

光学薄膜的温度场设计

范正修 汤雪飞

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 提出了光学薄膜温度场设计的概念, 研究分析了薄膜光学性质和热、物性质对其温度场的影响。给出了相变光盘薄膜和高功率激光反射膜的具体设计。还给出了相变膜的写入、擦除功率和激光反射膜的破坏阈值。

关键词 光学薄膜, 热传导, 温度场设计。

1 引 言

光学薄膜的温度场对于强激光薄膜和对以薄膜光热效应为应用背景的薄膜来说, 是非常重要的, 为了充分的利用和控制薄膜的光热性能, 本文提出了光学薄膜的温度场设计。

最初, 膜系设计主要是围绕薄膜的光学性质进行的。即选择或修正薄膜膜层的折射率和厚度使其满足确定的光谱要求^[1, 2]。随着激光等现代光学技术的发展, 不仅要求薄膜具有相应的光学性质更要求薄膜具有低的光损耗, 而薄膜的光损耗与薄膜材料及薄膜的驻波场结构有关。于是, 人们提出了光学薄膜的驻波场设计^[3, 4]。光学薄膜中驻波场的研究, 可以直观地解释薄膜内局部强损耗的特性。通过优化设计, 使得局部损耗降低到可以容许的范围。但是, 对高功率激光薄膜, 最终导致薄膜损伤或失效的是其局部温升。这就必须考虑薄膜内部的温度场分布。光学薄膜内的温度场分布, 是由以下三个相关联的过程形成的: 薄膜光吸收引起激光的能量沉积, 光能转化为热能引起温度升高, 热传导过程形成薄膜内的温度场。为了改进薄膜内的温度场, 改进薄膜的抗激光特性, 本文提出了光学薄膜温度场设计的新思想。

2 光学薄膜内的热过程分析

光学薄膜内的热过程对激光导致薄膜破坏是一个基本过程。薄膜中的体吸收, 缺陷吸收, 多光子吸收和其它非线性吸收, 都会在按一定规律分布的激光场作用下在吸收区内产生能量沉积, 并导致这些区域内温度急剧上升。与此同时, 由于热输运过程, 高温区向低温区传递热量使高温区温度降低。光学薄膜内的温度场分布正是能量沉积和热传导的发展平衡过程。

对于一个 m 层膜的多层膜系, 其内部任一层膜 i 内的电磁场可以由特征矩阵表示:

$$\begin{pmatrix} E_i \\ H_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_i \\ C_i \end{pmatrix} E_m, \quad \begin{pmatrix} B_i \\ C_i \end{pmatrix} = \prod_i \begin{pmatrix} \cos \delta_i & j \sin \delta_i / \eta_i \\ j \eta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ \eta_s \end{pmatrix}$$

式中 $\delta_i = (2\pi/\lambda) \hat{n}_i d_i \cos \theta_i$ 为第 i 层膜的相位厚度, η_i 为 i 层膜的有效导纳, η_0 为基体导纳, d_i 为第 i 层膜的厚度, $\hat{n}_i = n_i - jk_i$, n_i, k_i 分别为第 i 层膜的折射率和消光系数。在此截面上的坡印亭(Poynting)矢量。

$$P_i = I(r, t) R_n [E_i(z) \times H_i^*(z)/2]$$

式中 $I(r, t) = I_0(t)/(\pi r^2) \exp[-(r/r_0)^2]$ 表示激光束的能量分布, r_0 为高斯光束半径。在该截面附近区域激光束的能量沉积为:

$$g(r, z, t) = [dp_i(r, z, t)]/(d\tau, dr, dz)$$

很明显 g 既与在该区域的吸收特性有关, 也与薄膜内的驻波场结构有关。光学薄膜的热扩散过程, 遵循一般的热传导方程。对第 n 层膜

$$C_n \frac{\partial}{\partial t} T(r, z, t) - K_n \nabla^2 T(r, z, t) = g_0(r, z, t)$$

式中 C_n, K_n 分别为该膜层的热容量和热导率。假设从薄膜表面流失的热量正比于薄膜与环境的温差, 则有

$$T(r, z=0, t) = jT(r, z=0, t)$$

式中 j 为热流常数, 它与薄膜表面的热反射有关, 也与空间的热传导、热幅射以及热对流状况有关。该方程满足一般的边界条件和初始条件。

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

在薄膜膜层间的界面上一般满足温度场的连续性条件和能量守恒定律。

$$T_n(r, z=z_1, t) = T_{n+1}(r, z=z_1, t)$$

$$\frac{T_n - T_{n+1}}{R_n} = \frac{T_{n+1} - T_{n+2}}{R_{n+1}} = \dots$$

式中 R_n 为第 n 层膜的热阻, 定义为

$$R_n = \frac{T_n - T_{n+1}}{Q} = \frac{d_n}{K_n A}$$

式中 Q 为通过薄膜界面的热流密度, 对于膜层的各个界面, 它是不变的。 A 为薄膜的表面积。

在已知光学薄膜的光学常数, 热力学常数和膜系结构以及激光的功率密度, 脉冲结构和空间分布的条件下, 通过对以上方程求解, 就可以得到光学薄膜的温度场分布。

值得注意的是, 相对于晶体和其它凝聚态材料, 薄膜的状态是比较复杂的。首先, 它的结构是不完整的, 包含了多种多样的孔隙和缺陷。其次薄膜具有若干界面和表面。而界面状况相对于薄膜来说更为复杂。这种状况不论对薄膜的光学参数, 还是热力学参数都有很大影响。特别对其热传导特性影响更大。对于一般介质膜来说, 热传导是靠声子运动实现的。热传导系数由下式给出^[5]:

$$K = (1/3) C_p V L$$

式中 C_p 为材料的热容量, V 为声子速率, L 为声子在材料中的平均自由程。鉴于薄膜结构特性, 其 L 比大块材料低很多。所以薄膜的热传导系数大大低于块状材料, 这一点近几年来已被许多实验所证实。对于多层膜来说, 由于膜层很薄, 膜层之间的界面, 形成了附加的热阻层, 进一步影响了薄膜的热传导性质。对薄膜热传导性质进行实际测量确定, 薄膜的热传导系数一般比大块材料低 2~3 个量级。不同工艺制备的同一种薄膜, 热传导系数也可能有数量级的变化。由于薄膜结构中的缺陷和孔隙的分布和形状往往是无规则的, 因此导致薄膜的光热性质有很多不确定性。在研究过程中, 应把理论分析和实验研究密切结合起来。才能较

好的把握实际薄膜的特性。

3 光学薄膜的温度场与薄膜热参数的关系

采用数值计算中的隐函解法可以求解薄膜中的热传导方程^[5]，得到薄膜中的温度场分布。本文采用脉宽为 10 ns 的 1.06 μm 激光脉冲作用于 TiO₂ 薄膜。为了方便，假设激光脉冲波形是矩形，空间分布为高斯型，TiO₂ 薄膜的具体参数如表 1 所列。

Table 1

	thickness (nm)	refractive index	specific heat (J/cm ³ °C)	thermal conductivity (J/cm °C s)
bulk material		2.5~i0.0014	3.54	0.097
evaporated	240	2.21~i0.001	3.0	1.8×10 ⁻⁴
ion beam sputtered	240	2.35~i0.001	3.54	1.6×10 ⁻³

考察 TiO₂ 薄膜内的温度与薄膜热参数的关系。图 1 给出薄膜内的温度场与热传通常数的关系。在 TiO₂ 分别取块状材料，离子束溅射膜和热蒸发膜的有关参数时，不仅峰值温度相差很大，而且温度分布也发生很大变化。随着热传通常数增加温度峰值从界面移向膜中心。图 2 给出薄膜热容量对温度分布的影响，可以看出，尽管不同条件下的薄膜热容量相差不

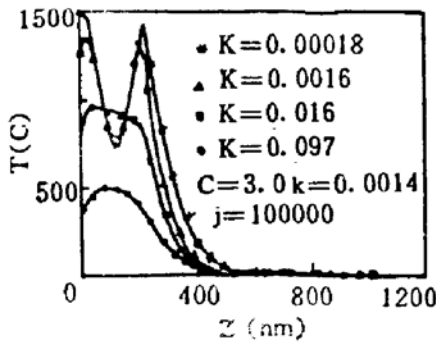


Fig. 1 Temperature distribution vs thermal conductivity for TiO₂ single layer

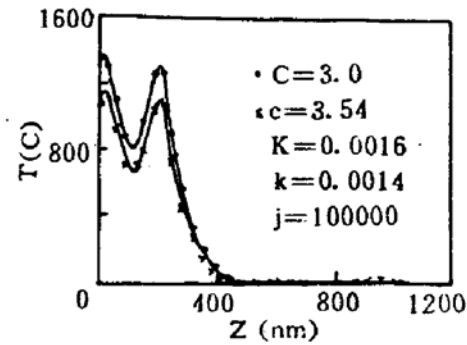


Fig. 2 Temperature distribution vs specific heat for TiO₂ single layer

大，但对温度峰值的影响还是不可忽视的。图 3 给出表面热流速率对薄膜温度场的影响。可以看出，当膜层热传导系数比较小时影响小。这是由于在热导率小的情况下，热量扩散比较慢的缘故。图 4 给出薄膜吸收系数的变化对温度场分布的影响，可以看出它将极大的影响温

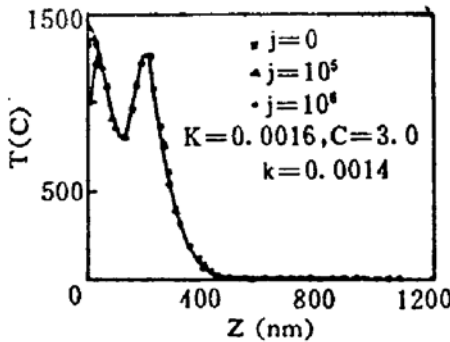


Fig. 3 Temperature distribution vs absorption coefficient of TiO₂ single layer

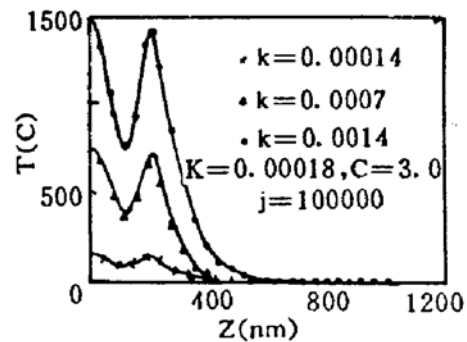


Fig. 4 Temperature distribution vs density of thermal flux of the surface

度峰值，但对强弱分布影响不大。图 5 给出基底热参数对薄膜温度分布的影响。由于薄膜本身热传导系数很小，在短时间内基体热传导的变化只能改变温度场在基体内的分布。但对薄

膜本身影响甚小。

4 光学薄膜的温度场设计

光学薄膜温度场设计的特点是：在保证薄膜光学性质的前提下，以薄膜内的温度分布作为薄膜性能的评价标准。

1) 评价函数

$$F_c = (T_R - T_c) / T_R$$

式中 T_R 为薄膜中实际温度分布， T_c 为临界温度。

对抗破坏薄膜来说， T_c 表示导致薄膜损伤的阈值温度。对光热功能薄膜来讲，表示为实现薄膜特定性能的域值温度。对抗破坏膜要求 F_c 为正值。对热功能薄膜要求 F_c 为正值。

2) 薄膜材料的选择：同时考虑膜层的吸收系数，热传导系数和临界温度三个因素。根据实际情况，综合判定最佳候选材料。

3) 膜系结构既决定了薄膜的光学性质，又影响了薄膜的驻波场结构和热传导特性。在对膜系结构进行搜索时必须在稳定薄膜基本性质的条件下进行温度搜索。必要时应建立加权的综合评价函数。

图 6 给出一个相变光盘薄膜的温度场设计结果。其中图 6(a)匹配介质层的热传导系数为 $0.26 \text{ W}/\text{C} \cdot \text{cm}$ 。图 6(b)为 $0.026 \text{ W}/\text{C} \cdot \text{cm}$ 。记录层的相变温度为 200°C ，在两种条件下的写入功率分别为 12 mW 和 5 mW 。该薄膜的设计参数由表 2 给出

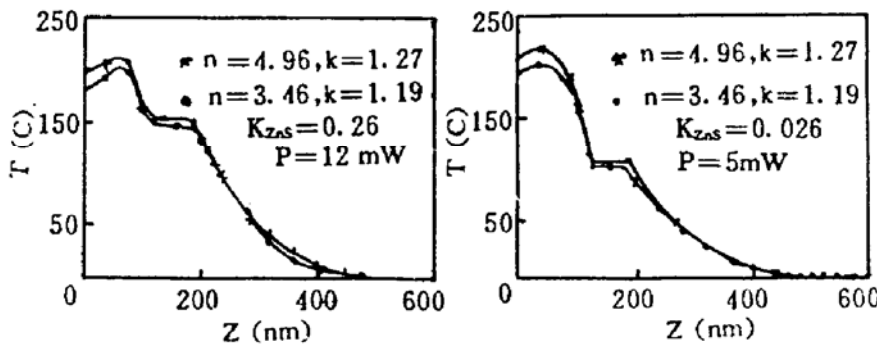


Fig. 6 Design of temperature field for a phase change optical disk thin film. a amorphous; b crystal parameters of thin film d

Table 2.

materials parameters	D(nm)	Nc	Na	Kc	Ka
ZnS	76	2.3	2.3		
GeSbTe ₄	60	4.969	3.46	1.27	1.19
ZnS	27	2.3	2.3		
Al	60	1.7	1.7	6.5	
ZnS	50	2.3	2.3		

图 7 给出 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 高反射膜的温度场设计结果。其破坏阈值取决于第一层和第二层界面附近的最大温

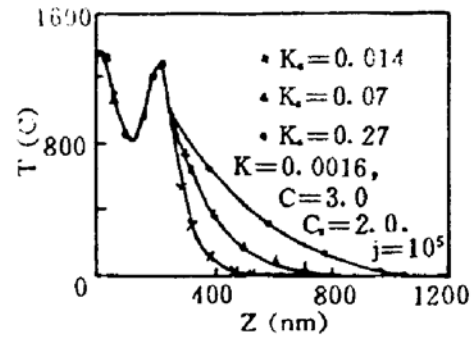


Fig. 5 Temperature distribution vs thermal properties of substrate for TiO_2 single layer

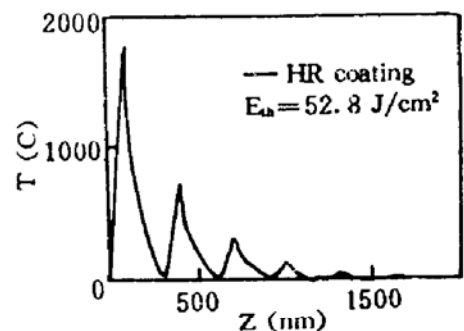


Fig. 7 Design of temperature field for a high reflecting

度区。以 TiO_2 膜的熔点为破坏标准, 该薄膜对 $1.06 \mu\text{m}$ 、 10 ns 激光脉冲该薄膜的破坏阈值为 52.8 J/cm^2 。

结 论 1) 由于薄膜结构的复杂性, 它的热传导系数大大低于体材料, 并随工艺不同而变化, 所以改进薄膜的热传导特性对改进薄膜的温度场分布是很有意义的。

2) 薄膜的温度场分布既与薄膜的光学参数有关, 也与膜系结构有关。薄膜在激光作用下是一个加热和传输的综合平衡过程。

3) 薄膜的温度场是薄膜损伤的决定因素。薄膜的温度场设计是设计强激光薄膜的最有效的设计技术。

4) 薄膜的温度场设计对优化一切光热功能薄膜的性能是很有意义的。

参 考 文 献

- [1] J. A. Dobrowolski, Design of optical multilayer coatings at NRCC. *Proc. SPIE*, 1987, **652**: 48~56
- [2] 郑燕飞, 唐晋发, 以模拟计算的制造成品率为最终评价指标的光学薄膜自动设计. *光学学报*, 1987, **7**(9): 818~823
- [3] O. Armon, P. Baumeister, Electric field distribution and the reduction of laser damage in multilayers. *Appl. Opt.*, 1980, **9**(11): 1853~1855
- [4] J. H. Apfel, Optical coating design with reduced electric field intensity. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(7): 1880~1885
- [5] M. Mansaripur, G. A. N. Connell, Laser induced local heating in moving multilayer media. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(5): 666~675

Temperature Field Design of Optical Coating

Fan Zhengxiu Tang Xuefei

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

(Received 4 November 1993; revised 10 March 1994)

Abstract The idea of temperature field design of optical coatings is advanced. Relations between temperature distribution in optical coating and optical properties and thermal parameters of the coating have been investigated and analysed. It is shown that temperature field design is very important either to high power laser coating or to photo-thermal acting thin film. The temperature field design for a reflecting coating and phase change optical disk thin film is given.

Key words optical coating, thermal conduction, temperature field design.