

文章编号 : 0258-7025(2001)12-1089-04

用光偏转技术研究铜的激光烧蚀阈值^{*}

于鸿楠 张德勇 许龙江 戚诒让

(青岛海洋大学电子工程系 青岛 266003)

提要 用基于光偏转原理的三种方法(它们分别利用光声信号的能量、渡越时间及光偏转信号正峰峰值与入射激光能量密度的关系)测量了 Cu 的烧蚀阈值,并对这三种方法进行了比较,提出了它们各自的适用范围。

关键词 光偏转原理,入射激光能量密度,烧蚀阈值

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

Study on the Laser Ablation Threshold of Copper Using Laser Beam Deflection Technique

YU Hong-nan ZHANG De-yong XU Long-jiang QI Yi-rang

(Department of Electronic Engineering, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

Abstract Based on the principle of probe beam deflection, three methods have been used to measure the ablation threshold of Cu. The laser ablation threshold of the solid is determined according to the variation of the energy and transit time of photoacoustic signal and the relation of the positive amplitude deflection signals to the laser fluence. A comparison of these methods is made and the conditions for their applications are given.

Key words principle of probe beam deflection, incident laser fluence, ablation threshold

固体的激光烧蚀阈值是指固体被烧蚀时入射脉冲激光的临界能量密度或功率密度,它在实际应用中是一个重要的参量。近些年来,已有许多学者用不同的方法^[1~4]对此进行了研究。本文介绍基于光偏转原理^[5]的三种方法对 Cu 的激光烧蚀阈值的测量结果。

光偏转检测方法就是用一探测光束(通常是 He-Ne 激光束)平行于固体样品表面通过,当样品周围的媒质中因激光与样品的相互作用而出现折射率梯度时,探测光束在通过折射率不均匀的区域时,会发生偏转。偏转信号可以由位置传感器直接测出来,然后根据偏转信号的变化来确定样品的激光烧蚀阈值。

为 $1.06 \mu\text{m}$,半峰值全宽度 FWHM 约为 8 ns)经衰减片、光阑和尼科耳棱镜后,被透镜(焦距约为 5

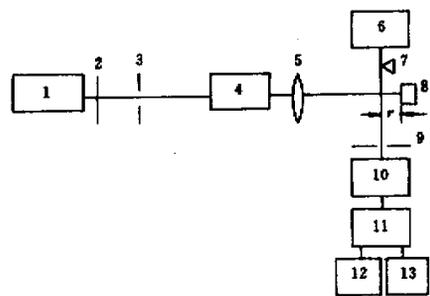


图 1 测量系统框图

1: Nd:YAG 激光器; 2: 衰减片; 3: 光阑; 4: 尼科耳棱镜; 5: 透镜; 6: He-Ne 激光器; 7: 刀刃; 8: 样品; 9: 狭缝; 10: 位置传感器; 11: TCH 暂态信号记录仪; 12: 示波器; 13: 微机

Fig. 1 Set-up of measuring system

1: Nd:YAG laser; 2: attenuator; 3: aperture; 4: Nicol's prism; 5: lens; 6: He-Ne laser; 7: knife edge; 8: sample; 9: slit; 10: position sensor; 11: TCH transient converter; 12: oscilloscope; 13: microcomputer

1 测量方法和原理

测量系统框图如图 1 所示。

Q 开关 Nd:YAG 激光器发射的脉冲激光(波长

^{*} 国家自然科学基金(编号:19774036)资助项目。

收稿日期:2000-10-08;收到修改稿日期:2000-12-05

cm)聚焦到样品表面上。光束轴沿表面法向。加光阑是为了选取激光束能量分布较均匀的中心部分,其直径约为 4 mm。为了使 He-Ne 光束中心轴尽可能靠近样品表面,用刀刃遮挡住靠近样品一侧的光束边缘部分。狭缝则可以防止杂散光进入位置传感器,减少杂散光的干扰。He-Ne 探测光束的偏转由位置传感器测量,偏转信号经放大后由 TCH 瞬态记录仪记录,然后输出至示波器和微机,分别获得模拟信号和数字信号。实验采用 1-on-1 方式,即在样品表面上同一位置只照射一次,而不管这一点发生损伤与否。

Nd:YAG 激光器发射的脉冲激光具有线偏振性。实验时,转动尼科耳棱镜,即可获得能量连续可变的脉冲激光,而激光脉冲的波形无明显变化。样品与透镜间的距离保持不变,以保证用不同方法测量烧蚀阈值时,样品表面辐照斑的面积保持不变,使测量结果更具可比性。

当脉冲激光照射样品表面时,由于激光与物质相互作用,在样品周围气体中将激发机械波。若入射激光能量密度 F 低于样品材料的烧蚀阈值 F_{th} 时,在样品表面辐照区邻近一薄层气体将因受热而迅速膨胀,从而在周围气体中激发脉冲声波。当脉冲声波通过探测光束所在区域时,由压力梯度引起的折射率梯度,使探测光束发生偏转。由于折射率梯度正比于压力梯度,所以当机械波在传播过程中,通过探测光束所在区域时,探测光束先向靠近样品一侧偏转,再偏向远离样品一侧。此时,偏转信号具有正负幅度大致相等的双极性波形^[6]。当入射激光能量密度 F 高于烧蚀阈值 F_{th} 时,从样品表面辐照区喷射出烧蚀物质,在周围气体中激发冲击波。当冲击波通过探测光束所在区域时,也将使探测光束发生偏转。由此产生的偏转信号波形接近单极性波形。图 2 给出了典型的脉冲声波和冲击波所引起的光偏转信号。图 2(a)(b)中左边第一个信号是脉冲激光在样品表面散射所引起的散射光信号。

基于上述原理,可提出以下三种确定阈值的方法:

1) 入射激光能量密度低于和高于样品的烧蚀阈值时,样品周围的气体中分别被激发出声波和冲击波,二者所包含的能量不同。测量样品烧蚀阈值的第一种方法,就是根据激光在样品周围气体中激发的机械波所包含的能量随入射激光能量密度的变化来确定阈值。Petzoldt 等^[7]用这种方法测量了光学薄膜 MgF_2 、 CaF_2 和 LiF 的损伤阈值。入射激光

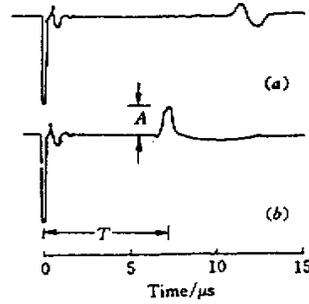


图 2 光偏转信号示例(采样时间为 $0.1 \mu s$)

(a) 脉冲声波产生的光偏转信号 (b) 冲击波产生的光偏转信号

Fig. 2 Samples of probe beam deflection signals

(sampling time is $0.1 \mu s$)

(a) probe beam deflection signal produced by pulsed acoustic wave;

(b) probe beam deflection signal produced by shock wave

能量密度 F 和光声能量 $E^{[7]}$ 分别由(1)(2)式给出

$$F = E_0/S_0 \quad (1)$$

其中 E_0 为入射到样品表面的激光能量,可由能量计测得; S_0 为样品表面上辐照斑面积,可由在光学显微镜下测得的辐照斑直径计算得出

$$E \propto \int_{\tau} dt \left(\int_0^t S dt' \right)^2 \quad (2)$$

其中 S 为位置传感器的输出信号, τ 为偏转信号持续时间,二者可以从微机记录的数字信号中得到。用式(2)计算光声信号所包含的能量时,必须满足冲击波波速接近于空气中声速的条件。

2) 根据声波和冲击波从辐照区到探测光束的传播时间不同来确定阈值。Matthias 等^[9]用这种方法测量了 Ni 薄膜(石英基底)的烧蚀阈值。由于脉冲激光到达样品表面和声波(或冲击波)产生的时间差远小于 $0.1 \mu s$,故可以认为声波(或冲击波)所引起的光偏转信号和散射光信号之间的时间间隔等于声波(或冲击波)从样品表面传播到探测光束处所需的时间(即渡越时间 T ,见图 2)。

因为冲击波在初始阶段以超声速传播^[8],它与声波传播相同距离所需时间必然有差别。因此可以推断,随入射激光能量密度的逐渐增大,渡越时间 T 将在激光能量密度等于样品的烧蚀阈值处发生突变。这样,由渡越时间与入射激光能量密度的关系曲线的突变点,即可确定样品的烧蚀阈值。这种方法的测量结果可以精确到光偏转信号的采样时间($0.1 \mu s$)。

3) 方法 1) 中曾指出,由于激光照射而在样品周

围气体中激发出的声波和冲击波所包含的能量不同,那么二者在传播过程中通过探测光束所在区域时,所引起的探测光束偏转信号的幅值必然不同。Matthias^[9]用测量光偏转信号的峰-峰值变化的方法测量了 Ni 薄膜的烧蚀阈值。第三种方法正是根据光偏转信号正峰值 A (见图 2 所示)随入射激光能量密度的变化来确定阈值。

2 测量结果与讨论

用上述三种方法测量了金属 Cu(型号为 H62,样品主要成分包括 60.5%~63.5% 的 Cu,剩余物质为 Zn,杂质不超过 0.5%)的激光烧蚀阈值,测量结果如表 1 所示。样品表面的辐照斑面积约为 0.2 mm²。其中,样品 1 和 2 的表面粗糙度相近,约为 $R_a = 0.01 \mu\text{m}$,样品 3 的表面粗糙度约为 $R_a = 0.06 \mu\text{m}$ (R_a 为表面粗糙度高度参数轮廓算术平均偏

差)。

表 1 Cu 样品的激光烧蚀阈值

Table 1 Laser ablation thresholds of Cu samples				
Sample	Threshold / J/cm^2	$F_1(E-F)$	$F_2(T-F)$	$F_3(A-F)$
1		6.86	1.42	2.27
2		4.83	1.48	2.16
3		2.60	0.12	0.17

表中 F_1, F_2, F_3 分别为用方法 1) 2) 3) 测量的结果。图 3 给出了对应于三种方法的数据点及关系曲线,其中图 3(a) 对应于样品 2 的光声能量 E 与激光能量密度 F 的关系曲线(由该曲线确定出阈值 F_1)。图 3(b)(c) 分别对应于样品 1 的渡越时间 T , 正峰值 A 与激光能量密度的关系曲线(分别确定了阈值 F_2 和 F_3)。

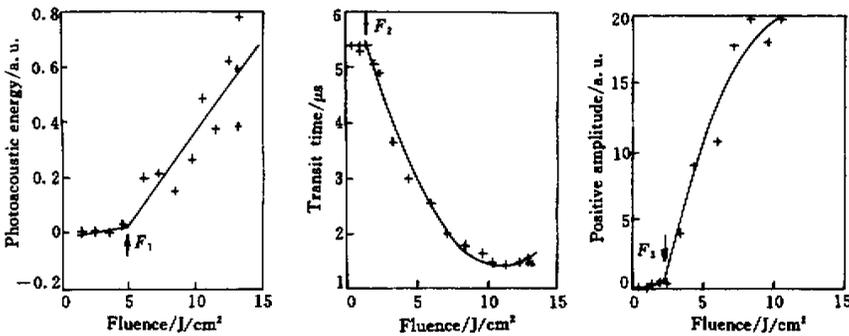


图 3 光声能量(a)、渡越时间(b)及正峰值(c)与入射激光能量密度的关系曲线

Fig. 3 Energy(a), propagation time(b) and amplitude(c) of photoacoustic signals versus laser fluence

从表 1 中所列数据可以看出,用第一种方法测量的阈值 F_1 比用第二和第三种方法测量的阈值 F_2 和 F_3 大得多。而实际上对于样品 1,在入射激光能量密度为 $3.34 \text{ J}/\text{cm}^2$ 时就已经出现了冲击波形,如图 4 所示。因此可以认为,用第一种方法确定的阈值比实际的激光烧蚀阈值大,用第二、三种方法确定的阈值则比较接近实际值。用(2)式计算光声信号所包含的能量时,其中偏转信号持续时间 t 的确定有一定的误差,它经过平方后又被放大,从而导致了测量结果误差较大。从图 3(a) 也可看出,实验数据离散度较大,而图(b)(c) 中的数据点的离散度则比较小。

此外,对于粗糙度不同的样品,它们的激光烧蚀阈值也有差别,表面较粗糙的样品 3 的阈值比相对光滑的样品 1 和 2 的阈值低。这主要是因为,对于

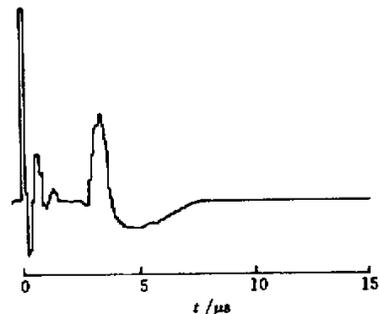


图 4 入射激光能量密度为 $3.34 \text{ J}/\text{cm}^2$ 时冲击波产生的光偏转信号

Fig. 4 Probe beam deflection signal produced by shock wave for laser fluence of $3.34 \text{ J}/\text{cm}^2$

相同的入射激光能量,粗糙的样品表面吸收的激光能量比光滑的表面吸收的多,因此,较低的入射激光能量密度就可以在粗糙样品周围的气体中激发出冲击波,即表面粗糙的样品的激光烧蚀阈值较低。

另外,由于冲击波在近距离处的传播速度大于声速,则它传播相同的时间明显小于声波传播时间,且相应的光偏转信号的正峰值也明显大于声波所引起的光偏转信号的正峰值,故在用第二、三种方法测量阈值时,参照文献[8]中的结果,选择 r 保持在1.5 mm左右(r 见图1所示)。而在远距离处(即在弱冲击波极限下),冲击波波速趋近于声速,只有在这种情况下,才可以利用公式(2)近似计算冲击波所包含的能量,实验测出此时的距离约为 $r \geq 6$ mm。

实验时,我们在 $r \approx 6.5$ mm处用第一种方法确定了阈值 F_1 ,在 $r \approx 1.6$ mm处用第二、三种方法分别确定了阈值 F_2 和 F_3 。Petzoldt等^[7]用第一种方法测量固体激光烧蚀阈值时,没有给出具体的测量距离(r 值),但指出是声行为;而Matthias等^[9]根据渡越时间的变化来确定阈值时,探测光束与样品表面的垂直距离为3 mm。实验中应注意对于不同的测量方法,选择不同的测量距离。

参 考 文 献

- 1 Y. Jee, M. F. Becker, R. M. Walser. Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(3): 648~659
- 2 A. P. Schwarzenbach, H. P. Weber, J. E. Balmer. Laser damage test on Balzers thin film coatings. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21): 3764~3766
- 3 A. A. Said, T. Yia, A. Dogariu *et al.*. Measurement of the optical damage threshold in fused quartz. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(18): 3374~3376
- 4 P. E. Dyer, J. Sidhu. Spectroscopic and fast photographic studies of excimer laser polymer ablation. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(9): 4657~4663
- 5 C. Stauter, P. Gérard, J. Fontaine *et al.*. Laser ablation acoustical monitoring. *Applied Surface Science*, 1997, **109/110**: 174~178
- 6 Qi Yirang, Zhang Deyong. Acoustic pulse excited in air during illuminating of pulsed laser on the surface of solids. *Technical Acoustics*, 1997, **16**(3): 111~113
- 7 S. Petzoldt, A. P. Elg, M. Reichling *et al.*. Surface laser damage thresholds determined by photoacoustic deflection. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(21): 2005~2007
- 8 Zhang Deyong, Yu Hongnan, Xu Longjiang *et al.*. Study on the shock wave produced by a metal ablated by pulsed laser in air. *Journal of Ocean University of Qingdao* (青岛海洋大学学报), 2000, **30**(4): 697~700 (in Chinese)
- 9 E. Matthias, M. Reichling, J. Siegel *et al.*. The influence of thermal diffusion on laser ablation of metal films. *Appl. Phys. A*, 1994, **58**: 129~136