

文章编号: 1001-3806(2003)06-0497-03

潮湿环境对黄铜烧蚀阈值的影响

秦 华 郑荣儿 杨爱玲

(中国海洋大学物理系光学光电子实验室, 青岛, 266071)

摘要: 采用光偏转法测量了 3 种粗糙度的黄铜样品在潮湿环境与干燥环境下的激光烧蚀阈值。结果表明, 两种烧蚀环境下, 表面粗糙度越大, 烧蚀阈值越低; 同一粗糙度时, 潮湿环境比干燥环境烧蚀阈值低。说明粗糙表面及潮湿表面对光的吸收率大, 通过同一泵浦能量密度下冲击波渡越时间的不同而得到证明。

关键词: 烧蚀阈值; 黄铜; 光偏转法; 潮湿环境; 粗糙度; 渡越时间

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

Influence of moist environment on the ablation threshold of copper

Qin Hua, Zheng Ronger, Yang Ailing

(Optics & Optoelectronics Laboratory, Department of Physics, Ocean University of China, Qingdao, 266071)

Abstract: Based on the principle of probe beam deflection, the ablation thresholds of three copper samples with different roughness are measured in moist and dry environment. The results show that, in the two kinds of environment, the larger the roughness, the lower the ablation threshold. When the roughness and the pump energy fluence are all equal, the ablation threshold is lower in the moist environment than in the dry environment. This phenomenon indicates that the rough and moist surface has big absorption coefficient to pump energy, which can be proved by the different transit time in the case of the same pump energy fluence.

Key words: ablation threshold; copper; probe beam deflation; moist environment; roughness; transit time

引 言

材料表面的激光损伤问题一直是高功率激光系统、材料的激光处理及激光微加工中一项关键的技术问题^[1~8]。因为激光对金属反射镜、光学膜层、光学晶体等材料和器件的表面损伤限制了它们的使用寿命, 也限制了激光输出功率的进一步提高。因此, 研究激光对各种材料的表面损伤及机理, 对大功率脉冲激光系统的设计及其应用有重要的理论意义和实用价值, 对光学表面的设计、制造具有指导意义, 而且对其使用环境及其保护都具有实际意义。

引起激光表面损伤除激光本身的性质外, 还与样品表面性质及样品所处的环境密切相关^[2, 5~8]。大功率激光器的元器件表面的污染物或吸附物引起了激光损伤阈值的降低^[2, 7]。光学元器件制造过程中表面杂质聚合物能使某一特定波长或某一特定的光学元器件的某些部位的烧蚀阈值降低。水分子的吸附是光学元器件表面最常见的污染物, 也有一些

间接的证据证明潮湿度同激光烧蚀阈值的关系, 在经过几次低于激光烧蚀阈值能量的照射后, NaF 薄膜的烧蚀阈值几乎增加了 1 倍^[2], 很明显这是由于低于激光烧蚀阈值能量的解吸附作用, 使光学元器件表面的吸附物(主要是水分子)祛除了, 也即光学元器件的表面干净了。

文献[9]中测量了 Cu 的激光烧蚀阈值, 本文中采用光偏转法测量了 3 种粗糙度的黄铜样品(型号为 H62, 主要成分 Cu: 60.5%~63.5%, 其余物质为 Zn, 杂质不超过 0.5%) 在潮湿环境与干燥环境下的激光烧蚀阈值。下面将介绍实验原理及结果。

1 实验原理简介

泵浦脉冲光垂直样品表面入射时, 由于激光与样品的相互作用, 在样品表面附近的媒质中产生的影响有: (1) 使媒质的温度发生变化, 产生温度梯度; (2) 产生压力波从而使媒质中出现密度梯度; (3) 样品表面射出的物质进入媒质。3 种情况都会在样品表面附近形成一个瞬时折射率不均匀区域, 即产生折射率梯度。当一束平行于样品表面的探测光通过此瞬时折射率不均匀区域时, 探测光会发生偏转。

作者简介: 秦 华, 男, 1964 年 11 月出生。博士研究生。主要从事激光消融及激光器件方面的研究工作。

收稿日期: 2003-01-27; **收到修改稿日期:** 2003-04-30

与上述3种影响对应的光偏转分别为光热光偏转、光声光偏转及烧蚀产物引起的光偏转。光热光偏转的有效作用距离大约是一个热扩散长度(在本实验条件下约为 $1\mu\text{m}$);光声光偏转是由于样品表面分子吸收泵浦光能量,样品自身相当于一个“热活塞”,引起表面邻近气体被加热,受热气体膨胀在周围媒质中产生声波。当入射脉冲激光的能量密度大于样品的烧蚀阈值时,样品表面受辐照区喷射烧蚀物质,喷射物推动媒质前方,媒质被压缩,从而在周围媒质中激发出冲击波。这种由声波或冲击波引起的折射率不均匀分布而发生的偏转通常称为光声光偏转。当入射到固体表面的激光能量密度远大于材料的烧蚀阈值时,表面受照区被强烈烧蚀、汽化,同时伴有等粒子体,等粒子体也会使探测光发生偏转,但探测光束与样品表面的垂直距离大于热扩散长度,且样品表面尚未出现等粒子体所特有的亮斑时,探测光束的偏转主要为光声光偏转效应。

文献[9]中采用3种方法测量了Cu的激光烧蚀阈值:(1)依据激光在样品周围气体中激发机械波所包含的能量随入射激光能量密度的变化确定阈值;(2)依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;(3)依据声波与冲击波使探测光束偏转信号的幅值不同确定阈值。其实验结果表明,第(2)、(3)两种方法测得Cu的烧蚀阈值与实际值较接近。本实验中采用了方法(2),其测量结果可以精确到光偏转信号的采样时间($0.1\mu\text{s}$),试验装置与文献[9]、[10]中的相同。

2 实验结果

图1动态地显示了探测光偏转信号随泵浦能量密度的变化过程。a信号是脉冲激光在样品表面散

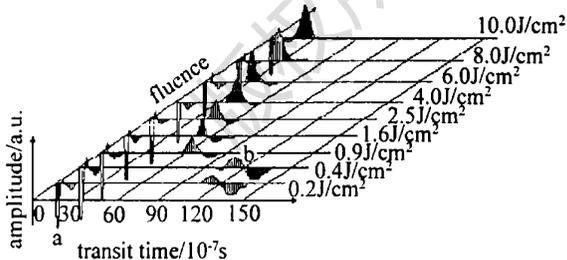


Fig. 1 Pictorial demonstration of probe beam deflection signal as a function of pump energy fluence

射时所引起的的散射光的信号, b信号则表示脉冲声波或激波所引起的偏转信号。忽略脉冲激光到达样品表面和声波(或冲击波)产生之间的时间差(远小于 $0.1\mu\text{s}$),则可认为声波或冲击波从样品表面传播到探测光束所需要的时间为a, b信号的时间间

隔,即把这段时间间隔称之为渡越时间。入射激光能量密度 F 低于样品的烧蚀阈值 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,样品表面离探测光距离不变,声波在空气中的传播速度为 344m/s ,因而入射激光能量密度 F 低于样品的烧蚀阈值 F_{th} 时,渡越时间不变。由图知脉冲声波的渡越时间为 $120\mu\text{s}$,故He-Ne光距样品 4.1mm 。当入射激光能量密度 F 高于烧蚀阈值 F_{th} 时,在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,冲击波和脉冲声波所形成的探测光束的偏转信号有所不同,脉冲声波为双极性,冲击波近似为单极性。其传播速度高于声速,故其渡越时间小,因此可以推断,随着入射激光能量密度的逐渐增大,渡越时间必然在激光能量密度等于样品的烧蚀阈值附近发生突变,这个突变点所对应的激光能量密度即为样品的烧蚀阈值,即根据声波和冲击波的渡越时间不同来确定阈值。由图可知,当入射光通量从 0.4J/m^2 增大到 0.9J/m^2 时,光偏转信号渡越时间发生突变,这说明烧蚀阈值在 0.4J/m^2 与 0.9J/m^2 之间。烧蚀能量愈大其冲击波的传播速度愈快,传播同样的距离所用的时间就愈少,反之所用的时间就多。文献[11]中测量了在 $r = (0.51 \sim 1.91)\text{mm}$ 处的冲击波的平均速度大约是 2800m/s 到 800m/s 。Matthias等人[12]用这种方法测量了Ni薄膜(石英基底)的烧蚀阈值,由于是从TCH瞬态记录仪记录的数字信息中获得的,故可以精确到光偏转信号的采样时间 $0.1\mu\text{s}$,由此确定的烧蚀阈值精确度是比较高的。

Table 1 Comparison of ablation threshold of Cu samples with different roughness in dry and moisture environment

sample	roughness Ra / μm	ablation threshold		$F_{th1} - F_{th2}$ / ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$(F_{th1} - F_{th2})$ F_{th1} / %
		F_{th1}	F_{th2}		
Cu sample 1	0.01	1.25	1.1	0.15	12
Cu sample 2	0.04	0.14	0.10	0.04	29
Cu sample 3	0.06	0.12	0.08	0.04	33.3

F_{th1} —ablation threshold in dry environment F_{th2} — ablation threshold in moist environment

为了了解在潮湿环境下表面粗糙度对烧蚀阈值的影响,对3种不同粗糙度的黄铜样品在两种环境下的烧蚀阈值进行了测量。用干湿温度计测环境的相对湿度,其中干燥环境(用驱湿机驱湿)的相对湿

度33%，而潮湿环境是指用细喷雾器正对样品表面30cm处喷射3次时的环境，相对湿度100%，测量过程中，其它实验条件保持不变。辐照斑面积都约为 0.01mm^2 。由表1可知，同一粗糙度越大，烧蚀阈值越低；同一粗糙度样品，潮湿环境下比干燥环境下烧蚀阈值低。当粗糙度 $R_a = 0.01\mu\text{m}$ 时，潮湿环境下烧蚀阈值 F_{th} 比干燥环境下低12%； $R_a = 0.04\mu\text{m}$ ， F_{th} 降低29%； $R_a = 0.06\mu\text{m}$ 时， F_{th} 降低33.3%。这说明样品表面粗糙度大对入射光能吸收强，因而烧蚀阈值低；样品表面吸附水分子使表面

泵浦光能量的吸收率增大引起烧蚀阈值的降低，且表面粗糙度大的样品对水分子的吸附能力强，从而使烧蚀阈值进一步降低。为进一步确认潮湿环境比干燥环境中烧蚀阈值降低，实测了两种环境下冲击波渡越时间与泵浦能量的关系。3种样品在干燥环境和潮湿环境中所测得的渡越时间随能量密度变化的实验数据及其拟和曲线如图2所示，图中圆圈为干燥环境，方块为潮湿环境，平滑曲线是实验数据的二次拟和曲线，箭头所指的是渡越时间的突变点，表明此时能量密度为烧蚀阈值。

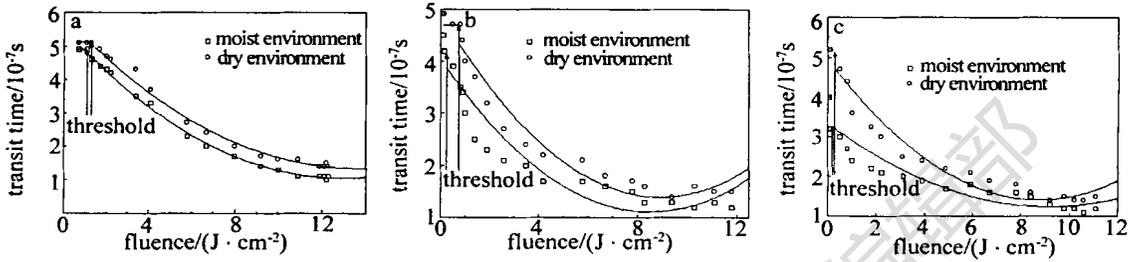


Fig. 2 Transit time as a function of pump energy fluence in dry and moist environment

a—sample 1 b—sample 2 c—sample 3

由图可知，同一泵浦能量密度下，同一样品在潮湿环境下的渡越时间(T_m)比在干燥环境(T_d)下的小，例如泵浦能量密度 $F = 6\text{J}/\text{cm}^2$ ，对粗糙度为 $0.01\mu\text{m}$ 的样品1， $T_{d1} \approx 27\mu\text{s}$ ， $T_{m1} \approx 23\mu\text{s}$ ；对粗糙度为 $0.04\mu\text{m}$ 的样品2， $T_{d2} \approx 18\mu\text{s}$ ， $T_{m2} \approx 15\mu\text{s}$ ；对粗糙度为 $0.06\mu\text{m}$ 的样品3， $T_{d3} \approx 17\mu\text{s}$ ， $T_{m3} \approx 15\mu\text{s}$ 。同一泵浦能量密度下，无论干燥环境还是潮湿环境，样品粗糙度越大，其渡越时间越小。

以上两点说明同一泵浦能量密度下，潮湿环境下烧蚀阈值低，冲击波的强度比干燥环境下强，故其速度大，当探测光离样品距离不变时，其渡越时间相应地减少。是因为表面粗糙度大对水的吸附作用强，使表面对入射激光的能量吸收增加降低因此使烧蚀阈值。

3 结论

(1) 通过实验，证明光偏转法测量烧蚀阈值是一种简单有效的方法，它不但能用来测量烧蚀阈值，而且还可用来测量冲击波的速度及与烧蚀过程相关的别的一些信息。(2) 同一种样品有相同的熔点，但是其表面粗糙度不同烧蚀阈值表现出很大的差异，主要原因就是对烧蚀光能量的吸收率的较大差异，表面粗糙度越大，对光能的吸收能力越强，烧蚀阈值越

低。(3) 由于样品对水分子的吸附作用，导致了样品对光能吸收率的增加，从而引起了烧蚀阈值的降低。同一种样品不同粗糙度潮湿环境下烧蚀阈值下降程度的不同，表现了表面状况对水分子吸附作用的不同，表面粗糙度越大，对水分子吸附作用越强。这可以从同一泵浦能量密度下冲击波渡越时间减少得到间接证明。

感谢中国海洋大学电子系戚诒让、许龙江、张德勇教授在实验工作中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Tam A C, Schroeder H J A P, 1988, 64(7): 3667~ 3671.
- [2] Allen S D, A P L, 1982, 41(5): 416~ 418.
- [3] Srenzel E, Gogoll S, Sils J *et al.* Applied Surface Science, 1997, 109/110: 162~ 167.
- [4] Alvisi M, Diulio M D, Marrone S G *et al.* Thin Solid Films, 2000, 358: 250~ 258.
- [5] 张 宏, 余承业, 陆博良. 激光杂志, 1996, 17(5): 221~ 224.
- [6] 胡文涛, 范正修, 刘立明. 中国激光, 1992, 19(11): 838~ 841.
- [7] 胡海洋, 范正修, 刘 晔 *et al.* 中国激光, 1999, 26(6): 489~ 492.
- [8] 陈德章, 张承铨, 卿光弼 *et al.* 激光技术, 1995, 19(3): 135~ 140.
- [9] 于鸿楠, 张德勇, 许龙江 *et al.* 中国激光, 2001, A28(12): 1089~ 1092.
- [10] 张德勇, 于鸿楠, 许龙江 *et al.* 青岛海洋大学学报, 2000, 30(4): 697~ 700.
- [11] Jeong S H, Gref R, Russo R E. J Phys D, 1999, 32(7): 2578~ 2585.
- [12] Matthias E. Appl Phys, 1994, A58(2): 129~ 126.