

聚焦激光束焦点光斑尺寸与样品剥离阈值的 同时测量

磨俊宇 陈钰琦 周 奇 李润华

(华南理工大学理学院物理系, 广东 广州 510641)

摘要 当聚焦激光束在焦平面上的光强分布为高斯分布时,理论推导了激光能量与激光在样品表面所烧蚀的坑洞半径的关系。以铝箔、铝反射镜和热敏相纸为样品,用显微镜测量出不同能量的脉冲激光在样品表面烧蚀的坑洞半径并通过数值拟合来实现对聚焦激光束的焦点光斑尺寸和样品剥离阈值的同时测量。对于脉宽为 15 ns、波长为 532 nm 的激光,测得铝和热敏相纸的剥离阈值分别为 2.5 J/cm^2 和 0.25 J/cm^2 。光斑尺寸和剥离阈值两个参量的测量误差均约为 $\pm 10\%$ 。该技术能够同时且简便地测量出聚焦激光束焦点的光斑尺寸和样品的剥离阈值,对研究固体与激光相互作用以及评价激光束聚焦的特性有一定的应用价值。

关键词 激光技术; 测量; 激光剥离; 光斑尺寸; 剥离阈值

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0708003

Simultaneous Determination of Spot Size of Focused Laser Beam on Focal Plane and Laser-Ablation Thresholds of Samples

Mo Junyu Chen Yuqi Zhou Qi Li Runhua

(Department of Physics, School of Science, South China University of Science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract The function of laser pulse energy to the radius of the crater produced by focused laser beam on sample's surface is derived theoretically under the condition that the fluency distribution of the focused laser beam on the focal plane is Gaussian shape. An aluminum foil, an aluminum reflection mirror and a piece of thermo-sensitive photographic paper are used as samples and the radii of the craters produced by laser beam with different pulse energies on sample's surfaces are measured with a microscope. The spot size of focused laser beam on the focal plane and the laser-ablation threshold of the sample are measured simultaneously by curve fitting. The laser-ablation thresholds of aluminum and thermo-sensitive photographic paper for 532 nm laser pulse with 15 ns pulse width are determined to be 2.5 J/cm^2 and 0.25 J/cm^2 , respectively. Measurement errors for both spot size and laser-ablation threshold are about $\pm 10\%$. It is demonstrated that the approach introduced here is able to determine spot size of the focused laser beam on the focal plane and the laser-ablation threshold of the sample conveniently and simultaneously. It is able to be used in researches on laser interaction with solid materials and to evaluate the characterization of a focused laser beam.

Key words laser technique; measurement; laser ablation; spot size; ablation threshold

OCIS codes 120.3688; 120.6650

收稿日期: 2013-12-09; 收到修改稿日期: 2014-02-13

基金项目: 国家 973 计划(2012CB921900)、国家自然科学基金(11274123、11304100)、华南理工大学中央高校基本科研业务费(2014ZZ0066)

作者简介: 磨俊宇(1991—),女,硕士研究生,主要从事光电子学与光电技术等方面的研究。E-mail: 905529962@qq.com

导师简介: 李润华(1967—),男,教授,硕士生导师,主要从事光谱学的基础与应用等方面的研究。

E-mail: rhli@scut.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

激光剥离(LA)是一种非常重要的新技术,被广泛地应用于光谱分析、材料制备、激光加工以及医学等领域。在原子光谱分析领域,激光剥离被用于固体样品的直接进样,大大简化了分析步骤或者提高了光谱分析的灵敏度^[1-3];真空环境下的脉冲激光沉积技术被广泛地应用于新材料制备^[4-6];飞秒激光烧蚀被用于制作单偏振微结构波导等光电器件^[7];紫外激光还被用于眼组织的烧蚀以治疗眼科疾病等^[8]。

激光剥离通常是利用聚焦的脉冲激光作用于固体样品表面,样品被剥离的效果与激光焦点的光斑尺寸以及样品的剥离阈值这两个重要的物理参数有关。同一样品,对于不同波长和不同脉宽的激光,其剥离阈值将会有所不同。

为了更好地应用激光剥离技术,就需要准确测量聚焦激光束焦点的光斑尺寸以及样品的激光剥离阈值这两个关键的物理量。焦点光斑尺寸的传统测量方法有刀边法、针孔扫描法和激光烧蚀法等^[9-11]。其中刀边法和针孔扫描法需要使刀边或者针孔扫描经过激光光斑,测量速度慢;激光烧蚀法需要首先测量出样品的激光剥离阈值,然后再通过数值拟合来测量出焦点的光斑尺寸,效率较低。

在样品的激光剥离阈值测量方面,已经建立的方法有光学显微^[12]、光声^[13]、光束偏转^[14]和光电子发射谱^[15]等技术。这些技术在测量精度、测量速度以及便捷性等方面各有其优缺点。最近,Zhou等^[16]报道了一种利用正交双脉冲激光剥离-激光诱导击穿光谱技术来准确测量样品剥离阈值的新方法,由于实验测量的数据点更接近于阈值剥离点,因此可以提高测量的精度。

本文提出一种能够同时测量聚焦激光束的光斑尺寸和样品的激光剥离阈值的新方法。该方法基于焦点光斑具有高斯强度分布的前提,在不同的能量条件下在样品表面烧蚀出不同半径大小的烧蚀坑洞,由激光烧蚀坑洞半径与脉冲激光能量之间的依赖关系,通过计算机数值拟合来同时测量出焦点光斑尺寸和样品的激光剥离阈值。实验测量了铝和一种热敏相纸的激光剥离阈值及聚焦激光束焦点位置的光斑尺寸,验证了其技术的可行性和测量结果的可靠性。

2 测量原理

如果入射的激光束为高斯光束,经过球透镜聚焦

到样品表面,则聚焦后激光在其焦平面内仍将具有高斯强度分布,如图1所示,其能流密度可以表示为

$$F(r) = F_0 \exp(-2r^2/\omega^2), \quad (1)$$

式中 F 为能流密度, F_0 为光斑中心处的最大能流密度值, ω 为电场强度下降至中心值的 $1/e$ 处的点所在圆的半径,即高斯光束的光斑尺寸, r 为某点所在同心圆的半径。

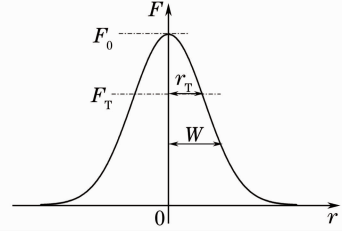


图1 样品表面烧蚀坑洞的半径与样品剥离阈值以及光斑尺寸的关系

Fig.1 Relationship of radius of crater with ablation threshold of sample and beam spot size

激光脉冲的总能量为

$$E = \int_0^{2\pi+\infty} \int_0^{\infty} F_0 \exp(-2r^2/\omega^2) r dr d\theta = \frac{\pi}{2} F_0 \omega^2, \quad (2)$$

样品表面所烧蚀的坑洞边沿处所对应的激光能流密度即为样品的激光剥离阈值 F_t , 两者满足以下关系:

$$F_t = F_0 \exp(-2r_t^2/\omega^2), \quad (3)$$

式中 r_t 为样品表面烧蚀坑洞的半径。由(3)式,激光能量可以表示为

$$E = F_t \frac{\pi}{2} \omega^2 \exp(2r_t^2/\omega^2), \quad (4)$$

如果调节剥离激光束的能量 E , 并在显微镜下测量出对应的一系列烧蚀坑洞的半径 r_t , 利用(4)式对其进行计算机数值拟合, 就能同时测定样品的能流密度的激光剥离阈值 F_t 和焦平面上的光斑尺寸 ω 这两个物理量。

3 实 验

用于同时测量聚焦光束焦点光斑尺寸与样品剥离阈值的实验装置如图2所示。电光调 Q Nd:YAG 激光器的二倍频(532 nm)输出分别经过直径为 8 mm 的光阑和两个线偏振器(格兰-泰勒棱镜)并由一个焦距为 50 mm 的双胶合透镜聚焦于样品表面。激光脉宽为 12 ns, 重复频率为 5 Hz。激光的输出模式为 TEM₀₀ 模, 满足入射光束为高斯光束的前提条件。第一个线偏振器 P1 用于提高 532 nm 激光的线偏振度, 通过转动第二个线偏振器 P2 的

偏振方向来调节激光能量。在 P1 与 P2 偏振方向平行时用激光能量计测得最大的激光能量 E_0 ，然后根据马吕斯定律计算得到 P2 与 P1 的偏振方向夹角为 θ 时 P2 透射的激光能量 $E = E_0 \cos^2 \theta$ 。由于样品剥离对于激光的偏振是不敏感的，因此通过转动偏振器 P2 来调节激光能量的同时虽然改变了激光的偏振方向，但对激光烧蚀样品不会造成本质上的差异。另一种调节激光能量但不改变输出激光偏振方向的方法是在 P1 和 P2 之间插入一块半波片，通过旋转半波片来调节激光能量。为了简化实验装置，本实验仅采用了前一种方案。

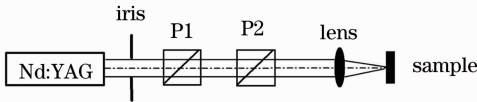


图 2 测量光斑尺寸与样品剥离阈值的实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup used to measure spot size and ablation threshold of sample

实验中样品被固定在一个二维运动平台上，当激光作用于样品表面时，样品以 $150 \mu\text{m/s}$ 的速度在垂直方向平移。每改变一次激光能量，再在水平方向平移一定距离并打下新的一列坑洞，这样就能在样品上得到一系列单脉冲激光所烧蚀的坑洞，如图 3 所示。利用放大倍数为 400 的光学显微镜拍摄单个坑洞的图片并利用计算机软件测量出光斑的半径。实验中所研究的样品有铝箔、铝反射镜和热敏相纸。

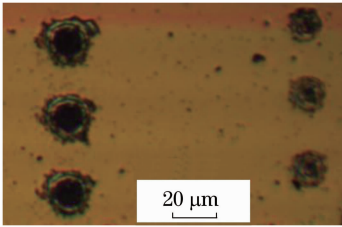


图 3 不同激光能量下铝反射镜表面被烧蚀的坑洞图像

Fig. 3 Photograph of craters produced by laser with different pulse energies on surface of an aluminum mirror

4 结果和讨论

图 4 和图 5 分别表示用单脉冲的 532 nm 激光剥离铝箔和铝反射镜时激光烧蚀的坑洞半径与激光能量的关系，采用数值拟合的方法，得到铝箔和铝反射镜的激光剥离阈值分别为 $(2.6 \pm 0.1) \text{ J/cm}^2$ 和 $(2.5 \pm 0.2) \text{ J/cm}^2$ ，其拟合误差分别为 $\pm 4\%$ 和 $\pm 8\%$ 。图中的误差棒显示了测量多个坑洞半径时的误差范围，约为 5% (下同)。Lutey^[17] 利用脉宽为

4.5 ns、波长为 1064 nm 激光剥离铝样品时得到其剥离阈值为 2.1 J/cm^2 。由于样品的剥离阈值与激光脉宽和波长有关，本实验所测量的结果虽然不能与 Lutey 测量的结果直接比对，但由两者比较接近可以看出用本方法测得的结果是合理的。

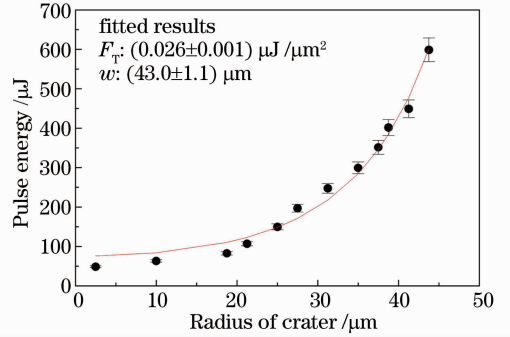


图 4 铝箔的剥离阈值测量

Fig. 4 Measurement of ablation threshold of an aluminum foil

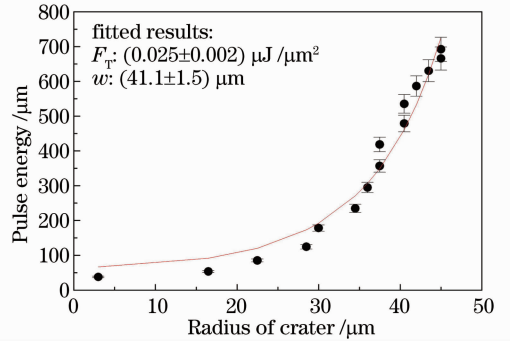


图 5 铝反射镜的剥离阈值测量

Fig. 5 Measurement of ablation threshold of an aluminum reflection mirror

图 6 为用 532 nm 的脉冲激光剥离一种热敏相纸时所烧蚀的坑洞半径与激光能量的关系，经拟合得到其激光剥离阈值为 $(0.24 \pm 0.03) \text{ J/cm}^2$ ，拟合误差约为 12% 。

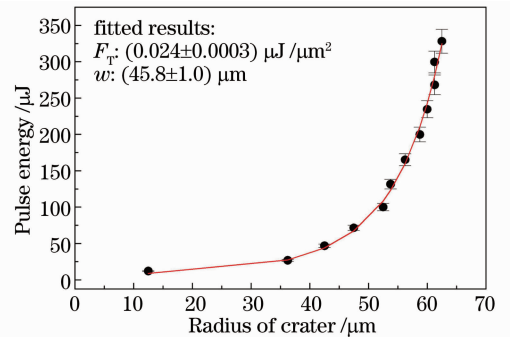


图 6 热敏相纸的剥离阈值测量

Fig. 6 Measurement of ablation threshold of a thermo sensitive photographic paper

根据图 4~6 中的实验结果拟合得到焦点光斑尺寸分别为 (43.0 ± 1.1) 、 (41.1 ± 1.5) 、 $(45.8 \pm 1.0) \mu\text{m}$, 拟合误差分别为 2.5%, 3.6%、2.2%。所测得的光斑尺寸变化不大, 说明利用这种方法测得的焦点光斑尺寸具有较好的精度。3 次测量结果的相对标准偏差为 5.5%。

为了验证该技术在样品的激光剥离阈值测量中的准确性, 实验还采用了不同的高斯光束和聚焦条件测量了同一热敏相纸的激光剥离阈值。该实验中, 高斯光束为经过 7 m 大芯径石英玻璃光纤 (Thorlabs, FG910UEC, 芯径为 $910 \mu\text{m}$, $NA = 0.22$) 传输的激光脉冲并经过焦距为 60 mm 的球透镜准直而获得, 其输出光斑近似为一个高斯光斑。聚焦元件为一个长工作距离显微物镜 (MO, Edmund Optics, Plan APO 10 \times , $NA = 0.28$, 工作距离 $d = 33.5 \text{ mm}$)。其实验装置和测量结果分别如图 7(a)、(b) 所示。

微物镜直接聚焦激光器输出的 532 nm 激光束, 得到的焦点光斑尺寸约为 $25 \mu\text{m}$ 。因此, 其焦点光斑尺寸的增加主要来源于输入高斯光束参数的改变。因此在对用大芯径多模石英玻璃光纤传输的高能激光脉冲进行准直和再聚焦时, 其焦点光斑尺寸比直接聚焦激光器输出的激光束的要大, 因而会降低焦点处的激光功率密度, 这一点在实际应用中应予以注意^[18]。此外, 图 7(b) 中所得到的实验数据与理论模型符合得非常好, 也反过来验证了经大芯径石英玻璃光纤传输并经球透镜准直后所得到的准平行光束基本满足高斯光束的条件。

由前面的相同光束和聚焦条件下不同样品所测得的光斑半径近似一致以及不同光束和聚焦条件下测得的同一样品的激光剥离阈值近似一致可以看出, 用该技术同时测量聚焦激光束焦点光斑尺寸和样品的激光剥离阈值时, 其测量结果具有较好的可靠性。

该技术的主要测量误差来源有 3 种: 1) 激光能量的测量误差, 由于实验中仅测量了 $\theta = 0^\circ$ 时的激光能量, 各点的激光能量是根据马吕斯定律计算得到的, 因此能量值的误差来源由最大能量的测量误差和偏振片 P2 转动角度的误差共同决定; 2) 烧蚀坑洞半径的测量误差。这两种测量误差可以通过多次测量来降低, 但不能完全消除; 3) 焦平面上激光能量密度分布规律与高斯分布的差异。此外还有一个因素会影响到焦点光斑尺寸的测量值, 即实验中样品表面与焦点的前后距离。综合前面的测量数据, 估计本技术中焦点光斑尺寸与样品剥离阈值的测量误差合理值大约为 $\pm 10\%$ 。

与飞秒脉冲激光相比, 由于纳秒激光脉宽较宽, 在烧蚀固体样品时, 不可避免地会存在热效应的影响。研究表明, 热效应对烧蚀坑洞深度的影响较大, 特别是在激光能量很高的情况下^[19]。一般情况下, 只要激光能量不是太高, 可近似认为烧蚀坑洞口径的大小由样品的激光剥离阈值来决定。当纳秒激光作用于固体样品时, 从激光烧蚀机理的角度来看, 热效应的影响已经隐含于激光剥离阈值这一物理量的变化之中。因此不同脉宽的激光, 即使是同一波长, 对相同材料的激光剥离阈值也会有所不同。

尽管如此, 在实际的测量中, 热效应仍会对本技术中烧蚀坑洞口径的测量带来误差, 从而给最终的测量结果带来一定的误差。其原因是: 由于热效应的影响, 用纳秒激光烧蚀固体样品所形成的坑洞边缘通常会存在一个由于样品熔融后并对外涌动所形

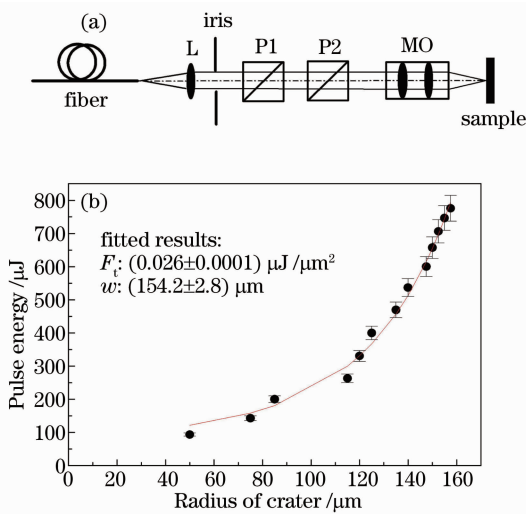


图 7 测量用石英光纤传输并准直后的高斯激光脉冲聚焦后的焦点光斑尺寸的 (a) 实验装置示意图和 (b) 测量结果

Fig. 7 (a) Schematic diagram of experimental setup and (b) measurement result of focal spot size of Gaussian beam after collimation of laser output delivered by silica fiber

由测量结果可以看出, 由于采用的光束和聚焦条件发生变化, 焦点的光斑尺寸有显著的变化, 扩大至 $154 \mu\text{m}$, 但是所测量的热敏相纸的激光剥离阈值为 $0.26 \text{ J}/\text{cm}^2$, 与前面的测量结果 $0.24 \text{ J}/\text{cm}^2$ 仅有 8% 的相对误差。由于显微物镜经过了严格的像差校正处理, 因此对相同光束其聚焦的效果比焦距为 50 mm 的双胶合透镜要好, 实验测量的用同一显

成的一个凸起边沿^[20]。激光能量较高时,这一凸起的边沿非常明显,其存在会对准确判断坑洞的边沿造成一定的干扰。但是,当激光能量较低时,这一凸起的边沿在显微镜下观察时则不是太明显,其影响相对有所降低。通过对反复测量的实验数据进行评估,可以看出因热效应引起的测量误差完全可以控制在±10%以内。由此可见,采用本技术来测量焦点光斑尺寸和样品的激光剥离阈值时,应尽可能在较低的激光能量下进行,以降低激光热效应所造成的测量误差。

值得说明的是,Kiang等^[11]用类似的方法测量了焦平面上的光斑尺寸。所不同的是,本技术根据(4)式进行曲线拟合同时测得 F_i 和 w 值,而在Kiang等的工作中则需要先通过实验测量出 F_i 值,然后才能拟合出光斑尺寸。显然本技术更为简便,在实际应用中具有较大的可行性和应用价值。

5 结 论

当聚焦激光束在焦平面上的光强分布为高斯分布时,推导出了激光脉冲的能量与激光在样品表面所烧蚀的坑洞半径的关系。实验采用不同能量的激光脉冲在样品表面烧蚀出不同大小的坑洞,在显微镜下测量出坑洞的半径并通过计算机进行数值拟合,同时测定了铝箔、铝反射镜和一种热敏相纸的激光剥离阈值以及在不同聚焦条件下焦点的光斑尺寸。研究结果表明该技术的测量结果可靠,测量误差约为±10%。相比于传统的测量方法该技术更为直接,并且能够一次同时测量出两个物理量,既简便又高效。该技术在激光与固体物质相互作用的基础研究和一些相关的应用领域中可以方便地用于测量样品的激光剥离阈值以及评价激光光束的质量和聚焦的效果,有一定的应用价值。

参 考 文 献

- 1 J S Becker, M Zoriy, J S Becker, *et al.*. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) in elemental imaging of biological tissues and in proteomics[J]. *J Anal At Spectrom*, 2007, 22(7): 736-744.
 - 2 X L Mao, O V Borisov, R E Russo. Enhancements in laser ablation inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry based on laser properties and ambient environment [J]. *Spectrochim Acta Part B*, 1998, 53(5): 731-739.
 - 3 Li Kexue, Zhou Weidong, Qian Huiguo, *et al.*. Quantitative analysis of elements in aluminum alloy using laser ablation fast pulse discharge plasma spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 013001.
- 李科学,周卫东,钱惠国,等.激光消融-快脉冲放电等离子体光谱定量检测合金中元素[J].*激光与光电子学进展*, 2012, 49

- (1): 013001.
- 4 A A Melaibari, P Molian. Pulsed laser deposition to synthesize the bridge structure of artificial nacre: comparison of nano-and femtosecond lasers[J]. *J Appl Phys*, 2012, 112(10): 104303.
 - 5 Ding Xuecheng, Fu Guangsheng, Zhai Xiaolin, *et al.*. Influence of target-to-substrate distance on velocity and density distributions of ablated particles during their propagations[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0103005.
- 丁学成,傅广生,翟小林,等.靶衬间距对传输中溅射粒子密度和速度分布的影响[J].*中国激光*, 2012, 39(1): 0103005.
- 6 Zhang Nan, Yang Jinghui, Zhu Xiaonong. Investigation of the ultrafast process of femtosecond laser ablation of high oriented pyrolytic graphite[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0503002.
- 张楠,杨景辉,朱晓农.飞秒激光烧蚀高定向热解石墨的超快过程研究[J].*中国激光*, 2012, 39(5): 0503002.
- 7 Wang Yuerong, Li Yi, Wang Sijia, *et al.*. Directly writing single polarization microstructure waveguide in fused silica by high repetition rate femtosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1203002.
- 汪月容,李毅,王思佳,等.高重复频率飞秒激光烧蚀熔融石英制作单偏振微结构波导[J].*中国激光*, 2012, 39: 1203002.
- 8 J Miller, P K Yu, S J Cringle, *et al.*. Laser-fiber system for ablation of intraocular tissue using the fourth harmonic of a pulsed Nd:YAG laser[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(3): 413-420.
 - 9 J A Arnaud, W M Hubbard, G D Mandeville, *et al.*. Technique for fast measurement of Gaussian laser beam parameters[J]. *Appl Opt*, 1971, 10(12): 2775-2776.
 - 10 P J Shayler. Laser beam distribution in the focal region[J]. *Appl Opt*, 1978, 17(17): 2673-2674.
 - 11 Y C Kiang, R W Liang. Measuring focused Gaussian beam spot sizes: a practical method[J]. *Appl Opt*, 1983, 22(9): 1296-1297.
 - 12 Y Domankevitz, N S Nishioka. Measurement of laser ablation threshold with a high-speed framing camera[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1990, 26(12): 2276-2278.
 - 13 W P Leung, A C Tam. Noncontact monitoring of laser ablation using a miniature piezoelectric probe to detect photoacoustic pulses in air[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 60(1): 23-25.
 - 14 J A Sell, D M Heffelfinger. Laser beam deflection as a probe of laser ablation of materials[J]. *Appl Phys Lett*, 1989, 55(23): 2435-2437.
 - 15 Cs Beleznai, D Vouagner, J P Girardeau-Montaut, *et al.*. Laser ablation threshold determination by photoelectric emission[J]. *Appl Phys A*, 1999, 69(1): S113-S116.
 - 16 Q Zhou, Y Q Chen, F F Peng, *et al.*. Determination of ablation threshold of copper alloy with orthogonal dual-pulse laser-ablation laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(23): 5600-5605.
 - 17 A H A Lutey. An improved model for nanosecond pulsed laser ablation of metals[J]. *J Appl Phys*, 2013, 114(8): 083108.
 - 18 Zhou Qi, Peng Feifei, Li Runhua, *et al.*. Delivery of megawatts high energy laser pulse with large core diameter silicon fiber and its application in dual-wavelength laser-ablation laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(12): 3392-3395.
- 周奇,彭飞飞,李润华,等.用大芯径石英玻璃光纤传输兆瓦级高能激光脉冲及其在双波长 LA-LIBS 技术中的应用[J].*光谱学与光谱分析*, 2013, 33(12): 3392-3395.
- 19 Q M Lu, S S Mao, X L Mao, *et al.*. Delayed phase explosion during high-power nanosecond laser ablation of silicon[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(17): 3072-3074.
 - 20 Y Jiang, X Xiang, H J Wang, *et al.*. Damage/ablation morphology of laser conditioned sapphire under 1064 nm laser irradiation[J]. *Opt & Laser Technol*, 2012, 44(4): 948-953.