

文章编号: 0253-2239(2006)04-0571-5

## 固壁面附近激光产生空泡脉动过程的实验研究\*

徐荣青<sup>1</sup> 赵 瑞<sup>2</sup> 沈中华<sup>2</sup> 陆 建<sup>2</sup> 倪晓武<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 江苏科技大学电子信息学院, 镇江 212003)  
(<sup>2</sup> 南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

**摘要:** 采用自行研制的光纤传感器研究了激光等离子体空泡在固壁面附近的脉动特性。实验获得了激光空泡三次膨胀到最大位置对应的波形图;并据此判定了激光空泡在脉动过程中对应的最大泡半径和溃灭周期;在此基础上结合空泡溃灭理论,计算了激光泡溃灭周期的延长因子 $\kappa$ 。结果表明:随着脉动次数的增加,最大泡半径依次减小;随着作用激光能量的增大,最大泡半径,空泡溃灭周期的延长因子 $\kappa$ 均增大;而无量纲参量的增大将导致延长因子的减小。所得到的延长因子同样可用于无限域流场。

**关键词:** 激光光学; 空泡; 溃灭周期; 延长因子; 光偏转

中图分类号: O434.14 文献标识码: A

## Experimental Investigation of the Oscillation of a Laser-Generated Cavitation Bubble Near a Solid Boundary

Xu Rongqing<sup>1</sup> Zhao Rui<sup>2</sup> Shen Zhonghua<sup>2</sup> Lu Jian<sup>2</sup> Ni Xiaowu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003)  
(<sup>2</sup> Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

**Abstract:** The oscillation of a laser-generated cavitation bubble near a solid boundary is investigated with a home-made optical fiber sensor. The oscillogram corresponding to that the radius of the cavitation bubble expands to the maximum for 3 times is experimentally studied, based on which the maximum bubble radius and the collapse time for each oscillation cycle are determined. By combining the collapse theory of the cavitation bubble, the prolongation factor  $\kappa$  of the collapse time is calculated. A dimensionless parameter  $\gamma$  is defined as  $L/R_{\max}$ , where  $R_{\max}$  is the maximum bubble radius and  $L$  is the distance from the cavity core to the boundary. The results show that, the maximum bubble radius decreases with the increase of the oscillation time, with the rise of the laser energy  $R_{\max}$  and  $\kappa$  increase, and the rise of  $\gamma$  minishes  $\kappa$ . The polongation factor  $\kappa$  derived above is also valid in the infinite liquid field.

**Key words:** laser optics; cavitation bubble; collapse time; prolongation factor; optical beam deflection

### 1 引 言

早在 1753 年欧拉(Euler)就注意到当水管中某处的压强降低至蒸汽压甚至负值时,水与管壁分离,并在该处形成一个真空空间,通常人们将这种现象称为空化。随后,人们发现在液体流动和液力机械中,即从血液流动到水泵、水轮机或船舶螺旋桨都可能发生空化现象。空化现象对周围物体将产生一种

称为空蚀的作用,空蚀的存在不仅降低水利机械的工作效率,侵蚀和破坏液力机械的叶片,甚至在血液流动中会损坏动脉或心脏等。因此,研究空化及空蚀问题一直是相关机械的设计和制造、科学研究和水电站运行部门非常重视的问题,也是提高液力机械性能和质量所必须考虑的重要问题之一<sup>[1~4]</sup>。

自激光产生空泡的方法出现以后<sup>[5]</sup>,人们主要用

\* 国家自然科学基金(60578015,60208004)、江苏省自然科学基金(05KTB510028)、教育部高校优秀青年教师奖励计划和博士点基金(20050288025)资助课题。

作者简介: 徐荣青(1966~),男,江苏扬州人,江苏科技大学电子信息学院副教授,博士,主要从事光电测试研究。

E-mail: rongqingxu@sina.com

收稿日期: 2005-04-05; 收到修改稿日期: 2005-09-14

激光泡来研究空化现象。当激光束聚焦于液体时,首先产生等离子体,该高温高压的等离子体形成初始空泡。随后空泡在内外压差的作用下对外膨胀,一直达到最大泡半径。此时泡内压力低于周围介质的平衡压力,空泡开始向内收缩,直至腔内压力高到能阻止气泡压缩而达到新的平衡。至此,气泡第一次脉动过程结束。由于水的密度和惯性都比较大,因此水中空泡通常会经历多次这样的脉动过程<sup>[6]</sup>。

1917年瑞利(Rayleigh)从理论上对空泡动力学进行了研究,推导了无限域流场中球形空泡溃灭周期公式<sup>[6]</sup>。当空泡周围存在固体壁面,在其溃灭后期,泡壁周围的液体向空泡中心运动;近固壁面处的液体由于受到壁面的限制,其运动速度将较其他部分小,从而使得在垂直壁面方向上动量的不平衡。这种不平衡导致空泡在垂直壁面的方向上呈现伸长的趋势,并形成指向壁面的冲击波和射流;同时空泡溃灭的周期将被延长,瑞利公式将不再成立<sup>[1~11]</sup>。戚定满<sup>[10]</sup>通过接触诊断法即PZT压电换能器间接测量了空泡的溃灭延长因子。由于压电传感器探头的存在不仅会影响空泡脉动过程、扰动原流场及其分布特性,而且该传感器的频率响应较低难以满足测量的精度,故对测量结果可能存在较大的误差。本文采用自行研制的光纤传感器结合空泡溃灭理论测量了溃灭周期的延长因子及其与无量纲参量 $\gamma$ (定义为 $\gamma=L/R_{\max}$ ,其中 $L$ 为泡心到固体边壁的距离, $R_{\max}$ 为最大泡半径)、作用激光能量之间的关系;实验研究结果与理论基本吻合。与其他探测装置相比,该装置具有结构简单、调节方便、频率响应高等优点。

## 2 实验装置

实验装置如图1所示。其中调Q固体Nd:YAG脉冲激光器1可输出波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 、脉宽10 ns、最大单脉冲能量500 mJ的单模激光脉冲;2为分光镜,其部分反射光由PIN光电二极管16(上升时间100 ps)采集,作为示波器采集数据的同步触发信号;通过衰减片组3可以调节作用于靶材的激光能量而不改变其空间分布;元件4(凹透镜,焦距50 mm)和5(凸透镜,焦距150 mm)构成了光学扩束系统,其作用是将脉冲激光扩束并垂直聚焦于水中,靠近铝靶6的附近;元件7为尺寸 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}\times 150\ \text{mm}$ ,装有纯净水的水槽。为了方便准确地确定激光空泡泡心和固体靶材壁面之间的距离,本实验中将激励用的脉冲Nd:YAG激光平行于

靶表面入射,如图1(a)所示。

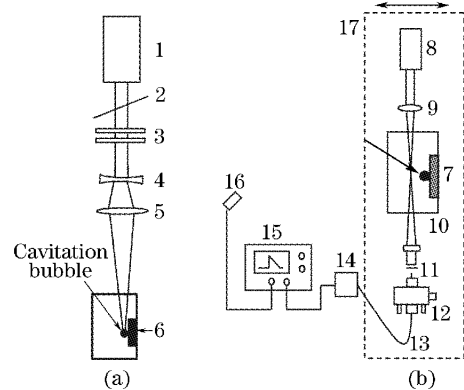


图1 实验装置示意图。(a)空泡产生装置,(b)空泡产生、探测及接收装置简图

Fig.1 Diagram of experimental setup. (a) Cavitation generating device, (b) generating, detecting and receiving device

图1(b)中用于测试冲击波和空泡运动特性的传感器是基于光束偏转原理的光纤传感器。该传感器由He-Ne激光器8、聚焦透镜9、显微物镜10、干涉滤波片11、五维光纤调节架12、单模光纤13以及光电倍增管14等组成。探测组件8~12被固定在二维可移动平台17上,如图中虚框所示。探测光束与靶面之间的距离可直接从二维平台上的刻度尺读取,该平台沿靶面法线方向的移动精度为 $10\ \mu\text{m}$ 。实验时He-Ne激光器发射的连续激光通过焦距为50 mm的透镜聚焦于靶面焦点的正前方,再通过 $20\times$ 的显微物镜聚焦于单模光纤的端面上。光纤与探测光的耦合可通过光纤微调架进行调节。光电倍增管则用来将光纤出射的光信号放大并转化为电信号输出至数字存储示波器15。图形的分析和处理则利用计算机完成。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 空泡脉动的最大泡半径

当探测光经过空泡区域时,实验中发现随着探测距离 $d$ (探测光束到靶材表面)的不同,所获得的光偏转信号也随之发生变化。图2为激光等离子体空泡发展过程中获得的典型序列波形。当探测光距离靶面较远(即大于最大泡半径位置处)时,图中仅出现冲击波脉冲信号,包括激光等离子体冲击波和空泡溃灭所辐射的冲击波信号,并不存在探测光经过空泡时产生的信号,如图2(a)所示。当探测距离 $d$ 移至刚小于最大泡半径 $R_{\max}$ 时,图中出现了由空泡所引起的光偏转信号。在实验中我们以恰好出

现空泡所引起的光偏转信号为依据,从而可以判定该位置  $d$  为空泡最大泡半径  $R_{\max}$ 。当探测光继续移向靶面时,经过空泡的探测光将产生较大的偏转,输出饱和信号。当探测光恰好移至第二次最大泡半径

和第三次最大泡半径处时,所产生的信号如图 2(c)和图 2(d)所示。仔细调节探测光的位置,以标志性的信号出现概率为  $1/2$  处的位置判定为各次脉动所对应的最大泡半径。

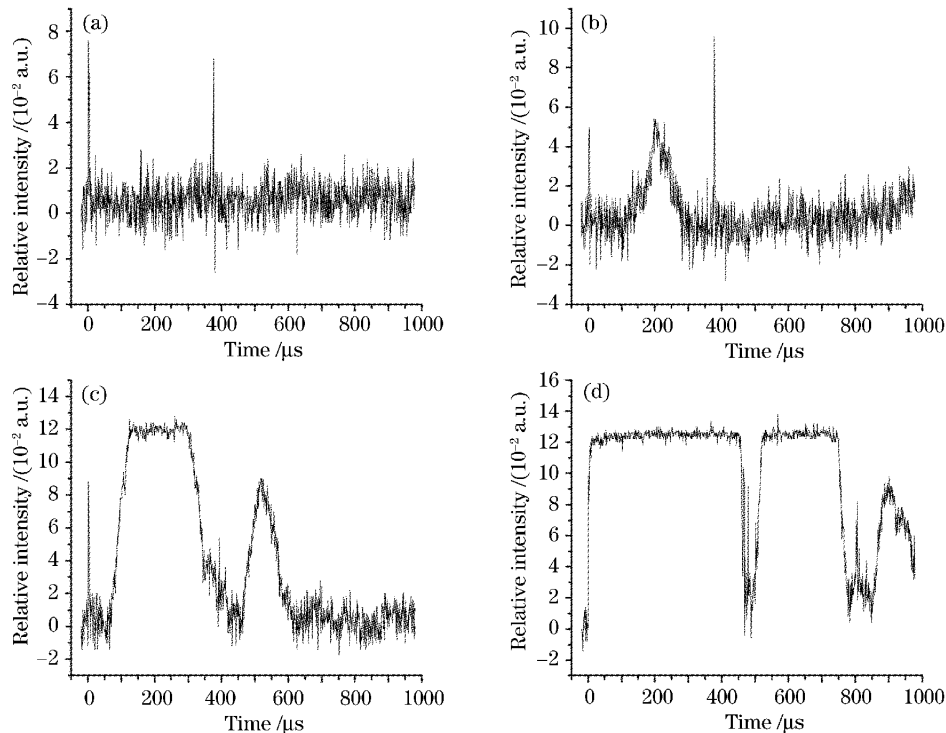


图 2 实验所获得的光偏转的典型信号波形

Fig. 2 Characteristic signals of optical beam deflection obtained experimentally

由图 2 可得到前三次脉动过程所对应的空泡最大半径分别为  $R_{1\max} = 2600 \mu\text{m}$ ,  $R_{2\max} = 1091 \mu\text{m}$ ,  $R_{3\max} = 850 \mu\text{m}$ , 此时作用激光能量为  $170 \text{ mJ}$  时。实验结果表明:  $R_{1\max} > R_{2\max} > R_{3\max}$ 。即在作用激光能量不变的情况下,对于不同的振荡过程,随着脉动次数的增加,空泡的最大半径依次减小,且减小的幅度较大。我们认为这是由于脉动过程中泡能的大量减

少,使得空泡来不及膨胀到最大尺寸就开始收缩。改变作用激光能量,最大泡半径随着作用激光能量变化的实验曲线如图 3 所示。结果表明:最大泡径随着作用激光能量的增加呈增大趋势。同时,泡能和腔内含气量的减小将导致空泡弹性大大减弱,因此第二、第三次泡半径随机性较大。

### 3.2 空泡溃灭周期

无限域流场中空泡溃灭周期(collapse time)与最大半径的关系为<sup>[5]</sup>

$$R_{\max} = \frac{T_c}{0.915 \sqrt{\rho/(P_\infty - P_0)}}, \quad (1)$$

式中  $R_{\max}$  为最大泡半径;  $\rho$  为液体的密度;  $P_\infty$  为静止压强;  $P_0$  为液体中蒸汽压(2330 Pa,  $20^\circ\text{C}$ ),  $T_c$  为空泡溃灭持续时间(collapse time)。

由前述可知,当空泡在固体边壁附近溃灭时,固壁面的存在导致空泡溃灭周期的延长<sup>[7~12]</sup>,此时瑞利公式(1)将不再成立。Rattray<sup>[8]</sup>推导出延长因子  $\kappa$  与非球形泡溃灭周期  $T'_c$ 、球形泡溃灭周期  $T_c$  的关系式:

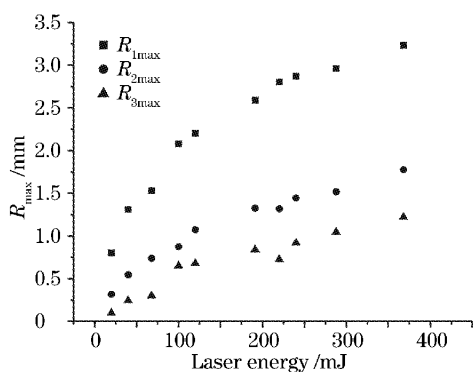


图 3 空泡最大泡半径随激光能量的变化

Fig. 3 Relationship between the maximum radii and the acting laser energies

$$k = \frac{T'_c}{T_c} = 1 + 0.41 \frac{1}{2\gamma}, \quad (2)$$

式中  $\kappa$  为空泡溃灭周期的延长因子,  $T_c$  等为球形泡时空泡的溃灭时间,  $T'_c$  为非球形泡的溃灭时间,  $\gamma$  为无量纲参量。然而, 根据公式(2), 当空泡靠近固体边壁, 即  $\gamma \rightarrow 0$  很小时, 推导出  $\kappa \rightarrow \infty$ 。显然这是不对的。将公式(2) 带入公式(1) 消去  $T_c$ , 可得

$$R_{\max} = \frac{T'_c}{0.915\kappa \sqrt{\rho/(P_\infty - P_0)}}, \quad (3)$$

式中  $R_{\max}$  为最大泡半径;  $\rho$  为水密度;  $P_\infty$  为静止压强;  $P_0$  为蒸汽压,  $T'_c$  为空泡溃灭持续时间。

实验中由于激光脉冲为 ns 量级且周围水介质为静止的, 故激光诱导产生的等离子体冲击波信号和空泡溃灭冲击波信号之间的时间间隔就等于空泡溃灭周期  $2T_c$  [7,13]。由图 2 可知当作用激光能量为 170 mJ 时, 空泡在固体边壁附近溃灭周期  $T'_c = 270 \mu\text{s}$ 。将非球形泡溃灭周期  $T'_c = 270 \mu\text{s}$ , 最大泡半径  $R_{1\max} = 2600 \mu\text{m}$  及水的密度  $\rho$ 、静止压强  $P_\infty$  和水的蒸汽压  $P_0$  (2330 Pa, 20 °C) 等数值代入式(3), 求得延长因子  $\kappa = 1.121$ 。

应当指出, 上述延长因子  $\kappa = 1.121$  是在激光能量为 170 mJ 和  $\gamma = 1.64$  条件下获得的。由于空泡溃灭周期的延长因子  $\kappa$  与入射激光能量、无量纲参量、液体粘性、固壁面材料的性质等相关, 其中对影响比较大的物理量为作用激光能量和无量纲参量。因此下面将分别就  $\kappa$  随这些物理量的变化关系进行讨论。

改变作用激光能量, 溃灭周期延长因子  $\kappa$  随作用激光能量的变化关系如图 4 所示。由图 4 可见, 在作用激光能量变化范围内延长因子随激光入射能量增大呈增长趋势。

改变无量纲参量  $\gamma$ , 溃灭周期的延长因子  $\kappa$  随无量纲参量  $\gamma$  的变化关系如图 5 所示。从图 5 中可

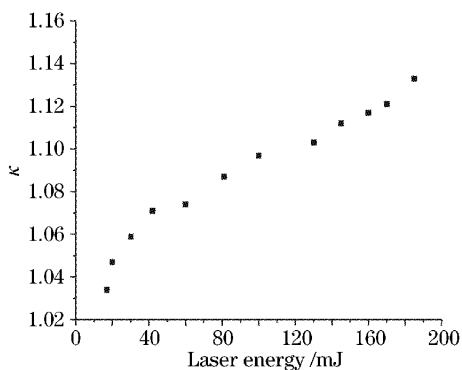


图 4 延长因子  $\kappa$  与作用激光能量的变化关系

Fig. 4 Prolongation factor  $\kappa$  versus acting laser energy

以看出, 延长因子  $\kappa$  随着无量纲参量  $\gamma$  的增大而减小。随着无量纲参量  $\gamma$  的进一步增大, 延长因子  $\kappa$  逐渐减小最终趋于 1, 此时对应于无限域流场中瑞利溃灭理论公式(1), 这一结果与时 Rattray 的理论解 [7] 能很好地吻合。

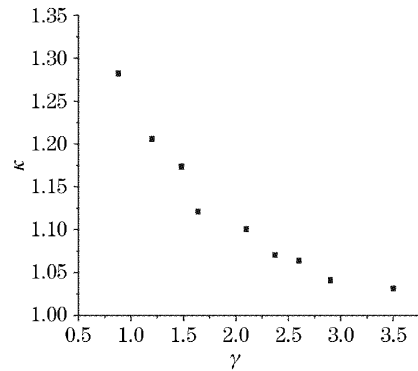


图 5 延长因子  $\kappa$  随无量纲参量  $\gamma$  的变化关系

Fig. 5 The prolongation factor  $\kappa$  versus the dimensionless parameter  $\gamma$

## 4 结 论

本文针对空泡附近存在固壁面的情况, 利用自行研制的光偏转测试系统研究了空泡的脉动特性。实验得到了空泡在三次脉动中对应的最大泡半径; 结合溃灭理论, 进而得到了空泡溃灭周期的延长因子  $\kappa$  随作用激光能量和无量纲参量的变化关系。研究表明: 在不同振荡周期内, 随着脉动次数的增加, 最大泡径依次减小, 且减小的幅度较大; 最大泡半径随着作用激光能量的增大而增大; 同时, 固壁面的存在导致溃灭周期的延长。随着作用激光能量和无量纲参量  $\gamma$  的变化, 延长因子  $\kappa$  也发生相应的改变。当空泡远离固体边壁时, 即无量纲参量  $\gamma$  很大时, 延长因子  $\kappa$  趋于 1。此时空泡溃灭不受边壁的影响, 从而过渡到无限域流场的情形。本文的研究结果不仅可以促进对空化研究的深入, 避免空化可能带来的危害; 同时也为合理利用空化现象的相关研究提供依据。

## 参 考 文 献

- 1 A. Philipp, W. Lauterborn. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles[J]. *J. Fluid Mech.*, 1998, **361**: 75~116
- 2 Y. Tomita, A. Shima. Mechanisms of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse[J]. *J. Fluid Mech.*, 1986, **169**: 535~564
- 3 B. Ward, D. C. Emmony. Direct observation of the pressure developed in a liquid during cavitation-bubble collapse[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(18): 2228~2230
- 4 A. G. Doukas, A. D. Zweig, J. K. Frisoli et al.. Non-invasive

- determination of shock wave pressure generated by optical breakdown[J]. *Appl. Phys. B*, 1991, **53**: 237~245
- 5 W. Lauterborn, H. Bolle. Experimental investigations of cavitation-bubble collapse in the neighborhood of a solid boundary [J]. *J. Fluid Mech.*, 1975, **72**: 391~399
- 6 S. J. Shaw, Y. H. Jin, W. P. Schiffer *et al.*. The interaction of a single laser-generated cavity in water with a solid surface[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996, **99**(5): 2811~2824
- 7 Milton S. Plesset, Richard B. Chapman. Collapse of an initial spherical vapour cavity in the neighborhood of a solid boundary [J]. *J. Fluid Mech.*, 1971, **47**: 283~290
- 8 Robert P. Godwin, Edward J. Chapyak, Joachim Noack *et al.*. Aspherical bubble dynamics and oscillation times [C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3601**: 225~236
- 9 A. Vogel, W. Lauterborn, R. Timm. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary[J]. *J. Fluid Mech.*, 1989, **206**: 299~338
- 10 Qi Dingman, Lu Chuanjin, He Yousheng. Experimental investigations of cavitation collapse noise [J]. *Acta Acustica*, 2000, **25**(6): 532~536 (in Chinese)  
戚定满, 鲁传敬, 何友声. 单空泡溃灭辐射噪声的实验研究[J]. *声学学报*, 2000, **25**(6): 532~536
- 11 T. Kodama, Y. Tomita. Cavitation bubble behavior and bubble-shock wave interaction near a gelation surface as a study of in vivo bubble dynamics[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(1): 139~149
- 12 A. Vogel, S. Busch. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996, **100**(1): 148~165
- 13 A. Shima. Studies on bubble dynamics[J]. *Shock Waves*, 1997, **7**: 33~42

## 上海交通大学生物医学工程系招聘启事

由国家 973 项目首席科学家任秋实教授领衔的上海交通大学激光与光子生物医学研究所是一个与国际接轨, 专业从事激光与光子生物医学研究的学术机构, 拥有上海市激光医学重点实验室。该研究所隶属于上海交通大学生命科学技术学院生物医学工程系。该系为国家重点一级学科, 博士点, 博士后流动站。研究所的主要研究方向为: 1) 激光与生物组织相互作用; 2) 医学光学检测, 成像, 与测量技术; 3) 激光微创、智能化内窥镜手术; 4) 眼科与视觉光学。研究所在研项目之一:《视觉功能修复的基础理论与关键科学问题》2005 年 7 月获得了国家重大基础研究计划(973 计划)2500 万元的资助。

为了更好地开展研究所的各项科研工作, 将研究所建设成为国际一流的激光与光子生物医学研究中心, 争创国家重点实验室及国家激光医学工程中心, 现公开招聘若干名具有丰富科研经验的优秀学者来研究所担任副教授职位的学术骨干, 具体要求如下:

1. 国内外知名大学毕业, 在激光, 光电子, 应用物理, 生理物理, 或解剖学等方面具有博士学位, 并有五年以上独立科研工作经验者, 其中, 在眼科生物物理机制, 波面像差理论在激光屈光手术与视光学的应用, 视觉功能修复, 以及眼科新技术与新方法方面有研究经验的申请者将优先考虑;
2. 以第一作者或通讯作者身份发表过 5 篇以上被 SCI 收录的科学论文, 能独立开展科研工作, 并以主要研究者的身份负责组织至少 1 项以上的国家自然科学基金或相关科研课题的申请;
3. 具有较好的中英文写作和表达能力;
4. 具有优良的职业道德和思想素质, 强烈的责任心、进取心、和忘我的科学献身精神, 为人正派, 思维敏捷, 具有较好的团队协作精神。

上海交通大学激光与生物光子医学研究所将根据入选者的条件提供具有竞争力的待遇。研究所还将招聘若干名具有相关经验的博士后及博士研究生参与研究所正在开展的各项科研工作, 欢迎有志从事激光与光子生物医学研究的杰出人才前来申请。

### 联系方式:

请有意申请者将中英文简历, 三篇代表性文章, 两年内拟定科研计划及个人研究发展规划, 三封推荐信(应注明推荐人的姓名, 职位, 联系电话, 及 EMAIL 地址) 寄往:

地 址: 上海交通大学生物医学工程系激光与光子生物医学研究所  
上海市乐山路 33 号慧谷科技楼 1 号楼 200 室(200030)  
联 系 人: 任秋实教授 电 话: +86 21 6447 7466  
传 真: +86 21 6447 7467 电子邮件: renqsh@sjtu.edu.cn