

# 强飞秒激光烧蚀石英玻璃的超快 时间分辨光学诊断\*

胡浩丰<sup>1)</sup> 王晓雷<sup>1)†</sup> 郭文刚<sup>2)</sup> 翟宏琛<sup>1)‡</sup> 王攀<sup>1)</sup>

1)(南开大学现代光学研究所,光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

2)(天津军事交通学院基础部,天津 300161)

(2010年3月15日收到;2010年3月23日收到修改稿)

采用超快时间分辨的光学诊断技术对飞秒激光脉冲烧蚀石英玻璃的动态过程进行了实验研究. 首先,对烧蚀过程中石英玻璃外部的物质喷射进行了数字全息记录,获得了不同延迟时间下探测光的二维相位差分布图,并由此推断出了喷射物的成分和结构. 此外,对石英玻璃内部的现象进行了时间分辨阴影图记录,从阴影图中观察到了石英玻璃内部的两个应力波的演化过程. 这两个应力波与目标靶外部的两次物质喷射相关.

**关键词:** 脉冲数字全息, 飞秒激光烧蚀, 超快时间分辨, 应力波

**PACS:** 79.20.Ds, 42.40.Kw, 78.47.Cd

## 1. 引言

飞秒激光具有极短的脉宽和极高的峰值功率等特性,因而可以实现对透明材料的精细加工. 近年来,人们利用飞秒激光在透明介质表面制作出了多种微结构,例如光波导<sup>[1]</sup>和光栅<sup>[2]</sup>等. 与此同时,对超短激光烧蚀透明介质的机理也进行了广泛地研究<sup>[3-6]</sup>,其中包括纳秒和皮秒激光烧蚀石英玻璃的实验研究<sup>[3,4]</sup>. 然而目前为止关于飞秒激光烧蚀透明固体的动态过程的研究还未见报道,这一研究能够实现烧蚀目标靶外部和内部动态过程的同时观测,从而有助于进一步鉴定和揭示飞秒激光烧蚀过程中的物理机理.

在本文中,选用石英玻璃这一具有光透明性的物质作为烧蚀的目标靶,采用时间分辨的脉冲数字全息技术<sup>[7-9]</sup>和阴影成像技术<sup>[10]</sup>,对飞秒激光烧蚀石英玻璃过程中靶外部和内部的动态过程进行了记录. 通过对全息图进行数字再现,得到了与喷射物和等离子体<sup>[11]</sup>相关的动态相位信息,并据此推断

出了喷射物的成分和结构. 另外,在烧蚀过程中石英玻璃内部的阴影图中,观察到了两个传播速度不同的应力波,并建立了其与目标靶外部的物质喷射之间的关系.

## 2. 实验装置

实验装置如图1所示. 脉宽 50 fs, 中心波长 800 nm 的单脉冲经分光板  $BS_1$  分为抽运光和探测光. 抽运光通过 10 倍显微物镜聚焦到石英玻璃靶表面. 探测光被 BBO 晶体倍频后经分光板  $BS_2$  后分为探测光和参考光. 延迟线  $DL_1$  和  $DL_2$  可以控制抽运光和探测光之间的时间延迟,而  $DL_3$  可以调节物光和参考光之间的光程差,使其满足相干条件. 由  $L_1$  ( $f=1.5$  cm) 和  $L_2$  ( $f=30$  cm) 组成的  $4f$  系统将物体放大成像于 CCD (MINTRON 1881EX) 记录面上. 实验中,为了避免激光直接电离空气产生的干扰,目标靶被放置于焦点前的某一位置. 如果将参考光部分遮住,则本实验装置便可用于阴影图记录,如图中虚线之外的光路所示.

\* 国家自然科学基金(批准号:10904079 和 60838001)与高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20090031120041 和 20070055029)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wangxiaolei@nankai.edu.cn

‡ E-mail: zhai@nankai.edu.cn

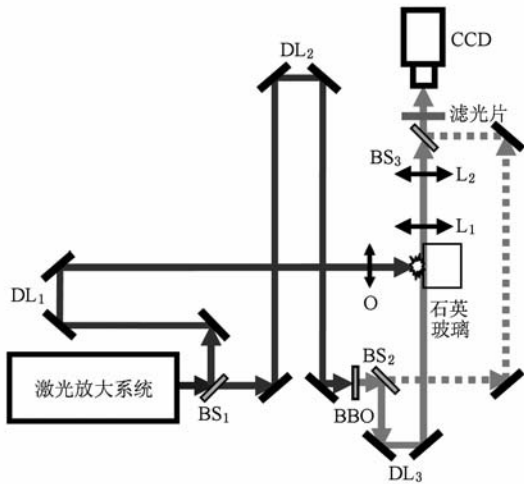


图1 实验装置图. BS为分光板;DL为延迟线;O为显微镜;L为透镜(带有虚线和不带有虚线的光路装置分别用于全息和阴影记录)

### 3. 实验结果及分析

图2 为在烧蚀实验中记录下的石英玻璃靶外部物质喷射的时间分辨数字全息图. 实验中, 入射到靶面的激光脉冲的能量和能流密度分别为 0.17 mJ 和  $40 \text{ J/cm}^2$ . 这一系列超快时间分辨的全息图反映了喷射物时空演化的动态过程.

通过对图2 进行数字再现, 获得了相位差分布

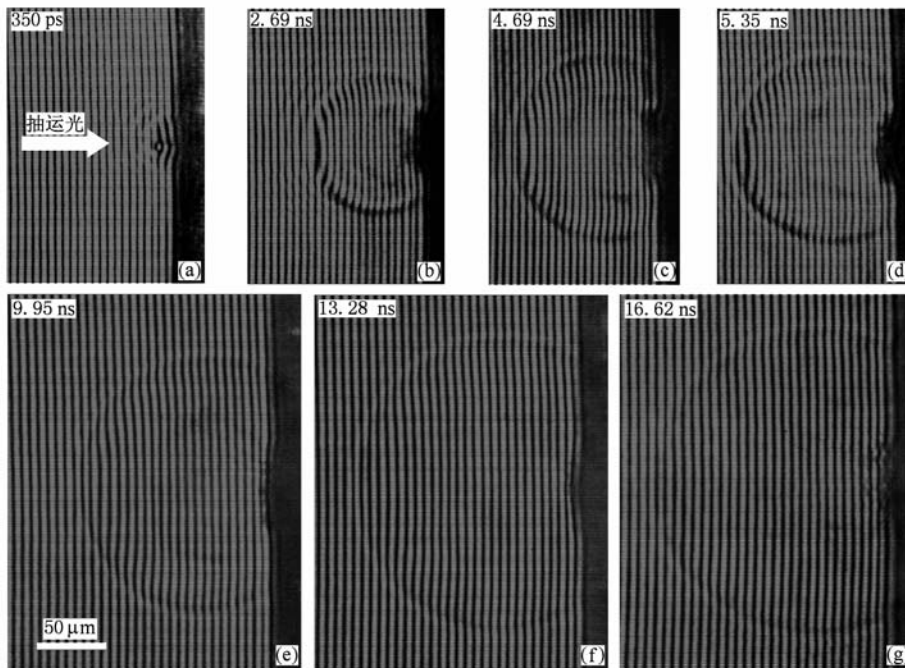


图2 不同时间延迟下石英玻璃外部物质喷射的全息图

图,如图3 所示,该图定量地展示了被喷射物调制后的探测光的相位信息. 相位差为正值表示折射率小于空气折射率,而相位差为负值则表示折射率大于空气折射率. 为了更加清楚地展示和分析喷射物的结构,我们根据图3 绘制出了喷射物结构的示意图,如图4 所示.

从图3 和图4 可以看出,冲击波前端A 和电离前端B 包裹着一个具有负值相位差的薄层. 该薄层中的物质为被冲击波挤压的空气,其折射率大于未受扰动的空气的折射率. 另外,电离前端B 和目标靶表面所包围的区域被具有较高相位梯度的分界面,即接触前端<sup>[10,12]</sup> C,分成两个不断膨胀的子区域 SA<sub>1</sub> 和 SA<sub>2</sub> (如图4 所示). 接触前端C 的形成表明目标靶外的动态过程包含由单个激光脉冲引发的两次物质喷射<sup>[10]</sup>. 在第一次和第二次喷射中喷射出的物质分别位于子区域 SA<sub>1</sub> 和 SA<sub>2</sub> 中. 接触前端C 可以看成是 SA<sub>1</sub> 和 SA<sub>2</sub> 的分界面,其内部较低的相位差值表明较高的折射率;这也表明第二次喷射出的物质具有较少的自由电子和较低的电离度.

图3(b)至(g)表明,子区域 SA<sub>1</sub> 内的相位差始终大于0,这说明第一次喷射出的物质的折射率始终小于1,因此第一次喷射出的物质主要为自由电子和离子. 而对于第二次物质喷射,子区域 SA<sub>2</sub> 内的相位差在某些位置处小于0,这表明第二次喷射出的物质中包含折射率大于1的物质. 因此喷射物中

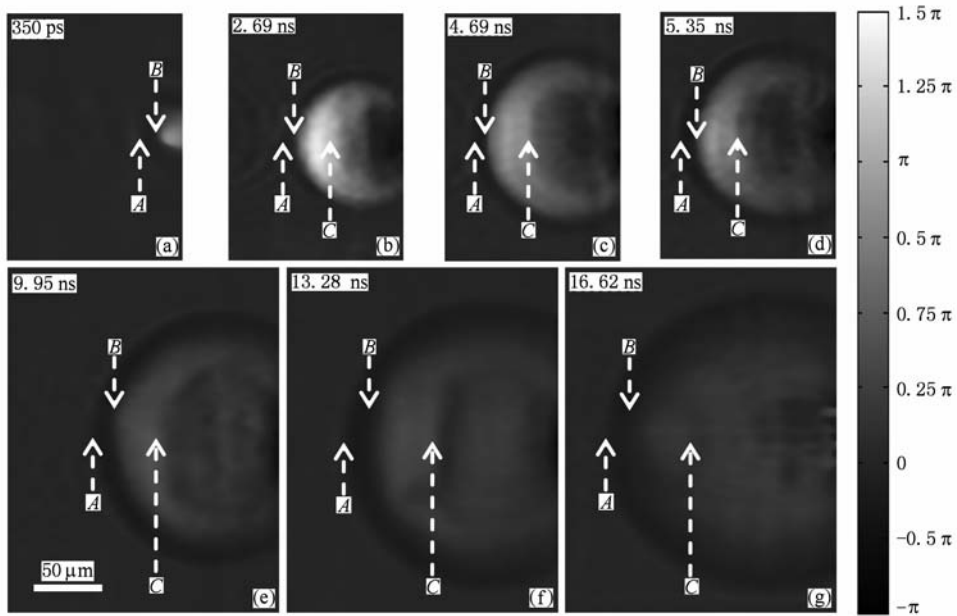


图3 喷射物对探测光的相位差分布图 A为冲击波前端;B为电离前端;C为接触前端

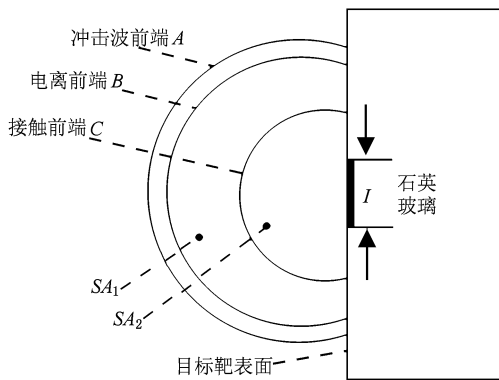


图4 喷射物结构的示意图 SA为子区域;I为激光辐照区域

可能存在中性原子和分子,而这些中性原子和分子可能是由于临界点相位分离机理<sup>[13]</sup>产生的.另外,由图3(b)至(g)可以看出,随着延迟时间的增加,喷射物内部的相位差逐渐趋近于0,即喷射物的折射率逐渐趋近于空气折射率,并且接触前端C逐渐变得不清晰.这可能是因为喷射物的膨胀和扩散以及等离子体的复合造成的.

由于石英玻璃具有光学透明性,因此除了记录目标靶外部的物质喷射过程之外,还能够记录石英玻璃内部动态过程的阴影图,如图5所示.图中左侧的竖直黑色条纹为目标靶表面.石英玻璃内部的水平黑色条纹F是激光诱导的电子激发通道,即强烈地吸收探测光的成丝<sup>[14]</sup>.

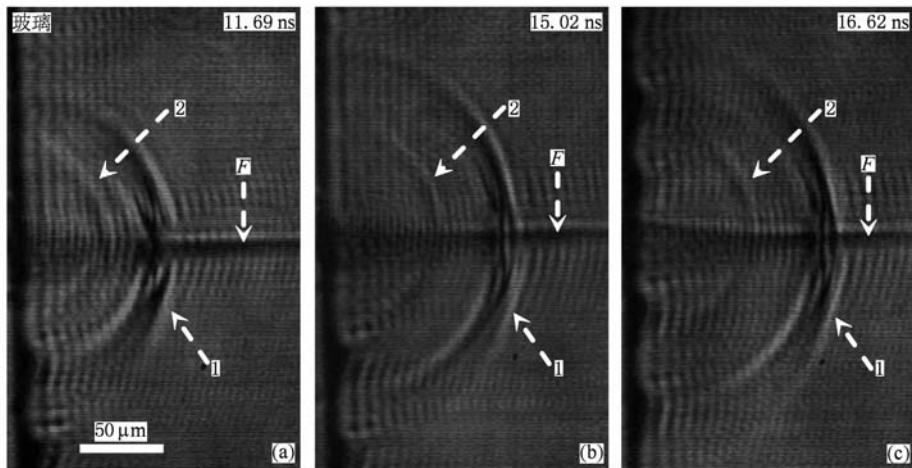


图5 烧蚀过程中石英玻璃内部的阴影图(第一个和第二个应力波的前端分别以1和2标示,成丝以F标示)

另外,更为引人注目的是,在图 5 中可以观察到烧蚀过程中在石英玻璃内部产生的两个应力波. 测量结果表明第一个和第二个应力波的传播速度分别为 6 km/s 和 2.9 km/s. 随着延迟时间的增加,这两个应力波由于速度的不同而彼此远离,如图 5(a)至(c)所示. 第一个应力波是由激光加热物质的热膨胀产生的热弹力波<sup>[10,15]</sup>. 而利用文献[10]对强飞秒激光烧蚀过程中靶内物质动力学的分析,可以解释第二个应力波的产生机理. 在烧蚀过程中,一部分被激光加热的物质将承受热膨胀产生的压力从而朝靶内深处运动,这将导致相邻分子间距离的减小,从而导致分子间斥力的急剧增加. 当斥力增加至足以克服压力时,其将通过膨胀向内部和外部释放. 向外的斥力释放会导致第二次物质喷射,并在靶面外部形成接触前端,如图 3(b)至(g)所示. 而与此同时向内的斥力释放会挤压靶的内部,从而产生第二个应力波. 因此,第二个应力波是由机械膨胀而不是由热膨胀产生的,因而它不是热弹力波,这与第一个应力波不同.

#### 4. 结 论

时间分辨的数字全息图和阴影图直观地展示了强飞秒激光烧蚀石英玻璃的动态过程. 从数字全息图中提取出了石英玻璃外部喷射物对探测光的相位调制信息,并据此推断出喷射物中可能包含中性原子和分子,并且平均折射率的增加应该是由喷射物的膨胀和扩散以及等离子体的复合导致的. 另外,我们还记录了石英玻璃内部动态过程的阴影图,并在其中观察到了两个应力波. 根据分析,第一个应力波是热弹力波,而第二个应力波是由向靶内的斥力释放产生的,而与此同时向靶外的斥力释放导致了靶外部的第二次物质喷射. 本文观察到的两个应力波进一步证明了热弹力波这一光机械机理在强飞秒激光烧蚀过程中具有重要的作用.

作者感谢朱晓农教授和张楠博士给予的有益探讨以及李璐杰硕士在实验中的帮助.

- [1] Sun H, He F, Zhou Z, Cheng Y, Xu Z, Sugioka K, Midorikawa K 2007 *Opt. Lett.* **32** 1536
- [2] Sun Q, Liang F, Vallee R, Chin S L 2008 *Opt. Lett.* **33** 2713
- [3] Zeng X, Mao X, Mao S S, Wen S B, Greif R, Russo R E 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 061502
- [4] Salleo A, Genin F Y, Feit M D, Rubenchik A M, Sands T, Mao S S, Russo R E, 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2840
- [5] Deng Y P, Jia T Q, Leng Y X, Lu H H, Li R X, Xu Z Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2216 (in Chinese) [邓蕴沛、贾天卿、冷雨欣、陆海鹤、李儒新、徐至展 2004 物理学报 **53** 2216]
- [6] Yu B H, Dai N L, Wang Y, Li Y H, J L L, Z Q G, Lu P X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5821 (in Chinese) [余本海、戴能利、王英、李玉华、季玲玲、郑启光、陆培祥 2007 物理学报 **56** 5821]
- [7] Hu H F, Wang X L, Li Z L, Zhang N, Hong C Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7662 (in Chinese) [胡浩丰、王晓雷、李智磊、张楠、翟宏琛 2009 物理学报 **58** 7662]
- [8] Wang X L, Zhai H C, Mu G G 2006 *Opt. Lett.* **31** 1636
- [9] Wang X L, Zhai H C 2007 *Opt. Commun.* **275** 42
- [10] Zhang N, Zhu X N, Yang J J, Wang X L, Wang M W 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 167602
- [11] Zhao J, Dong Q L, Wang S J, Zhang L, Zhang J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2517
- [12] Callies G, Berger P, Hugel H 1995 *J. Phys. D:Appl. Phys.* **28** 794
- [13] Vidal F, Johnston T W, Laville S, Barthelemy O, Chaker M, Drogoff B L, Margot J, Sabsabi M 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 2573
- [14] Mao X, Mao S S, Russo R E 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 697
- [15] Wang X, Xu X 2001 *Appl. Phys. A* **73** 107

## Time-resolved optical diagnosis of intense femtosecond laser ablation of silica glass\*

Hu Hao-Feng<sup>1)</sup> Wang Xiao-Lei<sup>1)†</sup> Guo Wen-Gang<sup>2)</sup> Zhai Hong-Chen<sup>1)‡</sup> Wang Pan<sup>1)</sup>

1) (*Institute of Modern Optics, Nankai University, Key Laboratory of Optoelectronic Information Science & Technology, Ministry of Education, Tianjin 300071, China*)

2) (*Department of Basic Science, Institute of Military Traffic, Tianjin 300161, China*)

(Received 15 March 2010; revised manuscript received 23 March 2010)

### Abstract

The dynamic process of femtosecond laser pulse ablation of silica glass has been experimentally investigated by ultrafast time-resolved optical diagnosis. The digital holograms of material ejections outside the silica glass are recorded, and two-dimensional phase difference maps at different delay times are obtained, from which the composition and the structure of the ejected materials are deduced. Besides, the time-resolved shadowgraphs of the phenomena inside the silica glass are also recorded, and the evolution process of two stress waves inside the silica glass is observed in the shadowgraphs, which are believed to be related to two material ejections outside the target.

**Keywords:** pulsed digital holography, femtosecond laser ablation, ultra-fast time resolved, stress wave

**PACS:** 79.20.Ds, 42.40.Kw, 78.47.Cd

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10904079 and 60838001) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant Nos. 20090031120041 and 20070055029).

† Corresponding author. E-mail: wangxiaolei@nankai.edu.cn

‡ E-mail: zhai@nankai.edu.cn