

## 20 $\mu\text{m}$ 单微液滴的产生和特性研究<sup>\*</sup>

李汉明<sup>1,2)</sup> 刘 峰<sup>1)</sup> 李英骏<sup>1,2)</sup> 张 翼<sup>1)</sup> 张 杰<sup>1)</sup> Jens Bernhardt<sup>1)</sup>  
Perez Renaud<sup>1)</sup> 程 涛<sup>1,2)</sup> 李玉同<sup>1)</sup> 张 杰<sup>1)</sup>

1) 中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

2) 中国矿业大学, 北京 100083)

(2006 年 12 月 29 日收到, 2007 年 1 月 30 日收到修改稿)

利用阴影成像法对毛细管喷嘴生成单微液滴的特性进行了观测, 研究了单微液滴生成的具体过程, 以及气体背压, 调制频率和调制电压对单微液滴产生的影响, 优化了生成大小和空间分布均匀单微液滴的条件. 结果表明: 调制频率在 0.8—1.8 MHz 之内, 调制电压 10 V, 背推压 3.5 MPa 是获得 20  $\mu\text{m}$  单微液滴的最佳条件.

关键词: 毛细玻璃管, 单微液滴, 阴影成像法, 雷诺数

PACC: 5225, 5235, 5250J

### 1. 引 言

目前已有几个实验小组研究了超短脉冲激光与微液滴靶相互作用产生的 X 射线和超紫外线 (EUV), 可见光辐射以及微液滴靶对激光的吸收效率<sup>[1-5]</sup>. 彭晓昱等人<sup>[6,7]</sup>利用了聚焦光强为  $10^{16} \text{ W/cm}^2$  的飞秒激光与微米量级的液滴相互作用测量了产生的快质子的角分布以及超热电子的角分布和能谱, 为人们认识激光与微液滴靶相互作用的机理提供了重要的实验数据. 但实验涉及的都是雾状液滴, 在激光焦斑内通常有十几个大小在微米量级的液滴, 因此实验结果是激光与多液滴相互作用的产物.

单微液滴的出现, 对于人们澄清激光与微液滴靶相互作用的机理, 具有重要的意义, 而且单微液滴在 ICF 制靶技术上<sup>[8]</sup>有着更加广阔的应用前景. 自 2002 年至今, 已经研究了单微液滴与激光相互作用产生的软 X 射线发射<sup>[9]</sup>、硬 X 射线<sup>[10]</sup>、高次谐波<sup>[11]</sup>、冲击波<sup>[12]</sup>、白光<sup>[4]</sup>、EUV<sup>[13]</sup>以及微液滴对激光成丝后细丝传播影响的实验<sup>[14,15]</sup>.

微米或者亚微米量级的液体靶与激光相互作用时, 有着诸多固体靶和气体团簇不可比拟的优点. 首先, 超短脉冲与固体靶相互作用时, 激光等离子体的应用受到相互作用产生碎屑的限制, 而在液体靶中,

这种碎屑产额明显降低几个数量级甚至完全消失; 其次, 液体靶由于自身的动力学特性, 能够迅速地提供新的靶源, 从而与高重复频率的激光脉冲相匹配. 与此同时, 与固体靶相比, 微米大小的液滴有类似于固体的原子密度但却只有几倍激光波长的大小, 不会像固体靶那样因为强烈的热传导而损失大量能量, 因而对激光有很高的吸收效率<sup>[15]</sup>. 基于以上优点, 超短脉冲强激光与微米量级的液滴的相互作用成为一个新的研究领域. 但没有见到关于单微液滴形成过程以及微液滴参数优化的详细报道.

为了得到稳定的单微液滴, 本文利用阴影法测量了毛细玻璃管喷嘴产生微液滴的过程以及背压, 调制频率和电压对微液滴参数的影响, 优化了单微液滴生成的最佳调制频率、调制电压, 以及气体背推压等参数. 这些结果有助于通过对毛细玻璃管喷嘴的调制来进行不同机理的激光物质相互作用实验.

### 2. 液滴的产生和测量方法

实验中使用瑞典 Micro Jet Components 公司生产的毛细玻璃管喷嘴产生单微液滴, 其构造见图 1. 其中脉冲信号发生器产生的幅值和频率均可调的 TTL 信号加在压电陶瓷上, 调制毛细玻璃管内的水流, 进而控制喷嘴喷射形成微液滴. 储液池的一端和喷嘴

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10474137, 60621063, 10510490, 10575129, 10675164)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2007CB815100)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: lyj@aphy.iphy.ac.cn

相连,另一端和高压气瓶相连.在压力大约 4 MPa 附近,高压  $\text{N}_2$  气推动液池中的水通过管道流经过滤水网和阀门,流经 10  $\mu\text{m}$  的毛细玻璃管从喷嘴出口喷出,形成大约 10  $\mu\text{m}$  的液体喷注.在距离喷嘴微孔一定的距离处,液体经压电晶体调制形成彼此分裂的小液滴.整个喷嘴安装在一个三维调节架上,喷嘴的位置可以精确调节.

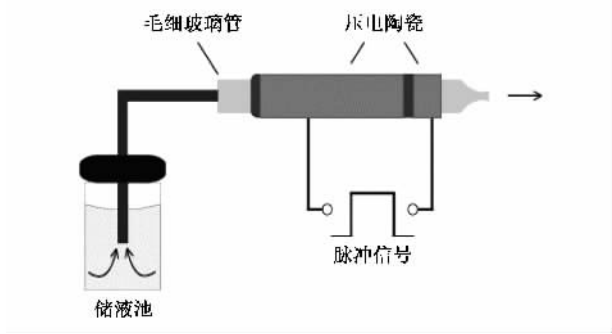


图 1 毛细玻璃管喷嘴基本构造图

实验是以中国科学院物理研究所的极光 II 号激光器作为成像光源进行的.实验中仅用到抽运光,激光中心波长为 532 nm,脉冲宽度为 50 ns,重复频率为 10 Hz,实验中工作在 Q-SW 模式,实验布局如图 2 所示.抽运激光照射从毛细玻璃管喷嘴喷射出来的单微液滴,包含单微液滴阴影的激光束由一个透镜成像在可见光 CCD 上.系统的放大率这样来标定:在喷嘴的下方正中央放置一根经过标定的铜丝(直径为 100  $\mu\text{m}$ ),通过透镜成像在 CCD 上,前后移动收集透镜,直到在 CCD 上看到清晰的铜丝象为止,读出铜丝像所占的 CCD 像素,乘以 CCD 每个像素对应的实际宽度(24  $\mu\text{m}$ ),再除以铜丝实际直径,即得该系统的放大率为 10.

### 3. 液滴与背压,调制电压,频率的关系以及优化

由于实验中 10  $\mu\text{m}$  直径的喷嘴限制单位流量为 0.28 ml/min,因此少量的水可以进行长期的工作,实验设计中储水罐做得很小仍然可以满足实验要求.在 20  $\mu\text{m}$  微液滴的形成过程中,毛细玻璃管内的

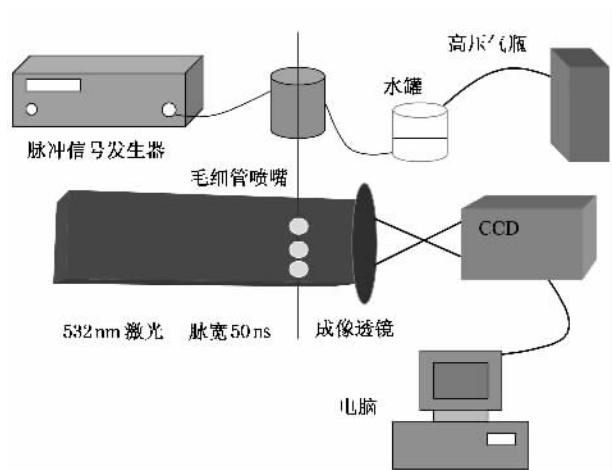


图 2 微液滴的阴影成像实验布局图

10  $\mu\text{m}$  的液体喷注,在距离喷嘴微孔一定的距离处,液体自发的形成彼此分离的直径 20  $\mu\text{m}$  的小液滴.为了记录液体喷注分裂成小微液滴的过程,实验中上下移动喷嘴的位置,可以清晰的记录微液滴形成的过程,结果见图 3.通过图像分析可以达到,在喷嘴下方 1 mm 处,水由连续水流变成单微液滴,通过图像分析得到微滴直径为 20  $\mu\text{m}$ .

在我们的实验中,为了获得可以不断更新的靶源,必须在实验上得到一串均匀分布的稳定单微液滴.而气体背压,调制脉冲幅值,调制脉冲频率等决定了能否获得稳定的微液滴.

首先进行了气体背压的优化,调制脉冲幅值选为 10 V,调制频率选为 1 MHz,在气体背压的变化过程中微液滴的大小和空间分布如图 4 所示.结果表明,在背压从 1—4 MPa 的变化过程中,微液滴大小始终保持在 20  $\mu\text{m}$ ;背推压大于 3.5 MPa 和小于 3.5 MPa 时,微液滴的空间间隔变得很不均匀.由此得出 3.5 MPa 的气体推压是获得均匀大小均匀分布单微液滴的最佳条件.

为了研究附着在毛细玻璃管上的压电陶瓷的输入电压幅值对微液滴参数的影响,气体推动压选为 3.5 MPa,调制脉冲频率选为 1 MHz,通过脉冲信号发生器的幅值调节功能在保证调制频率不变的情况下改变调制 TTL 脉冲的电压,用阴影法测量了调制脉

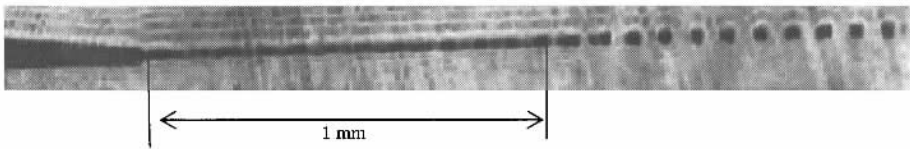


图 3 微液滴形成过程示意图 在喷嘴出口下方 1 mm 处开始形成单微滴

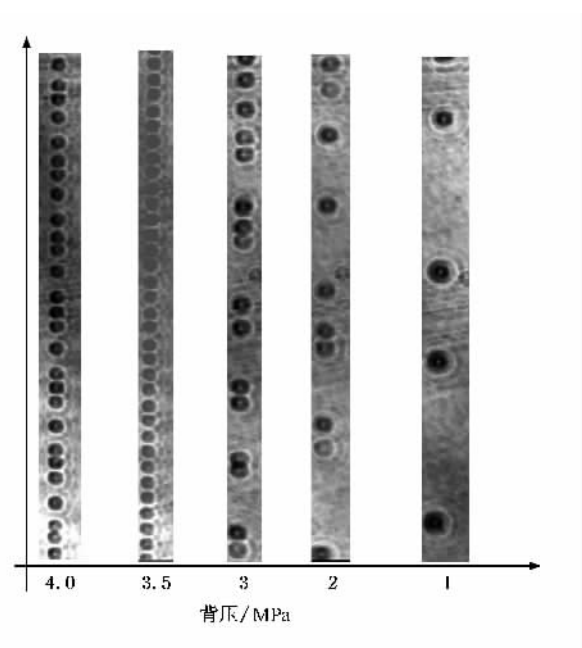


图4 微液滴大小和分布与背压的关系图

冲电压从 3 V 到 15 V 的变化过程中 ,微液滴的大小分布和空间分布 ,结果如图 5 所示 .从图中可见 ,微液滴直径在这个变化过程中基本保持不变 ,微液滴的空间分布在 10 V 的情况下为最佳 .

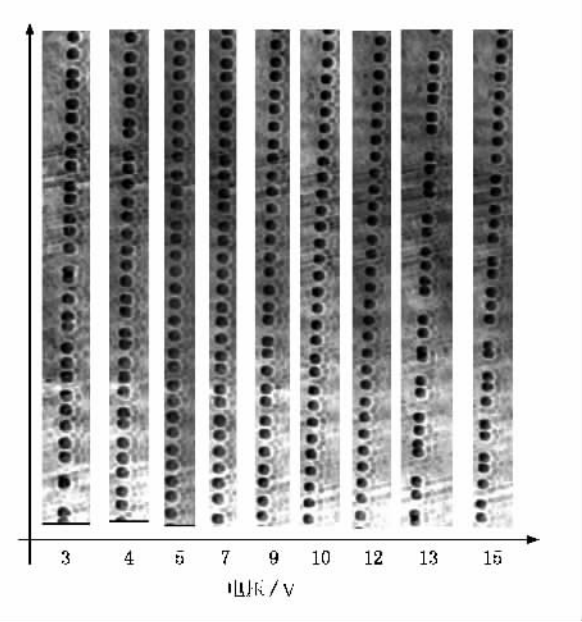


图5 微液滴尺寸以及分布和调制毛细玻璃管喷嘴脉冲幅值之间的关系

最后 ,为了研究附着在毛细玻璃管上的压电陶瓷的输入信号频率对微液滴参数的影响 ,气体背压选为 3.5 MPa ,调制脉冲幅值选为 10 V ,在保证调制幅值不变的情况下改变调制 TTL 脉冲的频率 ,阴影

法测量了调制脉冲频率从 0.4 MHz 到 2.1 MHz 的变化过程中 ,微液滴的大小分布和空间分布 ,结果如图 6 所示 .从图中可见 ,在调制频率小于 0.8 MHz 和大于 1.8 MHz 的情况下 ,微液滴大小不均匀 ,空间分布也比较分散 .而在 0.8—1.8 MHz 的范围内 ,微液滴大小和分布非常均匀 ,是形成单微液滴的最佳频率范围 .

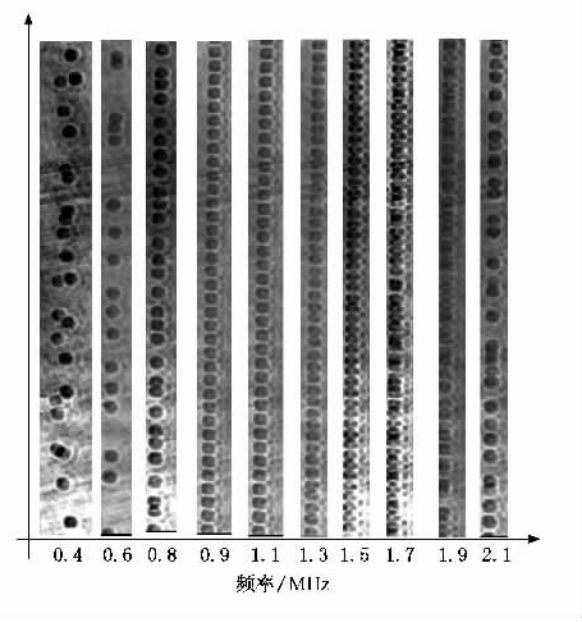


图6 微液滴尺寸和分布与调制频率之间的关系

形成稳定水流的最主要要求就是代表薄片状流动的雷诺数小于 1000 .雷诺数作为一个与摩擦力相关的动能的量度 ,定义为

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

其中  $\rho$  为液体结密度 , $v$  为流速 , $d$  为直径 , $\eta$  代表流体的粘性系数 .在实验中 , $v = 60 \text{ m/s}$  , $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$  , $\eta = 10^{-3} \text{ Pa/s}$  ,计算得到的雷诺数为 600 .实验中确实在喷嘴的下方看到了薄片状流动 .正如上面说的 ,液体结是不稳定的 ,可以迅速的破裂成不规则大小的微液滴 .这种破裂发生在喷嘴下方  $L$  处 ,液体表面张力( 水的数值是  $\sigma = 0.073 \text{ N/m}$  )获得了足够的时间来放大微小的随机扰动 . $L$  可以表达为<sup>[16,17]</sup>

$$L = 12v \left( \sqrt{\frac{\rho d^3}{\sigma}} + \frac{3\eta d}{\sigma} \right) ,$$

带入实验中的参数 , $L = 1.0 \text{ mm}$  ,与实验结果吻合 .

为了得到均匀分布和均匀大小的微液滴 ,水流需要被调制 .附着在喷嘴上的压电陶瓷引入了水流的压强调制 ,这样反过来也会带来微液滴大小的细微波动 .这种调制与自由起伏波动相比 ,可以更快的

形成一个可重复性的等间隔的微液滴链. 控制微液滴形成的主要参数  $x$  可以表示为

$$x = \frac{\pi d}{\lambda} = \frac{\pi df}{v} = 0.52f,$$

其中  $f$  为调制频率,  $d$  为微液滴直径,  $\lambda$  为调制波长, 也可以表示为流速和调制频率的乘积. 在 5 MPa 的背压下, 调制频率和微液滴形成位置之间的流速为 60 m/s. 对于  $x < 1$ , 液体结的破裂由调制频率控制. 通过公式, 稳定地液滴只在小于 1.8 MHz 的调制频率范围内形成. 对于小于 0.8 MHz 的调制频率 ( $x < 0.35$ ), 调制频率的二次谐波开始占据主导地位. 这可在图 6 中发现. 实验中发现, 稳定地微液滴只能在 0.8—1.8 MHz 的小调制频率范围内形成, 与

计算得到的调制频率上下限一致.

## 4. 结 论

文中利用阴影法测量了单微液滴的形成过程以及背压、调制幅值和调制频率等因素对微液滴分布和大小均匀性影响, 并且进行了参数优化. 实验结果表明, 微液滴在喷嘴下方 1 mm 处开始形成, 获得均匀分布, 均匀大小微液滴的最佳条件为: 调制频率的范围在 0.8—1.8 MHz, 调制电压 10 V, 背压 3.5 MPa. 这为进行激光与单微液滴相互作用产生 EUV 和白光光谱以及微液滴对激光通道传输影响等实验提供了必要的实验参数.

[ 1 ] Gumbrell E T , Comley A J , Hutchinson M H R *et al* 2001 *Phys. Plas.* **8** 1329

[ 2 ] Mcnaught S J , Fan J , Parra E *et al* 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 4100

[ 3 ] Qiu L H , Fu Y B , Wang X L *et al* 1999 *High Power Laser & Particle Beams* **4** 017( in Chinese ) [ 邱龙会、傅依备、汪小琳等 1999 强激光与粒子束 **4** 017 ]

[ 4 ] Favre C , Boutou V , Hill S C *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 035002

[ 5 ] Garloff K , Donker M , Mullenet J *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **66** 36403

[ 6 ] Karsch S , Dusterer S , Schwoerer H *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 15001

[ 7 ] Peng X Y , Zhang J , Jin Z *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2625( in Chinese ) [ 彭晓昱、张 杰、金 展等 2004 物理学报 **53** 2625 ]

[ 8 ] Peng X Y , Zhang J , Zheng J *et al* 2006 *Phys. Rev. E* **74** 036405

[ 9 ] Hemberg O , Hansson B A M , Berglund M *et al* 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 5421

[ 10 ] Anand M , Safvan C. P , Krishnamurthy M *et al* 2005 *Appl. Phys. B* **81** 469

[ 11 ] Flettner A , Pfeifer T , Walter D *et al* 2003 *Appl. Phys. B* **77** 747

[ 12 ] Lindinger A , Hagen J , Socaciu L D *et al* 2004 *Appl. Opt.* **43** 5263

[ 13 ] Keyser C , Schriever G , Richardson M *et al* 2003 *Appl. Phys. A* **77** 217

[ 14 ] Bjorn A , Hanson M , Hertz H M *et al* 2004 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **37** 3233

[ 15 ] Courvoisier F , Boutou V , Kasparian J *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 213

[ 16 ] McCarthy M J , Molloy N A 1974 *Chem. Eng. J.* **7** 256

[ 17 ] Hertz H M , Rymell L , Berglund M 1995 *Proc. Spie.* **88** 2523

# The characteristics of 20 $\mu\text{m}$ -diameter singledroplets<sup>\*</sup>

Li Han-Ming<sup>1,2)</sup> Liu Feng<sup>1)</sup> Li Ying-Jun<sup>1,2)†</sup> Zhang Yi<sup>1)</sup> Zhang Zhe<sup>1)</sup> Jens Bernhardt<sup>1)</sup>  
Perez Renaud<sup>1)</sup> Cheng Tao<sup>1,2)</sup> Li Yu-Tong<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1)</sup>

1 *✉ Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

2 *✉ China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China*

(Received 29 December 2006; revised manuscript received 30 January 2007)

## Abstract

As a prospective target material, micro-droplet is of great interest. In this paper, the characteristics of the 20  $\mu\text{m}$ -diameter singledroplets are measured by means of shadowgraphs. The detailed process of the droplet formation is observed. Meanwhile, the droplet parameter, backing pressure, modulation amplitude and frequency are optimized to attain the conditions to realize droplets with uniform spatial distribution.

**Keywords:** capillary nozzle, single droplet, shadowgraph, Reynolds number

**PACC:** 5225, 5235, 5250J

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Foundation of China (Grant Nos. 10474137, 60621063, 10510490, 10575129, 10675164) and the National Basic Research Program of China (973 *✉* Grant No. 2007CB815100).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lyj@aphy.iphy.ac.cn