

光学薄膜测量时平顶光束激励的表面热透镜理论模型

陈潇潇^{1,2)} 李斌成²⁾ 杨亚培¹⁾

1) 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

2) 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2005 年 12 月 26 日收到, 2006 年 2 月 10 日收到修改稿)

推导了调制的平顶光束激励下基于 Fresnel 衍射积分的表面热透镜理论, 通过数值模拟, 比较了平顶光束和高斯光束激励下样品内部温度场、表面形变场和探测光衍射信号的径向分布, 分析了影响表面热透镜信号的实验参数. 结果表明, 在最佳探测位置, 平顶光束激励下的表面热透镜系统比相同情况下高斯光束激励下的灵敏度高, 最高时约 2 倍, 更有利于薄膜吸收测量.

关键词: 表面热透镜, 光学薄膜, 平顶光束

PACC: 4255F, 6570, 7865

1. 引 言

吸收损耗是衡量光学薄膜性能的重要指标之一. 尤其在高功率激光作用下, 吸收损耗不仅引起光学薄膜元件的热畸变, 还会降低薄膜的损伤阈值. 准确测量吸收损耗对于评价高功率激光薄膜和优化镀膜工艺十分重要.

表面热透镜技术(STL)是测量光学薄膜微弱吸收的重要方法. 利用光斑半径远大于激励光斑尺寸的探测激光束入射到被加热样品表面, 由被加热前后从样品表面反射的探测光中心光强的相对变化确定光学薄膜的吸收系数. 上世纪 90 年代初, 由 Ku^[1]和 Saito^[2]分别提出. 1997 年 Wu 测量了包括高功率激光器腔镜在内的弱吸收薄膜材料, 得到最低吸收为 2.6ppm^[3]. 在国内, 2004 年上海光机所测得中心波长分别为 978nm, 1015nm 的窄带滤波片的平均吸收均低于 20ppm, 其灵敏度优于 10ppm^[4]. 2005 年对 1064nm 的窄带滤光片的测量灵敏度则达到了 1ppm^[5].

用于表面热透镜技术的激励光主要有高斯光束和平顶光束. 传统的吸收测量中, 多使用高斯光束作为激励光, 但由于高功率激光器一般为多模输出, 要获得高斯光束比较困难, 而平顶光束可以通过在激光器前加一定大小的光阑实现, 减小了测量技术对激光光束质量的依赖, 更有利于实际的测量工作. 1999 年 Li 等人利用脉冲平顶光束激励薄膜样品, 测

得最小表面形变达到 0.002nm^[6]. 本文提出了用连续调制的平顶光束作为激励光的表面热透镜技术测量薄膜微弱吸收, 并推导了平顶光束激励下基于 Fresnel 衍射积分的表面热透镜理论. 通过数值模拟, 比较了在平顶光束和高斯光束激励下, 调制频率和激励光斑半径对表面热透镜信号振幅的影响. 模拟结果表明, 在最佳探测位置处, 采用平顶光束时的灵敏度比高斯光束最大提高约 2 倍, 更有利于薄膜的微弱吸收测量.

2. 理论模型

考虑一光学薄膜样品. 假设仅薄膜吸收激励光束, 基底吸收可以忽略. 由于薄膜厚度远小于热扩散长度, 整个样品的热学性质可认为由基底决定, 薄膜仅起吸收光的作用. 如图 1 所示, 平顶光束激励样品表面, 激励光功率为 P , 光斑半径为 a , 调制角频率为 ω . 样品温度场满足热传导方程

$$\nabla^2 T(r, z) - \frac{i\omega}{D} \cdot T(r, z) = 0. \quad (1)$$

假设样品两边界的热传导可以忽略, 则边界条件为

$$\begin{aligned} -K_{th} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \frac{(1-R)P}{\pi a^2} \quad (|r| \leq a), \\ \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=L} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 K_{th} 是样品的热导率, $D = K_{th}/\rho c$ 为热扩散系数, ρ, c 分别为样品的密度和热容量, L 为样品厚度, R 为表面反射率.

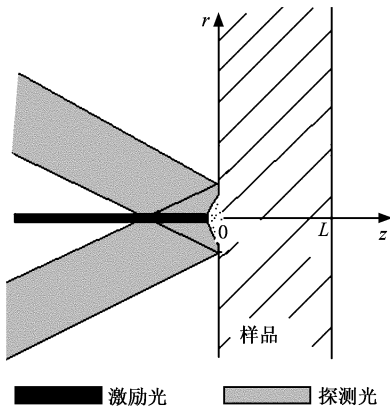


图1 理论模型

可得样品内温度分布为

$$T(r, z) = \frac{(1-R)P}{\pi a K_{th}} \int_0^\infty J_0(\delta r) J_1(\delta a) \times \frac{\exp(\beta_1 z) + \exp(2\beta_1 L) \exp(-\beta_1 z)}{\beta_1 (\exp(2\beta_1 L) - 1)} d\delta, \quad (3)$$

其中 $\beta_1^2 = \delta^2 + j \frac{\omega}{D}$, J_0, J_1 分别为零阶、一阶贝塞尔函数。

对于任意稳态的温度分布 $T(r, z)$ 样品表面的热形变为^[7]

$$U_z|_{z=0}(r) = -2\alpha_{th}(1+\gamma) \int_0^\infty \rho d\rho \int_0^L d\xi \times \int_0^\infty \beta d\beta J_0(\beta \rho) J_1(\beta r) T(\rho, \xi) \times \frac{\text{sh}(\beta L) \text{ch}(\beta L - \beta \xi) - \beta L \text{sh}(\beta \xi)}{\text{sh}^2(\beta L) - (\beta L)^2}. \quad (4)$$

由于热扩散长度远小于样品厚度, 近似认为样品厚度无限大, 从而得到样品表面的热形变为

$$U_z|_{z=0}(r) = -2\alpha_{th}(1+\gamma) \cdot \frac{(1-R)P}{\pi a K_{th}} \times \int_0^\infty \frac{J_0(\delta r) J_1(\delta a)}{\beta_1(\beta_1 + \delta)} d\delta. \quad (5)$$

同样, 对于高斯光束激励下, 样品表面的热形变为

$$U_z|_{z=0}(r) = -\alpha_{th}(1+\gamma) \cdot \frac{(1-R)P}{\pi K_{th}} \times \int_0^\infty \frac{J_0(\delta r)}{\beta_1(\beta_1 + \delta)} \exp\left(-\frac{a^2 \delta^2}{4}\right) \cdot \delta d\delta. \quad (6)$$

根据 Fresnel 衍射理论, 探测光在探测器表面的电场分布为^[8]

$$E_2(r_2, z_1 + z_2)$$

$$= \frac{j2\pi}{\lambda z_2} \exp\left[-jk\left(z_2 + \frac{r_2^2}{2z_2}\right)\right] \times \int_0^\infty E_1'(r_1, z_1) J_0\left(k \frac{r_1 r_2}{z_2}\right) \times \exp\left(-\frac{jk r_1^2}{2z_2}\right) r_1 dr_1, \quad (7)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 是探测光波长, z_1 和 z_2 分别代表探测光束腰到样品表面和表面到探测器的距离, r_1 和 r_2 分别为样品和探测器表面的径向坐标. $E_1'(r_1, z_1)$ 为探测光在样品出射面的电场复振幅. 假设激励光产生的样品表面变形对探测光仅引起相位变化, 对于 TEM₀₀ 模的高斯探测光束, 则有

$$E_1'(r_1, z_1) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{E_0 w_0}{w_1} \exp\left(-jkz_1 - \frac{jk}{2q_1} r_1^2\right) \times \exp[-j\Delta\phi(r_1)], \quad (8)$$

E_0 和 w_0 分别为探测光电场的中心振幅和束腰(能量下降 $1/e$ 时), q_1 为探测光束的复曲率半径. 样品表面的探测光半径为 $w_1 = w_0 \sqrt{1 + (z_1/z_c)^2}$, $z_c = \pi w_0^2/\lambda$ 为探测光的共焦参数. 表面热透镜产生的光学相移 $\Delta\phi(r)$ 为

$$\Delta\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2U(r, \rho). \quad (9)$$

探测面上光强可表示为

$$I_2(r_2, z_1 + z_2) = |E_2(r_2, z_1 + z_2)|^2, \quad (10)$$

表面热透镜信号定义为探测面上探测光强度的相对变化, 即

$$S = \frac{I_2(\Delta\phi(\omega)) - I_2(\Delta\phi = 0)}{I_2(\Delta\phi = 0)}. \quad (11)$$

3. 数值模拟

在数值模拟中, 以 K9 玻璃作为基底材料, 其样品热导率 K_{th} 为 $1.5 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 热传导系数 D 为 $7.75 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 热膨胀系数 α_{th} 为 7.5×10^{-6} , 探测光波长为 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 束腰为 $w_0 = 0.4 \text{ mm}$, 假设束腰到样品表面的距离为 $z_1 = 2z_c$, 即 2 倍共焦参数.

3.1. 温度场和形变场

图 2 为调制频率为 10Hz, 80Hz, 400Hz 时, 平顶光激励下样品温度场的径向分布. 假设激励光斑半径为 0.2mm. 当调制频率低于特征频率(定义为 $f_c = 4D/a^2$, $a = 0.2 \text{ mm}$ 时 $f_c = 80 \text{ Hz}$) 时, 如图 2(a), 温度场的分布取决于激励光斑形状和热传导效应, 由于

热扩散明显,分布区域大于激励光斑,在频率为 10Hz 时约为激励光斑半径的 2 倍.随着调制频率增加,热传导过程对温升分布影响逐渐减弱,激励光斑形状的影响相对增大,当调制频率远高于特征频率时(如图 2(c)),温度场分布主要受激励光斑形状的影响,基本保持入射光的形状.随着调制频率的增

加,中心处的最大温升降低.

温度场的分布直接影响样品的表面形变.图 3 为调制频率为 10Hz、80Hz、400Hz 时平顶光与高斯光激励下最大表面形变的径向分布对比.随着调制频率的增加,中心处最大形变减小.在相同频率下,平顶光引起的表面形变总是大于高斯光引起的形变.

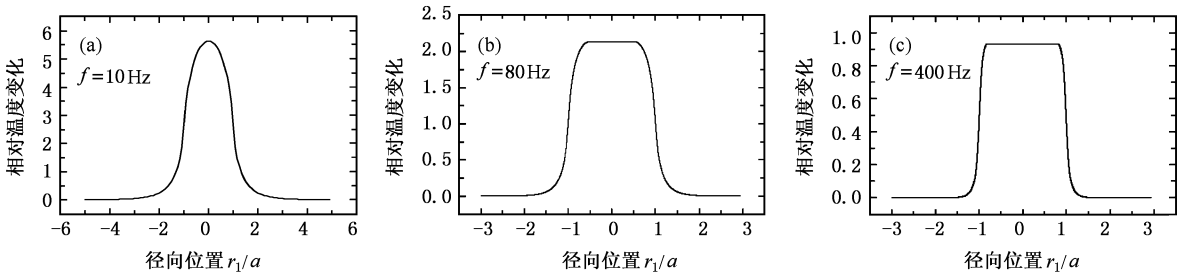


图 2 不同调制频率下表面温度场的径向分布

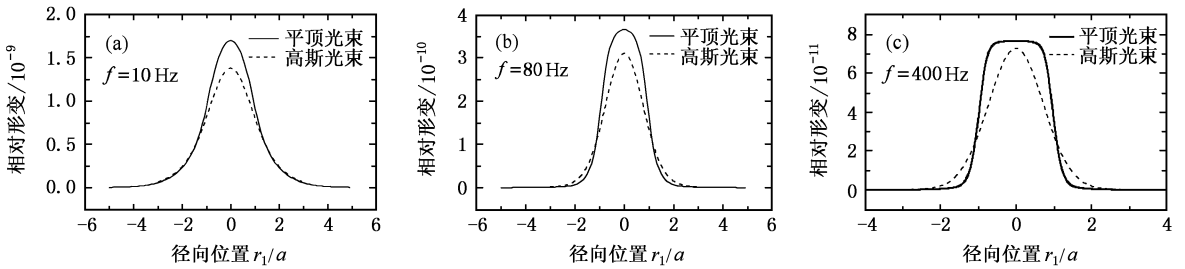


图 3 不同调制频率下表面形变的径向分布

3.2. 衍射信号径向分布

以平顶光束激励样品,光斑半径同上.探测光在样品表面的光斑半径 $w_1 = 0.9\text{mm}$,大于样品表面形变区

域的半径.照射在形变区域的部分将发生相移.探测光在探测面的光斑半径 $w_2 = w_0 \sqrt{1 + [(z_1 + z_2)/z_c]^2}$.近场情况下,如图 4(a)~(c),由于衍射分布受形变的影响较大,高频时可以明显看到衍射光强的不规则

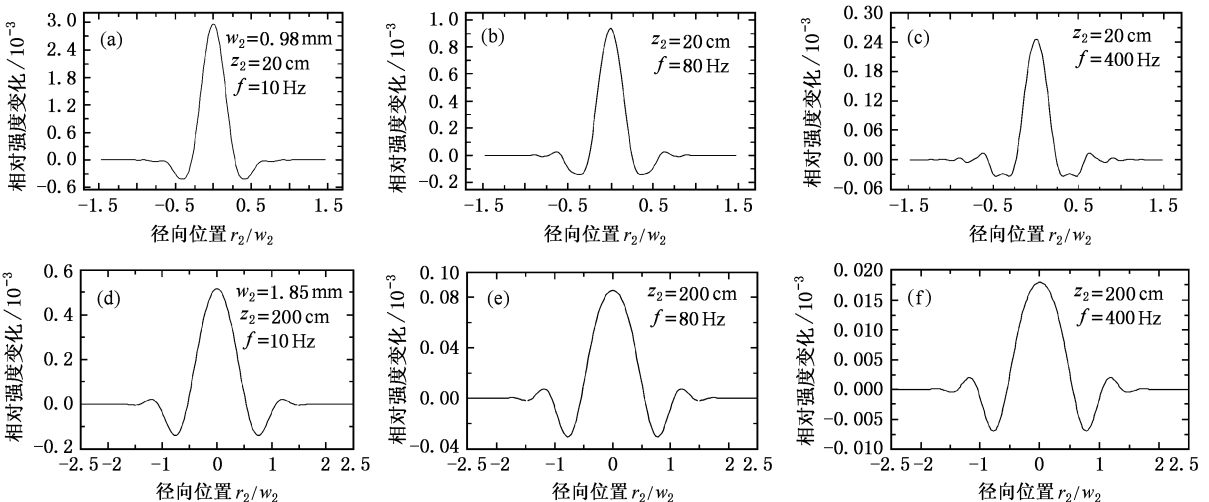


图 4 不同调制频率下衍射信号在近场和远场的径向分布

分布,这是由于图 3(c)所示形变的边缘突变引起的.远场情况下,如图 4(d)–(f)未发生光学相移的边缘探测光与中间部分衍射光相互作用,使形变的影响减弱,衍射分布较为相似.

3.3. 表面热透镜信号随探测距离的变化

图 5 为平顶光束和高斯光束激励时的表面热透镜信号随探测距离的变化情况.在不同调制频率下,

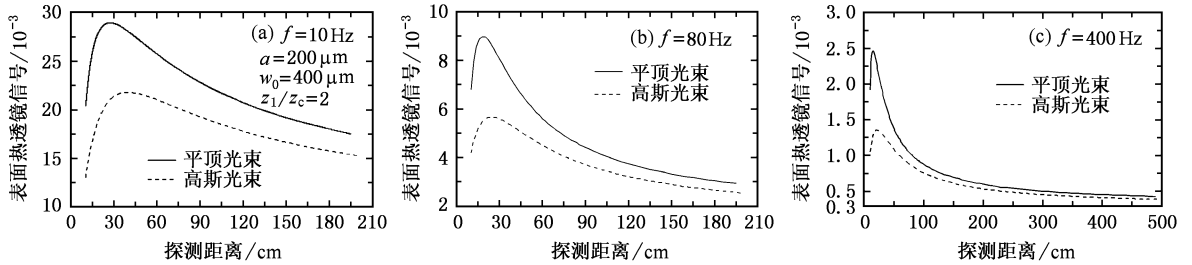


图 5 不同调制频率下表面热透镜信号随探测距离的变化情况

距离处探测信号可以比远场时获得更高的灵敏度.

3.4. 表面热透镜信号最佳探测位置和最大振幅与调制频率的关系

信号最佳探测距离的变化与调制频率,激励光斑的形状有关.图 6(a)为最佳探测距离随调制频率

信号的变化规律相似,无论平顶光还是高斯光激励,均存在一最佳探测距离.在近场,信号振幅随着探测距离的增加而迅速增大,在最佳探测位置处获得最大振幅.并且平顶光激励下的最大振幅均大于高斯光情况.此后振幅随着探测距离的进一步增加逐渐下降.到远场,如图 5(c),平顶光激励下信号振幅仅是最佳探测距离处最大振幅的 0.17 倍,高斯光为 0.28 倍.因此,在实际的高精度测量中,在最佳探测

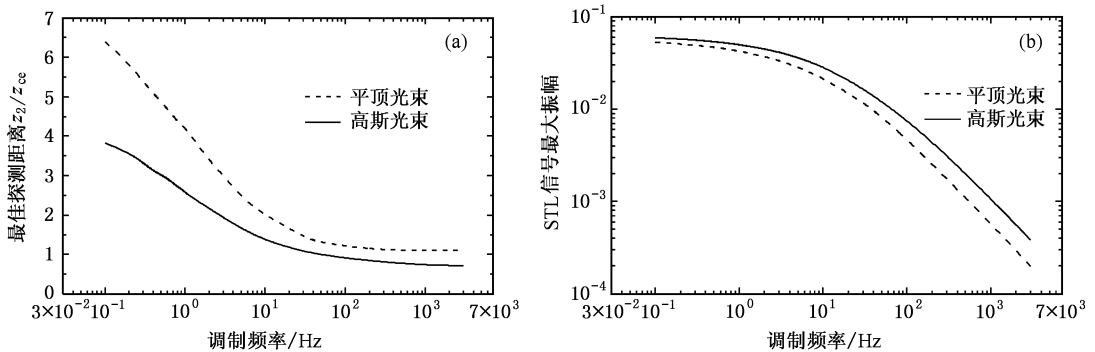


图 6 最佳探测距离和最大振幅随调制频率的变化情况

相对应的最佳距离处的最大振幅随调制频率的变化情况如图 6(b)所示.在调制频率较低时,随调制频率的增加,最大振幅缓慢减小;到达特征频率后,随着调制频率的增加,最大振幅近似线性减小.在不同调制频率下,平顶光引起的最大振幅均大于高斯光,在高频(约 3kHz)时可达约 2 倍.因此,平顶光激励的表面热透镜系统总是比高斯光时灵敏,在

的变化曲线.定义一特征距离 $z_{ce} = \frac{\pi a^2}{\lambda}$,当 $a = 0.2\text{mm}$ 时, $z_{ce} = 198.6\text{mm}$.当调制频率远低于特征频率时,最佳探测距离随调制频率的升高而快速下降;调制频率为 300Hz 时,平顶光激励下最佳探测距离 $z_2/z_{ce} \approx 0.8$,高斯光 $z_2/z_{ce} \approx 1.1$.随着调制频率的进一步升高,两者最佳探测距离变化均不明显.

最佳探测位置时,其灵敏度最大比高斯光高出约 2 倍.

3.5. 表面热透镜信号最佳探测位置和最大振幅与激励光斑半径的关系

以上数值计算中均取激励光斑半径 $a = 0.2\text{mm}$,未考虑激励光斑半径的变化情况.而激励光

斑半径也是影响表面热透镜信号最佳探测距离的重要因素.图 7(a)为最佳探测距离随着激励光斑半径的变化情况, $w_1 = 0.9\text{mm}$,当激励光斑半径小于 w_1 时,最佳探测距离随着激励光斑半径的增大而快速增加.

相应的表面热透镜信号最大振幅随激励光斑半

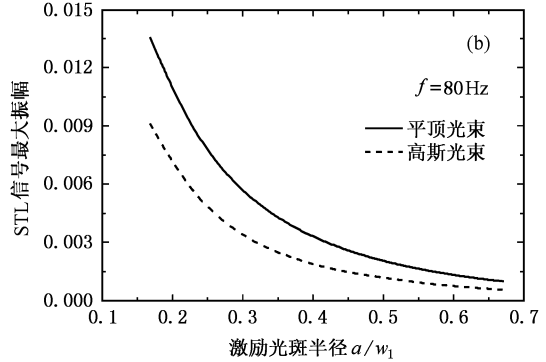
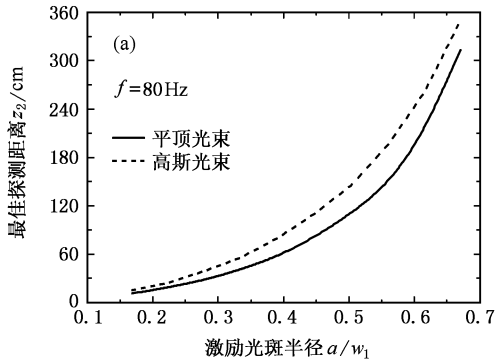


图 7 最佳探测距离和最大振幅随激励光斑半径的变化曲线

4. 结 论

与高斯光束激励下的表面热透镜系统相比,平

顶光束激励下的表面热透镜系统由于对激光器的依赖减小,更容易满足工程测量中的需要,而且比高斯光束激励下的灵敏度最多高出约 2 倍,也有利于更精确的测量薄膜微弱吸收.

- [1] Kuo P K , Manidasa M 1990 *Appl. Opt.* **29** 36
 [2] Saito H , Irikura M , Haraguchi M *et al* 1992 *Appl. Opt.* **31** 12
 [3] Wu Z L , Thomsen M , Kuo P K *et al* 1997 *Opt. Eng.* **36** 251
 [4] Fan S H , He H B , Shao J D *et al* 2004 *SPIE* **5774** 531
 [5] Fan S H , He H B , Fan Z X *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5774

(in Chinese] 范树海、贺洪波、范正修等 2005 物理学报 **54** 5774]

- [6] Li B C , Martin S , Welsch E 1999 *Opt. Lett.* **24** 1398
 [7] Li B C 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 482
 [8] Power J F 1990 *Appl. Opt.* **29** 52

Theory of surface thermal lens signal in optical coating with cw modulated top-hat beam excitation

Chen Xiao-Xiao^{1,2)} Li Bin-Cheng²⁾ Yang Ya-Pei¹⁾

¹ *Optoelectronic Information Department of the University of Electric Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*

² *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*

(Received 26 December 2005 ; revised manuscript received 10 February 2006)

Abstract

The theoretical model based on the Fresnel diffraction integral is developed to describe the surface thermal lens (STL) signal excited by a cw modulated top-hat beam. The three-dimensional profile of temperature rise, the radial profile of the surface displacement and the diffraction signal of the probe beam obtained with both top-hat and Gaussian beam excitations are compared by numerical calculation. The dependence of the surface thermal lens amplitude on the experimental parameters are discussed. Numerical results show that the top-hat beam STL instrument is more sensitive than the Gaussian beam STL instrument, with a maximum sensitivity enhancement factor of approximately 2.

Keywords : surface thermal lens, optical coating, top-hat beam

PACC : 4255F, 6570, 7865