

# 激光诱导空泡技术研究和应用新进展

谢小柱<sup>1</sup> 苑学瑞<sup>1</sup> 陈蔚芳<sup>2,3</sup> 魏昕<sup>1</sup> 胡伟<sup>1</sup> 胡满凤<sup>1</sup> 高勋银<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006; <sup>2</sup> 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

<sup>3</sup> 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016

**摘要** 可控性强的激光诱导空泡可用于科研和工程实践。阐述了激光诱导空泡中蒸气空泡及等离子空泡的产生机制,分析了其液体属性以及外界环境因素对激光诱导空泡产生过程的影响规律,介绍了激光诱导空泡技术在微电子行业、生物医学、纳米材料的制备和材料处理等领域的应用。

**关键词** 激光技术;激光诱导空泡;机理;应用

**中图分类号** TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080017

## New Development and Applications of Laser-Induced Cavitation Bubbles

Xie Xiaozhu<sup>1</sup> Yuan Xuerui<sup>1</sup> Chen Weifang<sup>2,3</sup> Wei Xin<sup>1</sup> Hu Wei<sup>1</sup>

Hu Manfeng<sup>1</sup> Gao Xunyin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology,  
Guangzhou, Guangdong 510006, China

<sup>2</sup> College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing, Jiangsu 210016, China

<sup>3</sup> Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing, Jiangsu 210016, China

**Abstract** The better-controllable laser-induced cavitation bubbles are widely used in scientific research and industrial applications. This paper describes the mechanism of the laser-induced cavitation bubbles; vapor bubble and plasma bubble. Effects on the process of bubbles' expanding and collapsing by liquid properties and environmental conditions are analyzed. Finally, the applications of laser-induced cavitation bubbles in the fields of microelectronics, biomedicine, preparation of nanomaterial and surface modification are discussed.

**Key words** laser technique; laser-induced cavitation bubble; mechanism; application

**OCIS codes** 140.3390; 220.4241; 280.3375; 350.3390

## 1 引言

空化是液体在低压处突然产生的空泡(汽化或者气化穴)现象。空化按产生的方式可划分为两类:压降诱导空化和能量沉积诱导空化;其中,压降诱导空化包括声致空化和水力空化,能量沉积诱导空化包括光致空化和粒子空化。激光诱导空泡属于能量沉积诱导空化,它具有球对称性好、可控性强、无机械形变以及定位精准等其他空化产生方法所不具备的优点。空化效应在液体内部产生瞬时的高温(数万开尔文)和高压(数百兆帕甚至高达吉帕)的现象,形成强烈的冲击波和高速度的微射流。近年来,伴随着激光诱导空泡技术的研究不断深入,激光诱导空化效应在激光医学和固体材料处理方面的应用引起了人们的足够重视,并且创新地将其应用在微装配、纳米材料的制备与检测等技术的研究中。但由于空泡对外部的环境改变敏感,尤其是产生空间,不仅影响到空泡的形貌,而且影响到塌陷方式,因而空泡的产生机理和影响因素引起了研究人员的关注并对其进行详细的研究。本文阐述了激光诱导空泡产生的机制,分析了液体参数与外界参数对激

**收稿日期**: 2013-02-26; **收到修改稿日期**: 2013-04-08; **网络出版日期**: 2013-06-05

**基金项目**: 国家自然科学基金(50805027)、江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金

**作者简介**: 谢小柱(1975—),男,博士,副教授,主要从事激光加工和精密加工技术等方面的研究。

E-mail: xiaozhuxie@gdut.deu.cn

光诱导空泡产生过程的影响,介绍了激光诱导空泡过程中的检测技术以及激光诱导空泡技术在微电子、纳米材料、生物医学和材料加工处理等方面的应用。

## 2 激光诱导空泡技术的现状

### 2.1 产生机制

激光诱导空泡是由于激光聚焦在液体中,引起聚焦区域的液体的属性变化而产生的空泡,激光能量密度不同,产生的机制也不同,分别为蒸气空泡和等离子空泡<sup>[1]</sup>。

1) 蒸汽空泡。激光能量达到液体的汽化阈值,但未达到击穿阈值时,脉冲激光作用于液态介质,在液体局部内瞬间受热膨胀、汽化形成气泡;急剧膨胀过程中向外辐射正脉冲压力信号,自由边界反射后形成双极性压力信号,其中负压力信号可使得气体腔压力低于该条件下蒸气压力,从而形成空化泡<sup>[1]</sup>。

2) 等离子空泡。当激光能量超过液体的击穿阈值时,聚焦区内的液体通过共振、反韧致吸收激光能量,液体介质发生“雪崩式”电离,高温高压等离子体以超音速对外膨胀,压缩周围液体介质产生冲击波和空泡<sup>[2-3]</sup>。这种现象多发生在短脉冲激光中,如纳秒激光、皮秒激光和飞秒激光<sup>[4]</sup>。当空泡在固体壁面时,不对称的环境使得空泡溃灭过程中形成朝向固体壁面的高速射流,如图1所示。

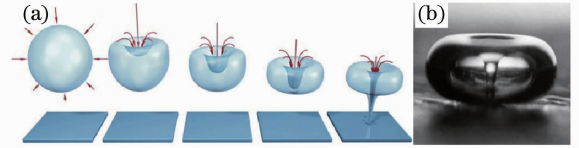


图1 (a) 空泡溃灭形成微射流示意图;(b)微射流的照片  
Fig.1 (a) Schematic diagram of jet formed by cavitation bubble collapsing; (b) picture of cavitation bubble collapsing and jetting

### 2.2 影响因素

由激光诱导空泡产生的过程可以得知,液体属性和激光参数影响着空泡的变化过程。除了这些影响因素之外,还受到容纳空泡的空间,固体壁面属性等外界条件的影响。简化的 Rayleigh-Plesset 方程是常用的空泡半径变化的验证数值模型:

$$\frac{P_B(t) - P(t)}{\rho} = R\dot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{4\nu\dot{R}}{R} + \frac{2S}{\rho R},$$

式中  $R$  为空泡的半径,  $\rho$  为液体密度,  $\nu$  为液体运动粘度,  $S$  为空泡的表面张力,  $P_B(t)$  与  $P(t)$  为空泡内的压强和外界压强,  $\dot{R}$  和  $\ddot{R}$  分别是  $R$  的变化速率与加速度。

1) 液体属性。液体的粘度和表面张力都阻碍空泡的膨胀过程,使得空泡直径减小,但是液体的表面张力加速了空泡的塌陷,使空泡的脉冲周期减小<sup>[5]</sup>,粘度却是阻碍空泡的塌陷<sup>[6]</sup>。液体的压强同样阻碍空泡的膨胀和加速空泡的溃灭<sup>[7]</sup>。液体的温度影响液体的粘度和表面张力。温度越高,液体的粘度和表面张力越小,饱和蒸气压强越大,使得空泡的半径增大,脉动周期延长<sup>[8]</sup>。

2) 含气量。空泡的含气量与激光能量成近似的线性正比关系<sup>[9-10]</sup>。空泡含气量增大,空泡的最大直径也增大,脉动周期延长,并且随着脉动次数的增加,空泡的含气量进一步增大,空泡最大直径也随之增大<sup>[11]</sup>。

3) 固体壁面属性。激光诱导空化形成的冲击波为弹性边界变形提供了能量,通过空泡能量的转换,阻碍了空泡的膨胀;材料在恢复弹性形变时,也为空泡塌陷提供了动力,加速了空泡的溃灭<sup>[12]</sup>。

4) 产生空间。容纳空泡产生的空间也对空泡的产生影响,Gonzalez-Avila 等<sup>[13]</sup>通过实验观测了不同的与狭缝相关的  $H$  值 [ $H = h/R_{\max}$ ,  $h$  为狭缝的缝宽,  $R_{\max}$  为气泡最大半径,如图2(a)所示],发现空泡的形状不同且

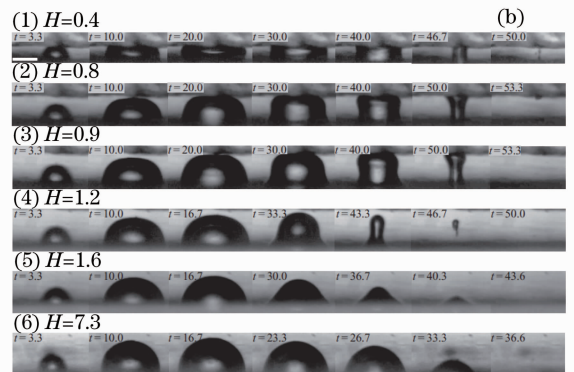
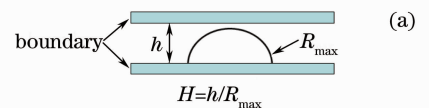


图2 (a) 空泡观测实验示意图;  
(b) 不同  $H$  值空泡的照片<sup>[13]</sup>

Fig.2 (a) Schematic diagram of experiment for observing the bubbles; (b) pictures with various values of  $H$ <sup>[13]</sup>

溃灭方式也会发生改变,如图 2(b)所示。

综上所述,研究人员多在理想状态下研究激光诱导空泡的特性,但随着空泡的产生空间发生变化,空泡的形状与塌陷方式也会发生改变,如文献[13]的实验所证实的。激光诱导空泡的技术多应用在微小且结构复杂的环境,空泡的变化变得不可预测。因此,为了更好地指导空泡的加工应用,必须了解复杂环境下空泡的变化规律。

### 2.3 检测方法

随着激光诱导空泡技术的研究取得长足的发展,涌现出了多种空泡观测技术,这些技术可以分为三类:1) 基于高速拍照技术的高速摄影法、全息摄影法、阴影摄影法、条纹摄影法;2) 由基于空泡膨胀塌陷产生冲击波和液体密度的改变引起的探测光束改变的光偏转法<sup>[7,14]</sup>、干涉检测法和米氏散射法;3) 基于传感器检测空泡产生的声波的探针探测法。常用的检测方法是高速摄影法和光偏转法。

基于时间分辨的高速摄影法<sup>[15]</sup>,可以直观地观察空泡的产生、脉动、溃灭近似完整的动态过程,图 1(b)和图 2(b)都是高速摄影捕捉到的空泡照片。通过对照片中空泡尺寸变化的分析测量,可以推测出微射流的速度和冲击压强。但高速摄影仪的曝光时间和幅间隔决定了它的时间分辨率,且当拍摄频率提高时,对应的仪器造价也更昂贵。随着高速摄影技术的发展,曝光时间仅为几十纳秒的增强型电荷耦合器件(ICCD)相机在激光诱导空泡观测中得到应用,更加准确地记录了空泡的变化过程,对空泡的研究提供了更有力的帮助。

光偏转法是一种具有高时间分辨率(频率可达 10 MHz)且造价低廉的检测技术,其测量原理是通过检测探测光束照射空泡后发生的偏转量反映空泡的变化<sup>[7]</sup>。南京理工大学电子科学与工程系声学研究所采用此种方法对激光诱导空泡做了系统的研究,取得了较好的实验效果<sup>[16]</sup>。但此方法对实验操作要求比较高且需要多次重复检测,后期数据处理工作量大。光偏转法通过测量材料受到冲击后的变形量,推断出空泡的冲击压强<sup>[16]</sup>,为空泡的冲击压强的研究提供了实验依据。

## 3 应用

随着对激光诱导空泡技术的产生机理和影响规律的研究不断深入以及激光技术的发展,激光诱导空泡技术在微电子制造行业、生物医学、纳米材料领域、表面处理与成形等方面得到了广泛应用。

### 3.1 微电子制造

特征尺寸不断减小、结构日益复杂的芯片和微机电产品,对制造、装配以及表面清洗提出了更高的要求,激光技术在微电子制造业得到广泛的应用,其典型的应用包括微结构加工、激光清洗和激光微装配。

1) 微结构加工。激光湿式刻蚀表面微结构和微流道工艺中,切口微裂纹少,碎屑少,且刻蚀效率高,这些特性与空泡有关系。Kopitkovas 等<sup>[17]</sup>在浓度为 0.4 mol/L 的丙酮液体辅助 XeCl 准分子激光背刻蚀 CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, 石英和蓝宝石的实验中,发现,如增加激光能量,刻蚀效率会呈现“二坡曲线”的变化,在转折点出现空化微射流增强材料去除效果。Sergei 等<sup>[18]</sup>研究了 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液辅助 2.92 μm 激光刻蚀蓝宝石的过程,证明空泡塌陷使液体处于超临界状态,增强蓝宝石在溶液中的溶解。图 3(a)和(b)为激光诱导背面湿法刻蚀(LIBWE)加工的图样和微流道工件,图 3(c)为石英玻璃表面加工切槽的横剖面扫描电镜(SEM)照片,可以看出工件加工质量良好,表明该技术具有广阔的工业应用前景。

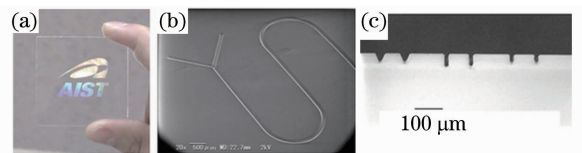


图 3 (a) LIBWE 法加工的样件; (b) 微流道; (c) 微沟槽的剖面 SEM 照片<sup>[19]</sup>

Fig. 3 (a) Samples produced by LIBWE; (b) micro fluidic channels; (c) cross-sectional SEM picture of grooves<sup>[19]</sup>

图 3(a)和(b)为激光诱导背面湿法刻蚀(LIBWE)加工的图样和微流道工件,图 3(c)为石英玻璃表面加工切槽的横剖面扫描电镜(SEM)照片,可以看出工件加工质量良好,表明该技术具有广阔的工业应用前景。

激光诱导空泡也可以用来辅助其他加工方式。江苏大学张朝阳等<sup>[20]</sup>发明了激光空泡空化的光电化学三维加工方法及装置,利用空泡产生的空化作用增强电化学的刻蚀速率,通过掩模板改变激光能量,实现三维立体图像的加工。此制造方法可应用于特种复合加工领域。

2) 激光湿式清洗。微电子、数据存储等高科技行业的现代制造工艺要求加工表面整洁、零件尺寸且配合间隙越来越小,这就需要一种能够精准地清除吸附在微电子等零件表面的细小颗粒且不会对表面产生破坏的清洗技术。激光湿式清洗技术是利用液体吸收激光能量产生的空泡形成冲击波对材料表面微细颗粒进

行清理的非接触式清洗技术,避免了因接触而产生表面破坏甚至增加污渍的缺陷。该技术具有冲击压强高、去除效率高、清洗区域更细小、不易造成基体损伤、避免大气污染等优势<sup>[21]</sup>。Tan<sup>[22]</sup>利用水蒸气在工件表面凝结一层薄薄的液膜,利用 KrF 准分子激光器在液膜中空化冲击波去除了表面的微米甚至亚微米级别的颗粒,而且清洗效果优于激光干式清洗和超声清洗。Lu 等<sup>[23]</sup>利用相同的技术实现了对硬盘磁头表面的清洗,清洗效果如图 4 所示。并且理论清洗阈值与实验清洗阈值吻合,预示着可以从理论上预测清洗结果。

3) 激光微装配。对亚毫米尺寸的零部件进行组装的微装配技术需要精密控制操作系统和操作手轻量化。黄志刚等<sup>[24]</sup>利用激光诱导空化微射流装配微细元件(图 5),可以在准确、方便且不易损伤微细零件的情况下,有效进行微轴、微轴承等微连接结构的安装。伴随着激光诱导空泡研究的不断深入及其控制机制的完善,这种非接触式的装配技术在微装配技术中的优势会日益凸显。

### 3.2 生物医学

激光诱导空化效应在医疗中也有广泛的应用,如常见的激光虹膜切除、虹膜打孔、白内障切除以及激光碎石等。Park 等<sup>[25]</sup>采用 Er:YAG 激光诱导空泡产生的微射流向皮肤中输送药物,无需注射器即可注射药物。Yamashita 等<sup>[26]</sup>采用 Ho:YAG 激光诱导空泡在冠状动脉中产生临时的去血,便于对病变处血管的观测。Ramachandran 等<sup>[27]</sup>利用脉冲 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光在生理液体中形成气泡集群,驱动气泡集群在人体内运输纳米颗粒,或者利用气泡集合的爆炸扩散纳米颗粒。通过细小柔软的光纤传输激光,减小了手术创伤,减轻了病人的痛苦。Quinto-Su<sup>[28]</sup>利用 532 nm 激光诱导的空化效应产生的剪切流检测红细胞(RBC)变形,避免了传统检测方法中繁杂的血样处理过程和复杂检测装置,如图 6 所示。

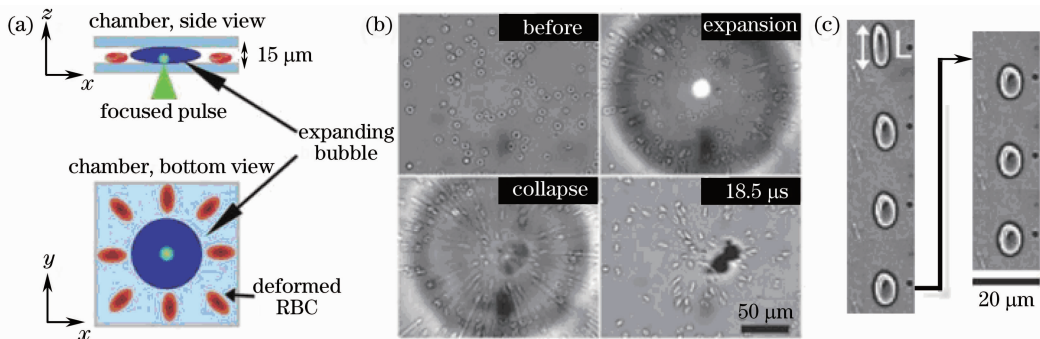


图 6 (a) 红细胞检测示意图; (b) 不同时段的血样照片; (c) 红细胞的变形<sup>[28]</sup>

Fig. 6 (a) Schematic diagram of experiment for RBC monitoring; (b) RBCs imaged on different stages of bubble; (c) shape recovery of an individual cell<sup>[28]</sup>

### 3.3 纳米材料制备

1) 微颗粒制备。激光透射过液体聚焦在靶材上,空化效应和烧蚀同时发生,气化的材料在液体中冷凝后形成微细的悬浮颗粒,可用来制造和合成纳米颗粒材料。在纯净的液体环境中制造出的纳米颗粒避免了其他杂质的污染并且制造工艺简单,这是传统制造技术不可比拟的。这种技术可以应用在金属、金属氧化物、半导体材料和有机材料的纳米材料制作。图 7(a)和(b)是利用此技术制造的铁纳米颗粒透射电镜(TEM)和电子衍射图。徐兵等<sup>[29]</sup>采用重复频率为 10 Hz,能量密度为 4.2 J/cm<sup>2</sup> 的脉冲 KrF 准分子激光在蒸馏水的环境中得到平均直径为 17.54 nm 的 Ag 纳米粒子胶体。Ikova 等<sup>[30]</sup>在制备 Ag 纳米材料的实验中

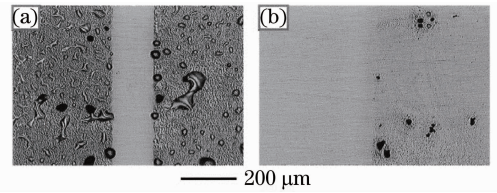


图 4 (a) 激光湿式清洗磁头; (b) 烘干后的效果<sup>[23]</sup>

Fig. 4 (a) Liquid-assisted laser cleaning of magnetic disks; (b) dried by a heater<sup>[23]</sup>

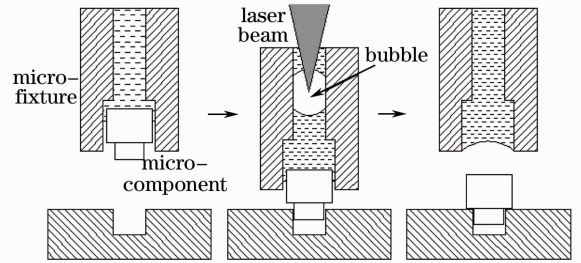


图 5 激光诱导空化微射流装配原理示意图<sup>[24]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of assembly of micro-component by laser-induced cavitation<sup>[24]</sup>

发现,添加剂会影响纳米颗粒直径分布的稳定性。另外,还可以利用空化效应增强非良溶剂的溶解度,例如 Wagener 等<sup>[30]</sup>利用此技术增强氰尿酸三聚氰胺的溶解度,制备纳米颗粒溶液。

2) 定位与检测。利用激光空化效应不仅可以制造纳米材料,还可以应用到纳米管排列和检测等领域。Huang 等<sup>[32]</sup>采用 532 nm 激光作用油墨水溶液产生空泡,通过单个气泡与钴纳米管的相对位置来控制纳米管放置的位置和方向,如图 7(c)和(d)所示,同时也发现在气泡产生的流场中,液体冲击钴纳米管使其变形,通过记录这些变形量推测钴纳米管的杨氏模量(在 9.6~13.0 GPa 之间)。Quinto-Su<sup>[33]</sup>通过利用在油墨水溶液中产生的两个不同直径的空泡产生的液体流动,控制纳米管的摆放位置。利用激光诱导空泡技术可以独立地对纳米管进行定位和检测,无需额外的精密的射流装置。此技术还可以应用于其他微小的弹性材料的检测。

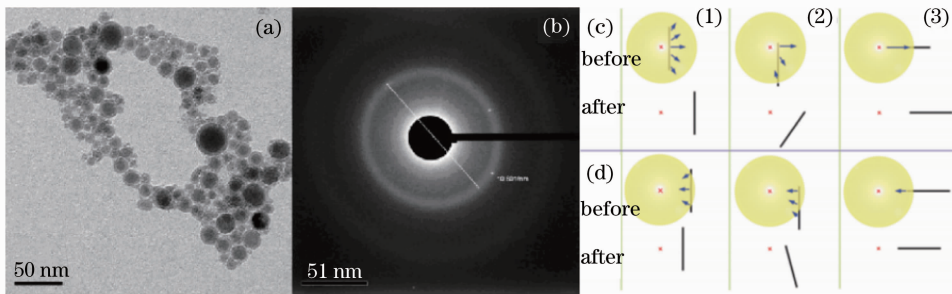


图 7 (a) 铁纳米颗粒 TEM 照片;(b)电子衍射图;(c),(d)空泡操纵钴纳米管示意图<sup>[32]</sup>

Fig. 7 (a) TEM micrograph of nanoparticles produced by ablation of Fe; (b) electron diffraction picture;

(c), (d) Schematic illustration of the nanowire manipulation with a cavitation bubble<sup>[32]</sup>

除此之外,激光诱导空泡技术还有在激光喷丸以及激光喷丸成形、激光喷墨打印等方面应用的研究,其中喷丸及成形已经部分实现了商业化。LPS 公司利用激光喷丸技术为美国空军新型 F-22 飞机加工元件, MIC 公司采用激光喷丸技术实现对航空、汽车和医疗器械零件等表面强化,可以植入比传统的冷加工技术深 5~10 倍的残余挤压应力,并且所需处理表面丝毫不损。MIC 公司也将激光喷丸成型技术应用于飞机机翼的制造,节约了昂贵的模具开发费用和制造费用。

## 4 结束语

本文综述了近年来研究人员对激光诱导空泡技术的研究和应用进展,分析得出以下结论:

1) 激光能量小于击穿阈值的,液体吸收激光能量产生蒸气空泡;大于击穿阈值后,液体被击穿而产生高速膨胀的等离子体空泡。

2) 液体的物理属性、空泡的表面张力和含气量以及空泡的生长环境都会对空泡产生影响,液体的粘度、表面张力及环境或液体的压强都阻碍了气泡的膨胀,加速溃灭,粘度却阻碍了空泡的溃灭。空泡在膨胀过程中形成的冲击波使弹性固壁变形,产生能量变化转换,空泡最大直径减小,空泡溃灭过程中,弹性固壁变形恢复加速了空泡的溃灭速度;空泡的产生空间同样影响空泡的膨胀与溃灭。对空泡变化过程的观测多采用操作简单的高速摄影法和分辨率高的光偏转法。

3) 激光诱导空泡不仅可提高激光刻蚀微结构的加工速率,而且可以利用其产生的微射流和冲击波实现工件表面清洗和微装配。激光通过光纤到达结石病人体内,利用激光诱导空泡技术去除结石,并可以在体内运送纳米颗粒。还可以利用此项技术制备高纯度的纳米材料,以及对板材进行喷丸处理或喷丸成形处理。

由于具有可控性好、定位精准以及冲击压强高的特点,激光诱导空泡技术在微电子、纳米材料和医药行业的研究应用会越来越广。

## 参 考 文 献

- 1 G V Ostrovskaya, Efficiency of optical-to-acoustic energy conversion upon the interaction of a pulsed laser radiation with a liquid; I. Calculation of the efficiency upon acoustooptic interaction[J]. Technical Physics, 2002, 47(10): 1299-1305.
- 2 D Breitling, H Schittenhelm, P Berger, *et al.*. Shadowgraphic and interferometric investigations on Nd:YAG laser-induced

- vapor/plasma plumes for different processing wavelengths [C]. SPIE, 2001, 4184: 534–538.
- 3 Zong Siguang, Wang Jiangan, Wang Yuhong, *et al.*. Sound radialization of high power laser induced cavitation bubble[J]. Laser and Infrared, 2008, 38(8): 757–761.  
宗思光, 王江安, 王雨虹, 等. 高功率激光空化气泡声辐射特性研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(8): 757–761.
- 4 J M H Teichman, R D Glickman, K F Chan, *et al.*. Plasma bubble formation induced by holmium laser[J]. Urology, 2005, 65(3): 627–628.
- 5 He Jie, Liu Xiumei, Lu Jian, *et al.*. Surface tension effects on the growth and collapse of cavitation bubbles near a rigid boundary[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 342–346.  
贺杰, 刘秀梅, 陆建, 等. 表面张力对固壁旁空泡生长和溃灭行为的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 342–346.
- 6 Zong Siguang, Wang Jiangan. Experiment investigation of acoustics source generated by optical breakdown in viscid liquid [J]. Applied Laser, 2009, 29(1): 29–33.  
宗思光, 王江安. 不同黏性液体激光击穿声辐射特性研究[J]. 应用激光, 2009, 29(1): 29–33.
- 7 Li Beibei, Zhang Hongchao, Lu Jian, *et al.*. Experimental investigation of the effect of ambient pressure on laser-induced bubble dynamics[J]. Optics and Laser Technology, 2011, 43(8): 1499–1503.
- 8 Liu Xumei, Liu Xinhua, Hou Youfu, *et al.*. Effect of temperature on the behaviour of a laser-induced cavitation bubble near a rigid boundary[J]. Lasers in Engineering, 2011, 21(3-4): 181–193.
- 9 Li Shengyong, Liu Xiaoran, Wang Jiang'an, *et al.*. Influence of bubble content on spectrum properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves in liquid[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5): 1067–1070.  
李胜勇, 刘晓然, 王江安, 等. 含气量对液体中空泡声波频谱特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5): 1067–1070.
- 10 Chen Xiao, Xu Rongqing, Shen Zhonghua, *et al.*. Experimental and theoretical study of the oscillation of a laser-induced bubble[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(3): 331–335.  
陈笑, 徐荣青, 沈中华, 等. 激光空泡脉动特性的实验和理论研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(3): 331–335.
- 11 Zhao Rui, Xu Rongqing, Liang Zhongcheng, *et al.*. Influence of bubble content on laser-induced cavitation bubble oscillation in glycerol-water mixture[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(12): 8400–8405.  
赵瑞, 徐荣青, 梁忠诚, 等. 含气量对黏性液体中空泡脉动特性的影响[J]. 物理学报, 2009, 58(12): 8400–8405.
- 12 Liu Xumei, He Jie, Lu Jian, *et al.*. Nonlinear dynamics of laser-induced bubble near elastic boundaries [C]. SPIE, 2008, 6839: 68391J.
- 13 S R Gonzalez-Avila, E Klaseboer, B C Khoo, *et al.*. Cavitation bubble dynamics in a liquid gap of variable height[J]. J Fluid Mechanics, 2011, 682: 241–260.
- 14 Xu Rongqing, Zhao Rui, Shen Zhonghua, *et al.*. Experimental investigation of the oscillation of a laser-generated cavitation bubble near a solid boundary[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(4): 571–575.  
徐荣青, 赵瑞, 沈中华, 等. 固壁面附近激光产生空泡脉动过程的实验研究 [J]. 光学学报, 2006, 26(4): 571–575.
- 15 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Wang Huihua. Image measure of characters of cavitation bubble by optical breakdown[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2197–2202.  
宗思光, 王江安, 王辉华. 光击穿液体空泡特性的高速图像测量[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2197–2202.
- 16 Liu Xiumei, He Jie, Lu Jian, *et al.*. Effect of surface tension on a liquid-jet produced by the collapse of a laser-induced bubble against a rigid boundary[J]. Optics and Laser Technology, 2009, 41(1): 21–24.
- 17 G Kopitkovas, T Lippert, C David, *et al.*. Surface micromachining of UV transparent materials[J]. Thin Solid Films, 2004, 453-454: 31–35.
- 18 I D Sergei, M E Karasev, L A Kulevskii, *et al.*. Dissolution in a supercritical liquid as a mechanism of laser ablation of sapphire[J]. Quantum Electronics, 2001, 31(7): 593–596.
- 19 H Niino, Y Kawaguchi, T Sato, *et al.*. Surface Microstructuring by Laser-Induced Backside wet Etching[EB/OL]. <http://spie.org/x34904.xml>.
- 20 Zhang Zhaoyang, Zhang Yongkang, Chen Fei, *et al.*. The Method and Apparatus of Photoelectrochemical 3D Processing by Laser-Induced Cavitation[P]. China Patent, 201010158801.2, 2010-10-13  
张朝阳, 张永康, 陈飞, 等. 激光空泡空化的光电化学三维加工方法及装置[P]. 中国专利, 201010158801.2, 2010-10-13.
- 21 A Kruusing. Underwater and water-assisted laser processing; Part 1-General features, steam cleaning and shock processing [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(2): 307–327.
- 22 AC Tam, H K Park, C P Grigoropoulos. Laser cleaning of surface contaminants[J]. Applied Surface Science, 1998, 127-129: 721–725.
- 23 Y F Lu, W D Song, M H Hong, *et al.*. Laser surface cleaning and potential applications in disk drive industry[J]. Tribology International, 2000, 33(5-6): 329–335.
- 24 Huang Zhigang, Guo Zhongning, Zhang Yongjun, *et al.*. The Method of Assembly Micro Components Using Laser Induced Cavitation[P]. China, 201110173580.0, 2011-12-7.  
黄志刚, 郭钟宁, 张永俊, 等. 利用激光空化微射流装配微细元件的方法[P]. 中国专利, 201110173580.0, 2011-12-7.

- 25 M -A Park, H -J Jang, F V Sirotkin, *et al.*. Er: YAG laser pulse for small-dose splashback-free microjet transdermal drug delivery[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(18): 3894—3896.
- 26 E Yamashita, Y Oka, K Kaneko, *et al.*. Angioscope visualization in blood vessel using Ho: YAG laser-induced vapor bubble [C]. *SPIE*, 2005, 5686: 447—452.
- 27 H Ramachandran, A K Dharmadhikari, K Bambardekar, *et al.*. Optical-tweezer-induced microbubbles as scavengers of carbon nanotubes[J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(24): 245102.
- 28 P A Quinto-Su, C Kuss, P R Preiser, *et al.*. Red blood cell rheology using single controlled laser-induced cavitation bubbles [J]. *Labona Chip*, 2011, 11(4): 672—678.
- 29 Xu Bing, Song Renguo, Tang Puhong, *et al.*. Preparation of silver nanoparticles colloid by pulsed laser ablation[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(11): 1582—1588.  
徐 兵, 宋仁国, 唐普洪, 等. 脉冲激光烧蚀法制备 Ag 纳米粒子胶体[J]. *中国激光*, 2007, 34(11): 1582—1588.
- 30 K Ikova, B Vlckova, P Y Turpin, *et al.*. Ion-specific effects on laser ablation of silver in aqueous electrolyte solutions[J]. *J Phys Chem C*, 2008, 112(12): 4435—4443.
- 31 P Wagener, J Jakobi, S Barcikowski. Organic nanoparticles generated by combination of laser-fragmentation and ultrasonication in liquid[J]. *J Laser Micro/Nanoengineering*, 2011, 6(1): 59—63.
- 32 X Huang, P A Quinto-Su, S R Gonzalez-Avila, *et al.*. Controlled manipulation and in situ mechanical measurement of single Co nanowire with a laser-induced cavitation bubble[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(10): 3846—3851.
- 33 P A Quinto-Su, X H Huang, S R Gonzalez-Avila, *et al.*. Manipulation and microrheology of carbon nanotubes with laser-induced cavitation bubbles [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(1): 014501.