

## 涡旋光辐照多层介质膜温升的模拟

杜立峰,肖谦裔,张蓉竹

(四川大学 电子信息学院,四川 成都 610064)

**摘要:** 搭建了涡旋光在多层介质膜中的传输模型,分析了涡旋光垂直入射下膜系内的温升分布。结果表明,膜系内的温升分布与涡旋光入射面密切相关。当涡旋光在初始面入射时,膜系的温升区域集中在入射中心。当涡旋光在空间中传输一定距离后再入射膜系时,膜系温升区域向入射中心的两侧发散,且最大温升大于初始面入射时的温升。当传输距离足够远时,膜系最大温升随传输距离的增加而减小。另外,在一定传输距离内,膜系最大温升随拓扑荷数的增大而增加。传输距离足够远时,最大温升随拓扑荷数的增大而减小。

**关键词:** 涡旋光; 多层介质膜; 热传导

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0721001

## Simulation on temperature rise of multilayer dielectric coating with vortex beam irradiation

Du Lifeng, Xiao Qianyi, Zhang Rongzhu

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** The transmission model of vortex beam within multilayer dielectric coating has been established, and the temperature property of multilayer dielectric coating irradiated by optical vortex has been discussed. The results show that the temperature property is closely related to the incident plane of vortex beam. When irradiated by the initial plane of optical vortex, the region of temperature rise of coating was focused on the incident center. When irradiated by the optical vortex with a certain transmission distance in space, the temperature rise regions of coating spread on both sides of the incident center. When the transmission distance is far enough, the maximum temperature decreases with the increase of transmission distance. Moreover, the maximum temperature increases as the topological charges increase within a certain transmission distance. Nevertheless, the maximum temperature decreases as the topological charges increase when the transmission distance is far enough.

**Key words:** vortex beam; multilayer dielectric coating; heat conduction

收稿日期:2015-11-05; 修订日期:2015-12-03

作者简介:杜立峰(1987-),女,博士生,主要从事光学薄膜方面的研究。Email:dlf\_111@126.com

导师简介:张蓉竹(1975-),女,教授,博士生导师,主要从事精密光学检测以及光电子技术方面的研究。Email:zhang\_rz@scu.edu.cn

## 0 引言

多层介质膜在光学系统中有着广泛的应用,是不可缺少的光学元件。在光学系统中,激光辐照必然会引起多层介质膜内温度的升高,导致膜系光学性能下降甚至损伤,因此研究激光导致的膜系温升对于提高整个光学系统的抗激光损伤能力具有重要意义。对于激光导致多层介质膜内的温升甚至熔融损伤已经有大量的研究成果<sup>[1-4]</sup>。以往的工作主要集中于平面高斯光束。最近十几年来,涡旋光成为现代光学中的一个研究热点,广泛应用于光学微操作、原子光学、空间光信息传输等多个领域<sup>[5-6]</sup>。而对涡旋光进行分析时,作为光学系统中必不可少的光学元件,必然涉及到涡旋光在多层介质膜中的传输。因此,研究涡旋光辐照下的膜系光学性能也就成为必然的课题<sup>[7]</sup>。

文中使用 MATLAB 软件编制程序,搭建了涡旋光在多层介质膜中的传输模型,分析了涡旋光在不同传输距离入射下多层介质膜内的温升变化,以及涡旋光拓扑荷数对膜系最大温升的影响。通过对膜系内的温升研究,可以为提高多层介质膜的抗激光损伤能力提供理论参考。

## 1 理论模型

图 1 表示激光辐照多层介质膜的模型。假设有  $X-1$  层介质膜镀制在基底上,令基底为第 1 层,多层

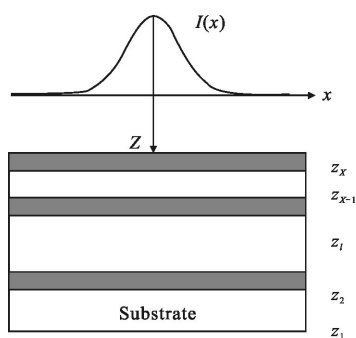


图 1 激光辐照多层介质膜模型

Fig.1 Model of multilayer coating with laser irradiation

膜依次记为 2,3,⋯,X,空气为第 X+1 层,每层膜的厚度记为  $z_1, z_2, \dots, z_x$ 。入射光波沿薄膜厚度方向 Z 垂直入射。入射激光采用一维涡旋光,其电场表达式为<sup>[8]</sup>:

$$E_y = \frac{1}{i\lambda Z} \exp\left(\frac{ikx^2}{2Z}\right) \times \int_0^\infty \exp\left[-(x'^2/\omega^2) + \frac{ikx'^2}{2Z}\right] \cdot J_N(kx'x/Z) x' dx' \quad (1)$$

式中:Z 为膜系深度方向;x 为光斑直径方向;k 为波数; $\omega$  为光束束腰; $J_N(x)$  为 N 阶第一类贝塞尔函数;N 为拓扑荷数。

由于涡旋光是非平面光,应用角谱理论,将非平面光场转化为平面光的叠加,如公式(2)所示:

$$\psi(k_x, Z) = \int_{-\infty}^{\infty} E(x, Z) \exp(-i2\pi k_x x) dx \quad (2)$$

根据麦克斯韦方程及多层薄膜的边界条件可以解出第 l 层介质内的电场和磁场强度<sup>[9]</sup>。

$$E_{ly} = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \psi(k_x) (Ae^{-ik_z Z} + Be^{ik_z Z}) e^{-ik_x x} \quad (3)$$

$$H_{lx} = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \psi(k_x) \frac{-k_z}{w\mu_l} (Ae^{-ik_z Z} + Be^{ik_z Z}) e^{-ik_x x} \quad (4)$$

$$H_{lz} = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \psi(k_x) \frac{-k_x}{w\mu_l} (Ae^{-ik_z Z} + Be^{ik_z Z}) e^{-ik_x x} \quad (5)$$

式中:E, H 分别表示电场和磁场强度; $k_x$  为平面波波矢在 x 方向的分量; $k_z$  表示第 l 层平面波波矢在 Z 方向的分量;w 表示激光圆频率; $\mu$  表示材料磁导率。系数 A, B 可根据切向电场磁场的边界条件解出,  $A=A_1, B=A_1 \times A_2, A_1, A_2$  表达式如公式(6)~(7)<sup>[10]</sup>, 其中 n 表示每层膜的折射率。

$$A_2^l = \frac{(n_l \cos \theta_l - n_{l-1} \cos \theta_{l-1}) / (n_l \cos \theta_l + n_{l-1} \cos \theta_{l-1}) + A_2^{l-1}}{1 + [(n_l \cos \theta_l - n_{l-1} \cos \theta_{l-1}) / (n_l \cos \theta_l + n_{l-1} \cos \theta_{l-1})] A_2^{l-1}} \times \exp\{-i2k_z z_l\} \quad 2 \leq l \leq X+1 \quad (6)$$

$$A_1^l = \frac{\exp(-ik_{z+1} z_{l+1}) + A_2^{l+1} \exp(ik_{z+1} z_{l+1})}{1 + A_2^l} \times A_1^{l+1} \quad 1 \leq l \leq X \quad (7)$$

数值求解公式(1)~(7)可求出膜内任意位置的电场强度与磁场强度。激光辐照膜系必然引起温度的升高,多层介质膜的热传导方程及边界条件表示为<sup>[11]</sup>:

$$\rho_l c_l \frac{\partial}{\partial t} T(x, Z, t) = K_l \nabla^2 T(x, Z, t) + g_l(x, Z, t)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} T(x, Z=0, t) = \gamma T(x, Z=0, t)$$

$$T(x, Z=L, t) = 0, T(x=\pm b, Z, t) = 0$$

$$T(x, Z, t=0) = 0 \quad (8)$$

式中:T 表示膜内温度; $\rho_l, c_l$  和  $K_l$  分别表示第 l 层膜材料的密度,热容和热导率;b 表示多层介质膜半径; $g_l$  表示第 l 层膜吸收的激光能量,其表达式如公式(9)所示。

$$g = \frac{2}{w} (\epsilon'' \epsilon_0 |E|^2) \quad (9)$$

式中： $\epsilon''$ 为膜材料相对介电常数的虚部； $\epsilon_0$ 为真空介电常数； $E$ 为多层介质膜内电场强度。

## 2 数值模拟与分析

基于以上理论模型,文中以一个定制的探测器上的增透膜为分析对象。表 1 为该增透膜的设计参数,表 2 为相应膜材料的热学参数。膜系直径为 2 mm。

表 1 多层介质膜设计参数

Tab.1 Design parameters of the multilayer coating

Film stack	$\lambda/\text{nm}$	$n$
G/0.7320L(1.4639H1.4641L) <sup>7</sup>		H-ZnS, 2.35- i2.7×10 <sup>-4</sup>
(1.4639H1.3420L)(1.22H1.22L) <sup>7</sup>	650	L-SiO <sub>2</sub> , 1.46-i2×10 <sup>-4</sup>
(1.22H0.6101L)/A		G-glass, 1.52

表 2 SiO<sub>2</sub> 和 ZnS 两种材料的热学参数

Tab.2 Thermodynamics parameters of SiO<sub>2</sub> and ZnS materials

Material	$\rho c/\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$	$K/\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	Melting point/°C
ZnS	2.3	2.59×10 <sup>-2</sup>	1 800
SiO <sub>2</sub>	2	1.7×10 <sup>-3</sup>	1 710
Glass	2	1.4×10 <sup>-2</sup>	-

用脉宽为 5 ns, 波长 650 nm, 拓扑荷数为 5 的涡旋光在初始平面 Z=0 处垂直入射多层介质膜。图 2 是涡旋光在初始平面上的光强分布, 由图 2 可知涡旋光在初始面光强呈高斯分布, 峰值 13×10<sup>11</sup> W/m<sup>2</sup>。

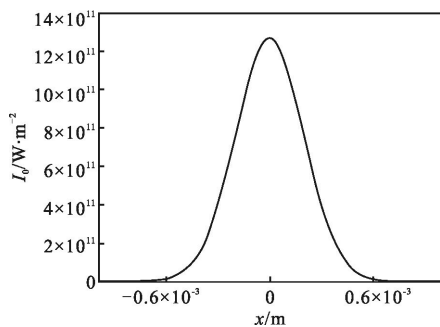


图 2 涡旋光在初始平面上的光强分布

Fig.2 Intensity distribution of vortex beam on the initial plane

图 3 表示脉冲结束时多层介质膜内的二维温升分布。横坐标表示薄膜深度方向, 纵坐标表示光斑直径方向。由图可知, 膜系内最大温升为 1 100 °C。沿光斑直径方向每层膜的温升呈高斯分布, 在入射中心处温升最大。受多层介质膜的驻波场影响, 膜系深度方向的温升呈现明显的强弱分布。为更加详细展示每层膜内温度的变化, 图 4 给出了入射光中心处膜系深度方向温度分布。其中灰色条纹表示 SiO<sub>2</sub> 层, 白色条纹表示 ZnS 层。由图 4 可知温升峰值都在 SiO<sub>2</sub> 层, 因此 SiO<sub>2</sub> 层内的温度远大于 ZnS 层内的温度。温升最大值在膜系第 26 层, 约为 1 090 °C, 没有达到 SiO<sub>2</sub> 熔点。因此在涡旋光初始平面入射时, 多层介质膜没有熔融损伤。

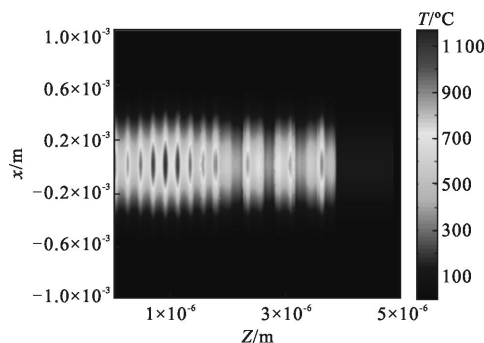


图 3 膜系内的二维温升分布(Z=0 mm)

Fig.3 Two-dimensional temperature rise distribution within the multilayer coating (Z=0 mm)

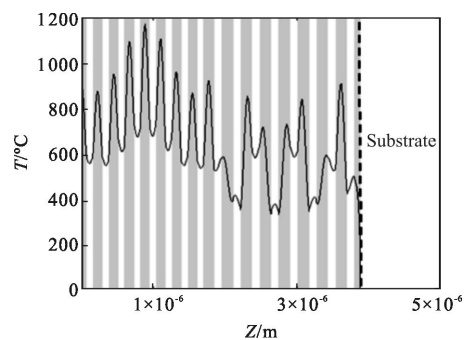


图 4 入射中心处沿薄膜深度方向的温升分布

Fig.4 Z-axis temperature rise distribution within the multilayer coating at the center region of the incident laser

当涡旋光分别在空气中传输 15 mm 和 60 mm 后其光强分布如图 5 所示。15 mm 处光强分布不再是高斯分布, 入射中心处光强为 0, 距入射中心 0.1 mm 处有光强最大值。且此时的光强最大值是初始平面处光强最大值的 1.7 倍。随传输距离增加到 60 mm,

光强最大值扩散到距入射中心 0.3 mm 处,此时光强与涡旋光初始平面的光强相等。

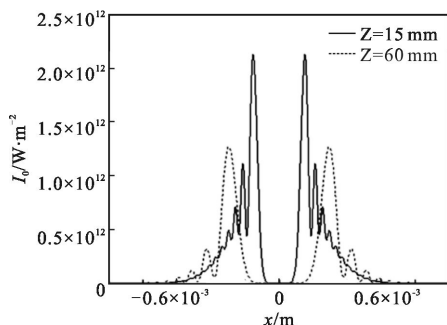


图 5 涡旋光在空气中传输不同距离后的光强分布 (Z=15,16 mm)

Fig.5 Intensity distribution of vortex beam with different transmission distances in space(Z=15,16 mm)

图 6 表示涡旋光在空气中传输 15 mm 和 60 mm 后入射多层介质膜时膜系内的温升分布。由图 6(a)可知,涡旋光在空气中传输 15 mm 后再入射时,入射

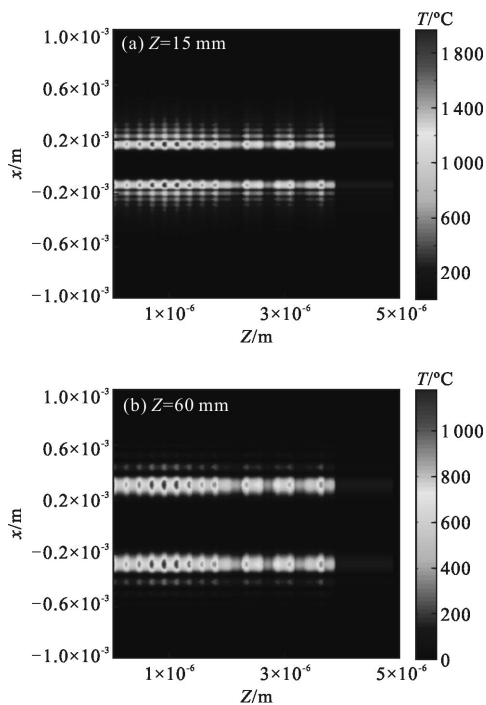


图 6 涡旋光不同传输距离时膜系内的二维温升分布

Fig.6 Two-dimensional temperature rise distributions within the multilayer coating with different transmission distances

中心处无温升。每层膜内的温升区域朝入射中心的两侧发散,温升最大值位于入射中心上下 0.1 mm 处。且膜系最大温度达到 1 800 °C,此时温度达到 SiO<sub>2</sub> 材料的熔融点,膜系熔融损伤。由图 6(b)可知,

随传输距离增加到 60 mm,温升区域扩散到距入射中心 0.3 mm 处,此时膜系内温度最高达到 1 000 °C,没有达到膜材料熔点。

图 7 表示多层介质膜内最大温升随涡旋光传输距离的变化曲线以及涡旋光不同拓扑荷数对该曲线的影响。横坐标表示涡旋光在空气中的传输距离,纵坐标表示膜系最大温升。需要指出的是涡旋光在传输距离趋于 0 时存在光强突变,因此图中传输距离的起点并不是坐标原点。由图可知,当拓扑荷数为 5 时,在 60 mm 内,最大温升大于初始平面的温升。60 mm 后,最大温升小于初始平面的温升,而且随传输距离增加,最大温升逐渐减小。这与图 6 的分析结果一致。另外,拓扑荷数不同,涡旋光的光强也会分布不同,导致膜系温升不同。30 mm 内,拓扑荷数越大,相同传输距离下的膜系内温升越大。60 mm 后,拓扑荷数越大,相同传输距离下的膜系内温升越小。

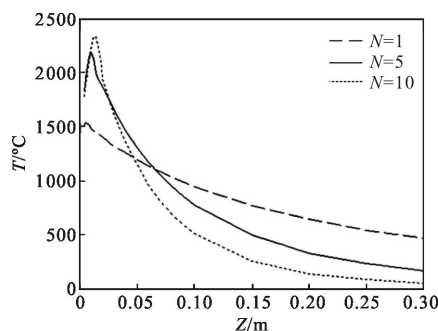


图 7 涡旋光拓扑荷数分别为 1,5 和 10 时膜系内最大温升随传输距离的变化

Fig.7 Maximum temperature rise vs transmission distance with the topological charges of vortex beam are 1, 5 and 10 respectively

### 3 结论

涡旋光辐照多层介质膜时,膜系内的温升与涡旋光的传输特性有关。在空气中的传输距离不同,涡旋光的光强分布不同。受该传输特性的影响,当涡旋光在初始平面垂直入射时,每层膜内的温升区域都集中在入射中心,且沿光斑直径方向呈高斯分布。当涡旋光在空气中传输一定距离后入射多层介质膜,每层膜内的温升区域朝入射中心的两侧发散,入射中心处无温升,且最大温升大于初始面入射时的温升。当传输距离足够远时,膜系内最大温升随传输距

离的增加而减小。

另外,拓扑荷数不同,涡旋光的光强也会分布不同。受该激光特性的影响,在空气中传输一定距离后再入射时,膜系最大温升随拓扑荷数的增大而增大。当传输距离足够远时,最大温升随拓扑荷数的增大而减小。

#### 参考文献:

- [1] Mansuripur M, Neville Connell G A, Goodman J W. Laser-induced local heating of multilayers [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(6): 1106-1114.
- [2] Zhang Qiang, Fan Zhengxiu. Interface absorption effect on temperature field of optical coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(6): 777-782. (in Chinese)  
赵强, 范正修. 光学薄膜界面吸收对温度场的影响 [J]. *光学学报*, 1996, 16(6): 777-782.
- [3] Zhou Ming, Fan Zhengxiu, Shao Jianda, et al. Thermal effects of optical film with the combined irradiation of different wavelength lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(10): 2608-2612. (in Chinese)  
周明, 范正修, 邵建达, 等. 不同波长激光同时辐照薄膜热效应研究 [J]. *光子学报*, 2009, 38(10): 2608-2612.
- [4] Wang B, Gallais L. A theoretical investigation of the laser damage threshold of metal multi-dielectric mirrors for high power ultrashort applications [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14698-14711.
- [5] Anoop K K, Rubano A, Fittipaldi R, et al. Femtosecond laser surface structuring of silicon using optical vortex beams generated by a q-plate [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(24): 241604.
- [6] Chen Jun. The study on modulation and application of the modified optical vortices [D]. Tianjin: Nankai University, 2010. (in Chinese)  
陈君. 新型光学涡旋的调控与应用研究 [D]. 天津: 南开大学, 2010.
- [7] Hamazaki J, Morita R, Chujo K, et al. Optical-vortex laser ablation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2144-2151.
- [8] Xiao Qianyi, Zhang Rongzhu. Propagation characteristics of super-Gaussian beams with vortex wave-front [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(12): 90-95. (in Chinese)  
肖谦裔, 张蓉竹. 超高斯涡旋光束在空间中的传输特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(12): 90-95.
- [9] Kong J A, Wu B I, Zhang Y. A unique lateral displacement of a Gaussian beam transmitted through a slab with negative permittivity and permeability [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2002, 33(2): 136-139.
- [10] He Minbo. Thermal deformation of coated mirrors irradiated by high energy laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)  
贺敏波. 强激光辐照下镀膜镜面的热变形 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [11] Wang Ying, Liu Xu, Zhang Yueguang, et al. Numerical analysis of thermal response of mid-infrared high reflectance coating under different laser irradiation angles [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(4): 2382-2387. (in Chinese)  
王颖, 刘旭, 章岳光, 等. 激光入射角度对薄膜热场分布影响的数值分析 [J]. *物理学报*, 2007, 56(4): 2382-2387.