于在同一能量淀积下温度升高与热容成反比.对于热蒸发薄膜其填充密度较块状材料低,其值为 0.85,因此热容要较块状材料低($C=3.0$),而离子束溅射薄膜的填充密度已接近块状材料,热容也接近于块状材料($C=3.54$),因此在其它条件同等的情况下,离子束溅射沉积薄膜的温升要比热蒸发薄膜低.

图 4、图 5 分别是 $K=0.097$, $K=0.0016$ 和 $K=0.00018$ 时薄膜的温度分布 ($t=10\text{ ns}$),膜厚为 240 nm.从图中可以看出, $K=1.8\times 10^{-4}$ 时,薄膜的表面和界面附近温度最高,出现峰值,膜层中央温度最低,这是由 $\frac{1}{2}$ 波长光学厚度膜层的电场分布决定的(见图 8).因为电场强的地方,能量淀积也多,导致温度上升幅度大,同时由于膜层热导率很小,温度扩散慢,这时温度分布基本上反映了电场分布. $K=0.0016$ 时薄膜表面和界面附近的峰值温度降低了 $150^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$,而且可以观察到峰值位置向中央移动,而薄膜中央的温度则上升了 40°C 左右.这是因为热导率增大,加速了热量的扩散.在同样的时间里,热量从温度高的膜层表面和界面附近向温度低的环境、基板及膜层中央的扩散增加.当 $K=0.097$ 时,由于在这么大的热导率下,热导迅速通过表面和界面散发,表面和界面附近的温度急剧降低,使就膜层中央出现温度峰值,这时的最高温度只有 460°C ,远远低于前面的结果.

综上所述,膜层热参数不同会使膜层的温度分布发生变化,提高膜层的热容和热导率,将有效地降低薄膜的峰值温度,在热破坏占主要地位的激光损伤情况下,这将有助于提高薄膜的抗激光损伤阈值.

3.2.2 薄膜表面热流速率对薄膜温度场分布的影响

图 4 和图 6 中有热流速率 j 取零的温度分布曲线,与 $j=10^5$ 时的温度分布曲线比较后发现, j 值只有当 K 值很大,如 $K=0.097$ 时,才对薄膜的温度分布有较大的影响.当 $K=0.0016$ 和 $K=0.00018$ 时,仅使薄膜表面温度有所降低,这是热导率小的情况下热量扩散速度慢的缘故.

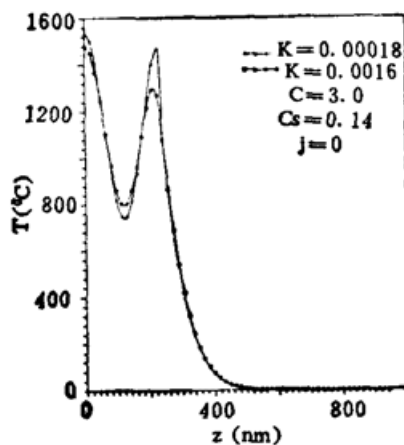


Fig. 6 Temperature distribution when $j=0$ ($t=10\text{ ns}$)

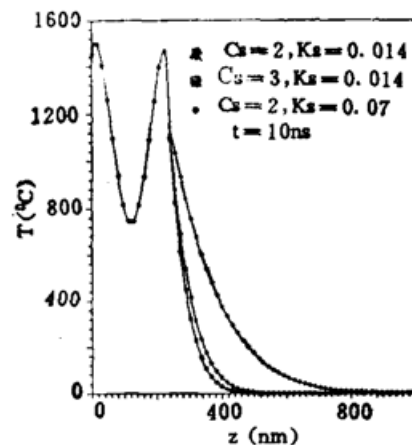


Fig. 7 Effects of substrate thermal parameters on temperature distribution of coating

3.2.3 基板热参数对薄膜温度场分布的影响

图 7 表示在不同基板热参数下薄膜的温度分布.薄膜的热容 $C=3.0$,热导率 $K=0.00018$,膜厚 $d=240\text{ nm}$.结果表明,不论是增加基板的热容还是提高基板的热导率,都

对薄膜的温度分布影响甚微。这是因为薄膜的热导率太小,热量向膜层外扩散的速度远小于热量在基板内的扩散速度,因此提高基板的传热能力并不能影响膜层的温度场分布。

3.2.4 薄膜电场分布对温度场分布的影响

图 8 表示薄厚为 $1/4$ 波长光学厚度 ($d=120\text{ nm}$) 和 $1/2$ 波长光学厚度 ($d=240\text{ nm}$) 时,薄膜的电场分布和温度场分布曲线。从图上可看出,由于薄膜热导率很小,温度分布基本上反映了电场分布与电场强度的平方成正比关系。 $d=240\text{ nm}$ 时,温度分布在薄膜的表面和介面附近出现两个峰值, $d=120\text{ nm}$ 时,只在介面附近出现一个峰值,且峰值温度要低得多,与在相应位置上的电场强度的平方成正比。实验发现 $1/4$ 波长光学厚度的 TiO_2 薄膜比 $1/2$ 波长光学厚度的

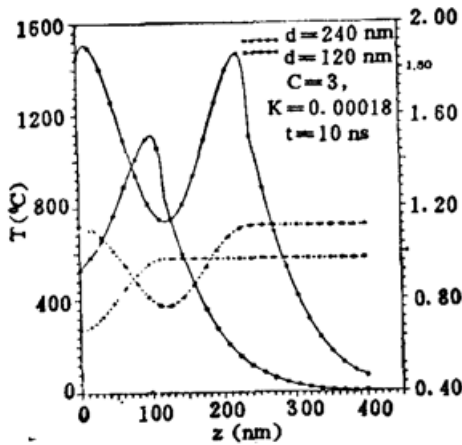


Fig. 8 Effects of electric field on temperature distribution

的抗激光损伤阈值高,这一实验结果在这里可以得到解释。

4 讨 论

由于薄膜的热导率比块状材料低几个量级,在短脉冲激光辐射下(几十纳秒以下),薄膜的温度场分布基本上反映了电场分布,温度响应与电场强度的平方成正比, $1/4$ 波长膜厚薄膜的峰值温度低于半波长膜厚薄膜的峰值温度。薄膜的热参数很大程度上影响了薄膜的温度响应,提高热容和热导率能降低薄膜的温度响应。基板的热参数变化对薄膜的温度场分布影响很小。

薄膜的温度响应有其自身的特点,在膜系设计中同时考虑优化薄膜的温度场分布,可以降低薄膜的温度响应,有助于提高薄膜的抗激光损伤阈值。

参 考 文 献

- [1] A. H. Guenther, J. K. McIver, Further studies on thermal aspects of inclusion-dominated process in laser-induced thin film damage, *Proc. SPIE*, 1990, **1270**: 66~71
- [2] D. L. Decker, Thermal properties of optical thin film materials. *Proc. SPIE*, 1990, **1323**: 244~247
- [3] Masud Mansuripur, G. A. Neville Connell, Joseph W. Goodman, Laser-induced local heating of multilayers. *Appl. Opt.*, 1982, **21** (6): 1106~1114
- [4] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*. London: Oxford U. P., 1954: 1~205
- [5] G. Birkhoff, R. S. Varga, D. Young, *Alternation Direction implicit methods*. New York: Academic, 1926: 1~117
- [6] Y. S. Touloukian, E. H. Buyco, *Thermal conductivity*. New York-Washington; ifi/Plenum, 1970: 93~246
- [7] Y. S. Touloukian, E. H. Buyco, *Specific heat*. New York-Washington: IFI/Plenum, 1970: 25~262

Temperature response of laser induced thin film heating

TANG XIUFEI FAN ZHENGXIU WANG ZEJIANG

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 8 November 1991; revised 3 March 1992)

Abstract

Temperature distribution of TiO_2 single layer irradiated by 10 ns, $1.06 \mu\text{m}$ wavelength laser pulse was calculated with thermal transfer equation. Following conclusions were obtained; to improve thermal parameters of coating can reduce the peak temperature obviously, the thermal parameters of substrate have little effect on temperature response of coating, temperature distribution of thin film depends on the electrical field distribution. The peak temperature of coating with a quarter-wavelength optical thickness is lower than that of coating with a half-wavelength optical thickness.

Key words Temperature distribution, thin film, thermal parameters.