

文章编号: 1001-4322(2003)03-0225-04

脉冲激光引起铜膜镜面的环形损伤波纹研究^{*}

王伟平^{1,2}, 吕百达¹, 刘仓理², 张大勇², 骆永全², 谷卓伟²

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 用波长 1.06 μm 、半高宽 10ns 的脉冲 Nd:YAG 激光辐照铜膜镜面,在激光辐照区,用光学显微镜观察到有规律的环形波纹状损伤图案,波纹平均周期约几十 μm 。通过对光路系统分析,认为样品前的小孔光阑对激光产生了菲涅尔衍射,使得在样品表面光强分布变成周期性环状分布。在极短的相互作用时间内,热扩散很小,损伤图案依赖于光强分布。并依据实验参数,用柯林斯公式对样品表面的光强分布进行了计算,所得光强分布的周期与损伤波纹的周期基本一致。

关键词: 激光效应; 激光损伤; 光学表面; 波纹

中图分类号: TN246

文献标识码: A

强激光对光学元件的损伤,极大地限制了高功率激光器的发展。因此,对光学元件的激光损伤及加固研究具有重要意义。在激光损伤效应研究中,被激光辐照的样品上有时会出现光栅样损伤图案或者波纹,这种现象被称为激光引起的周期表面结构(LIPSS)。Birnbaum 于 1965 年研究了在脉冲红宝石激光系统中,调 Q 用的各种半导体材料表面发生光栅样损伤图案^[1]。从那时起直到现在,相似的条纹也在其它激光辐照实验中出现^[2-6]。一旦激光在元件表面形成了这种周期结构,就会大大影响激光束与表面的相互作用情况。因此,在许多实际应用中,必须考虑可能发生的表面波纹状损伤现象。通过研究波纹损伤产生的规律和机理,可以反过来用于研究抑制光学表面这种波纹损伤的产生,对提高光学表面抗激光性能研究有较大应用价值。但从已有文献看,波纹出现的规律很难掌握,如波纹的形状、周期、取向等变化较大,对波纹现象也很难用统一的理论解释,一般通过表面光散射、干涉和衍射理论来解释^[7,8];还有用热和流体力学理论来解释^[9,10]。总的可分为光学模型和非光学模型两种。光学模型充分考虑了激光的相干性、偏振性以及表面形貌对能量沉积的影响,而不是像许多激光与材料相互作用研究那样,将激光仅作为能够对材料表面局部加热的“热枪”。光学模型认为在某些情况下能量沉积在空间上可能是非均匀的,而周期能量沉积可能导致表面出现周期结构。我们认为这是比较合理的解释,因为非光学模型的解释意味着其它加载方式也可能在样品表面产生有规律的周期性波纹,但目前尚未看到有关文献报道。本文将对光路系统衍射所导致光学元件损伤的现象进行研究。

1 实验装置

如图 1 所示,一束波长 1.06 μm 、半高宽 10ns 的脉冲 Nd:YAG 激光辐照在样品上。样品为在抛光的 K9 玻璃上真空蒸镀一层厚度约 100nm 的铜膜镜面。

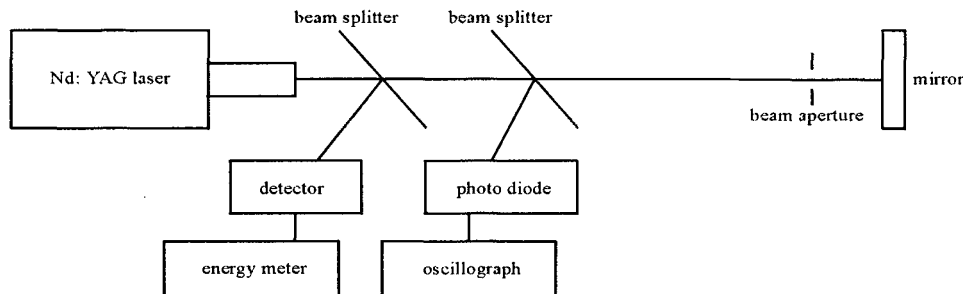


Fig. 1 Experimental setup

图 1 实验装置简图

* 收稿日期:2002-08-27; 修订日期:2002-12-22

基金项目:中国工程物理研究院基金资助课题(20020424);国家 863 计划项目资助课题

作者简介:王伟平(1970-),男,副研究员,博士生,主要从事强激光效应研究;绵阳 919-113 信箱。

光路中加入直径为 1mm 的小孔光阑,用于限制光斑大小以及选择光束中间均匀的部分辐照样品。脉冲 Nd:YAG 激光器分为振荡级和放大级,采用脉冲氙灯泵浦,电光调 Q,输出光束为线偏振光,最大单脉冲能量约 1J。激光器采用超高斯腔镜设计,输出光束的光强分布为“平顶”型。在实验前,用光束分析仪(Spiricon 公司生产的 PYROCAM-I 型)测量了激光束通过小孔光阑前的光强分布,典型的光束分布如图 2 所示,可以看到,激光器输出光束的中间部分光强分布很均匀。通过分束镜-探测器-能量计实时测量了每一发激光的输出能量,并通过分束镜-光电管-示波器实时测量了激光波形,典型的激光波形如图 3 所示。实验时,还用一束 He-Ne 激光(632.8nm)作为探测光,测量了损伤区反射率的变化。He-Ne 激光经透镜聚焦在 Nd:YAG 激光辐照的区域,光斑尺寸约 1mm,近似覆盖了 Nd:YAG 激光辐照区,反射光经光电管-示波器记录。

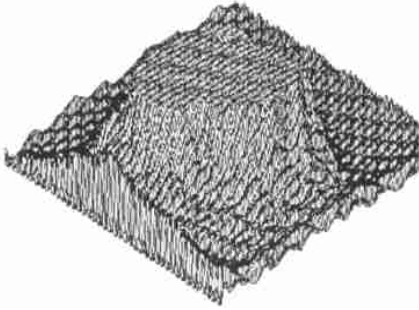


Fig. 2 Laser beam intensity profile
图 2 光强空间分布

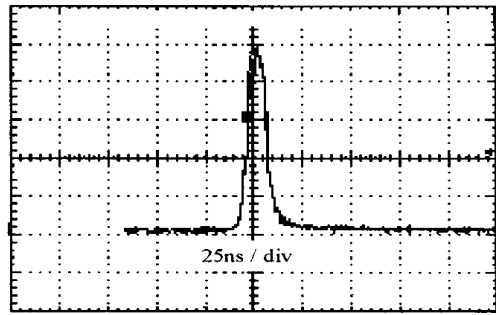


Fig. 3 Laser wave shape
图 3 激光波形

2 实验结果

激光辐照铜膜镜面后,损伤区形貌通过光学显微镜观察。对于较低激光能量密度下镜面发生的氧化、起皮、小泡小坑和较高能量密度下的汽化、烧蚀等损伤现象已有较多文献,本文不再研究这些问题。本文主要研究能量密度在损伤阈值附近时样品表面的损伤现象。典型的显微镜照片如图 4 所示。图 4 中亮的部分是未被激光损伤的区域,暗的部分是激光损伤区,大部分暗点是材料本身的缺陷。实验样品尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的圆片,每发实验激光辐照样品上不同的区域,每个样品上进行了 4~5 发实验。由图 4 可见,在一定的能量密度范围内,光斑区内出现了有规律的周期性环状损伤图案,光斑边缘的损伤环最明显,见图 4(b),图 4(c),图 4(d)。随着能量密度的增加,损伤环带变宽,未损伤的环带变窄,当平均能量密度为 $1.8\text{J}/\text{cm}^2$ 时,光斑区铜膜全部损

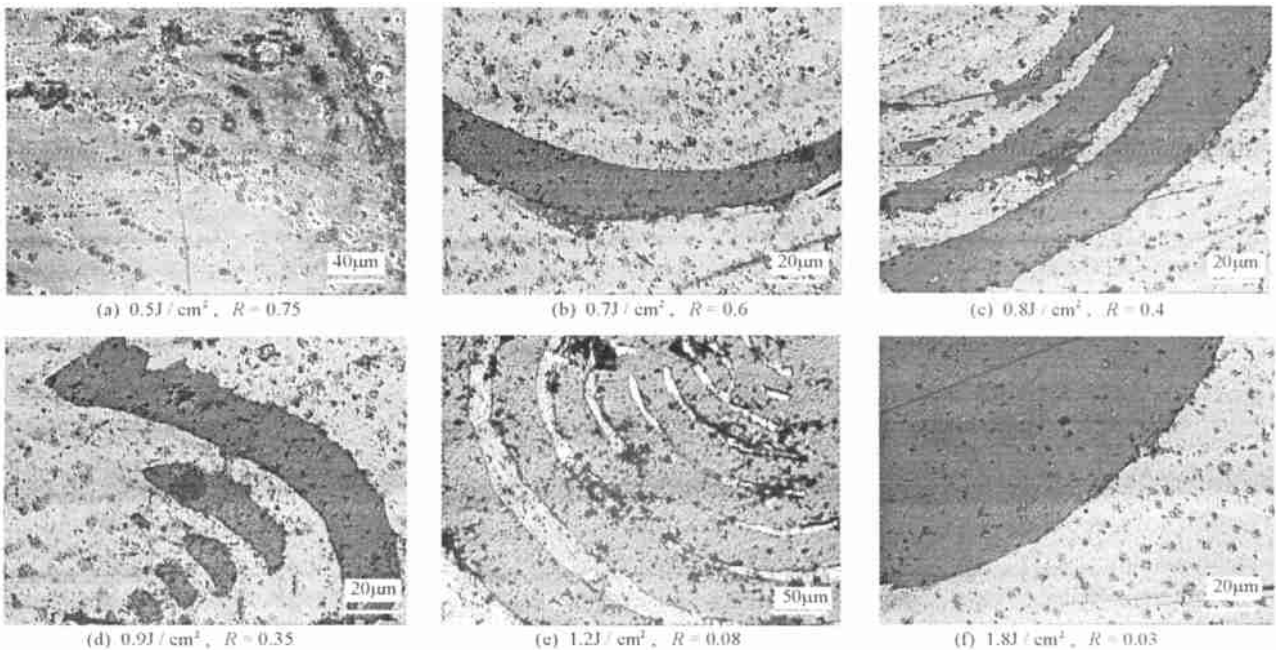


Fig. 4 Optical micrographs of damage on the surface of copper mirror after laser irradiation
图 4 铜膜镜面激光损伤显微照片

伤,但基底材料(K9 玻璃)未损伤,光斑区环状图案消失。由于每发实验都要换一个激光辐照区,即使对同一个样品,也会产生一定的实验误差,但从总体上来看,还是有一定的规律。越靠近光斑中心位置,波纹越密,即周期越小,波纹周期平均约 45μm。用连续波 He-Ne 激光(632.8nm)作为探测光,测量了损伤区反射率 R 的变化。当样品上光斑区均出现环状波纹损伤时,反射率下降为 0.08,表明镜面已严重损伤,见图 4(e)。

3 分析讨论

由图 4 铜膜镜面激光损伤显微照片可明显看出,周期性环状损伤条纹是由于一部分环带被激光损伤,而间隔期间的另一部分环带未被激光损伤形成的,被损伤的环带与未被损伤的环带边界非常明显。这很容易使人想到作用在镜面上的光也可能具有这样的分布,因为光的干涉、衍射就可能形成这样的分布。若用热和流体力学理论来解释,则表面一般先是全部熔融,然后重新分布,这与实验现象不符合。我们认为光学模型抓住了激光有别于其他光源或热源的非相干性,一部分的波纹现象是可以通过光的干涉和衍射理论来解释的,关键的问题是找出干涉和衍射产生的原因。当然,在诸如激光加工中所产生的不大规则的条纹是由于熔融液体温度梯度造成的流动产生的。本文实验中原本用于限制光斑大小和选择激光束均匀部分的小孔光阑对激光产生了菲涅耳衍射,光束通过小孔光阑后的场分布 $E_2(r_2, z)$ 可以通过柯林斯公式和 ABCD 传输矩阵得到

$$E_2(r_2, z) = \frac{ik}{B} e^{-ikz} \int_0^a E_1(r_1, 0) J_0\left(\frac{kr_2 r_1}{B}\right) e^{-\frac{ik}{2B}(Ar_1^2 + Dr_2^2)} r_1 dr_1 \quad (1)$$

式中:波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长; a 为小孔半径; J_0 为零阶贝塞尔函数。ABCD 传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,可以得到任意位置处的强度分布 $I(r_2, z)$,可写为

$$I(r_2, z) = E(r_2, z) E^*(r_2, z) = \left(\frac{k}{z}\right)^2 \left| \int_0^a E_1(r_1, 0) J_0\left(\frac{kr_2 r_1}{z}\right) e^{-\frac{ik}{2z}r_1^2} r_1 dr_1 \right|^2 \quad (3)$$

将均匀平面波激光参数 $\lambda = 1.06\mu\text{m}$, $a = 0.5\text{mm}$ 代入(3)式计算,由图 5(a)、图 5(b)分别给出 $z = 10, 15\text{mm}$ 处对应的激光强度相对分布。而实验时,样品距小孔光阑的距离 z 大约 10mm,所以光强分布接近图 5(a)。由于光强分布对距离 z 很敏感,所以实验改换发次过程中距离 z 的变化导致样品表面实际光强分布与理论估算会有一些误差。

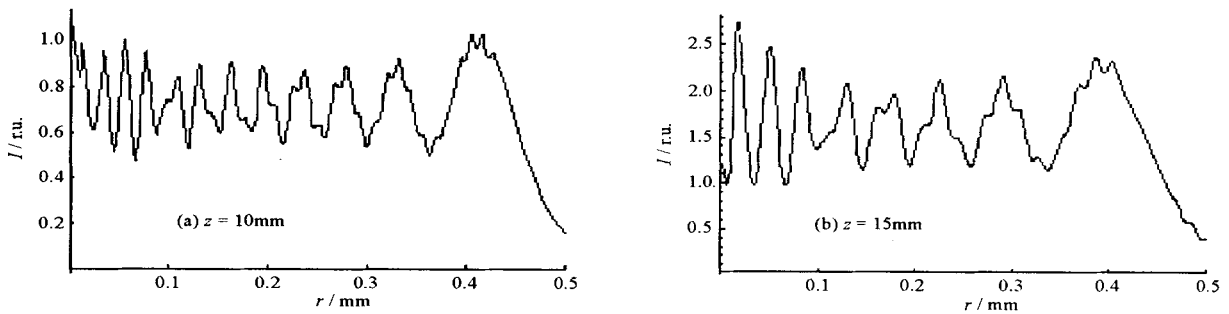


Fig. 5 Simulated laser intensity distribution on the surface of copper mirror

图 5 样品表面光强分布理论结果

由图 5(a)可见,由于光路中小孔光阑的菲涅耳衍射作用,光斑内的光强变成周期性环状分布,越靠近光斑内部,环的密度越大,周期越小,平均周期约 40μm,这些现象与实验比较符合,如图 4(e)所示。靠近光斑外部的环带较宽,包含的激光能量较多,因此造成的损伤环带也较宽,损伤明显,图 4(b),图 4(c),图 4(d)。由图还可见,光强的最大值约为是最小值的 2 倍。对于平均光强或能量密度未达到样品破坏阈值的光束,经衍射后,一些环带上的能量密度达到了样品的激光破坏阈值,则这些环带首先被破坏,样品上就形成了环形波纹状损伤图案。当然,还要考虑热扩散的影响,激光作用时间内热扩散的距离 l_{th} 的量级可由下式估计

$$l_{th} = \sqrt{\kappa t} \quad (4)$$

式中, κ , t 分别为材料的热扩散率和激光出光时间。将铜的热扩散率(约 $1.059\text{cm}^2/\text{s}$)和激光出光时间 10ns 代入(4)式,得 l_{th} 约为 $1.03\mu\text{m}$,远小于光强波纹状分布的周期,即在短脉冲激光作用下,热扩散的影响远不可能

将这样的损伤环带连接起来。热扩散的影响可以忽略。随着总的激光能量密度的增加,光束分布中光强或能量密度超过样品激光损伤阈值的环带区域不断变宽,直至接近所有区域的光强或能量密度都超过了损伤阈值,此时,膜层完全损伤,环状损伤图案不再出现,如图 4(f) 所示。

4 总 结

本文通过用脉冲激光 ($1.06\mu\text{m}$, 10ns) 辐照铜膜镜面样品,用光学显微镜观察损伤区形貌变化,发现在激光辐照区出现了有规律的环形波纹状损伤图案。越靠近光斑内部,环的密度越大,周期越小,平均周期约 $45\mu\text{m}$ 。增加辐照激光的能量密度,波纹中的损伤带增宽,未损伤区变窄,直至膜层完全损伤,波纹消失。通过对光路系统分析,认为是镜面前的小孔光阑对激光产生了菲涅耳衍射,使得在样品表面光强分布变成周期性环形分布。在极短的作用时间内,损伤图案依赖于光强分布。对于平均光强或能量密度未达到样品破坏阈值的光束,经衍射后,一些环带上的能量密度达到了样品的激光破坏阈值,则这些环带瞬间被破坏,样品上就形成了环形波纹状损伤图案。依据实验参数,用柯林斯公式对样品表面的光强分布进行了计算,解释了损伤波纹的周期和其它现象。

参考文献:

- [1] Birnbaum M. Semiconductor surface damage produced by ruby laser[J]. *J Appl Phys*, 1965, **36**:3688.
- [2] Young J F, Preston J S, Van Driel H M, et al. Laser induced periodic surface structure. II. Experiments on Ge, Si, Al, and brass[J]. *Phys Rev*, 1983, **27**:1155.
- [3] Serna K, Afonso C N, Petford A K, et al. Structural ripple formation in Ge/Sb multilayers induced by laser irradiation[J]. *Applied Physics A*, 1994, **58**:197—202.
- [4] Campbell E E B, Ashkenasi D, Rosenfeld A. Ultra-short-pulse laser irradiation and ablation of dielectrics[J]. *Materials Science Forum*, 1999, **301**:123.
- [5] Gust G K, Sigmon T W. New ripple patterns observed in excimer-laser irradiated SiO_2 /polycrystalline silicon/ SiO_2 structures[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **70**(26):3552.
- [6] Yu J J, Lu Y F. Laser engineered rippling interfaces for developing microtexture, adherent coating and surface coupling[A]. SPIE[C]. 1999, **3898**:252.
- [7] Sigman A E, Fauchet P M. Stimulated wood's anomalies on laser-illuminated surfaces[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, **22**(8):1384.
- [8] Singh P A, Kapoor A, Tripathi N K, et al. Laser damage studies of silicon surfaces using ultra-short laser pulses[J]. *Optics and Laser Technology*, 2002, **34**:37—43.
- [9] 赖祖武, 谈效华, 赖宗力, 等. 激光辐照薄膜镜面产生损伤现象的研究[J]. 强激光与粒子束, 1992, **4**(2):255. (Lai Z W, Tan X H, Lai Z L, et al. Laser-induced ripple patterns on thin film mirror surface. *High Power Laser and Particle Beams*, 1992, **4**(2):255)
- [10] Lu Y F, Yu J J, Choi W K. Theoretical analysis of laser-induced periodic structures at silicon-dioxide/silicon and silicon-dioxide/aluminum interfaces[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(23):3439.

Research of pulsed laser induced ripple damage on the surface of copper film mirror

WANG Wei-ping^{1,2}, LI Bai-da¹, LIU Cang-li², ZHANG Da-yong², LUO Yong-quan², GU Zhuo-wei²

(1. Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-113, Mianyang 621900, China)

Abstract: The damaged spot of copper film mirror irradiated by pulsed Nd:YAG laser is analyzed using an optical microscope. The periodic damage ring is found at the laser irradiation spot, the average spacing of these rings is about $45\mu\text{m}$. The damage ring can be observed obviously only in the periphery of the laser spot under lower laser energy density; as laser fluence increases, the periodic damage rings cover the whole laser spot; under higher laser energy density, the whole film is damaged and the rings disappear. A Fresnel diffraction model is used to explain the appearance of these rings. The laser beam is diffracted by the aperture in the optic path, laser intensity distribution at the copper film mirror becomes periodic rings and damage ripple pattern forms instantly with the laser ablation and evaporation. The laser intensity distribution at the mirror surface is calculated using Collins formula, with which the period of damage rings and other phenomena can be explained.

Key words: Laser effects; Laser damage; Optical surface; Ripple