

飞秒激光成丝诱导 Cu 等离子体的温度和电子密度

杨大鹏 李苏宇 姜远飞 陈安民 金明星

Temperature and electron density in femtosecond filament-induced Cu plasma

Yang Da-Peng Li Su-Yu Jiang Yuan-Fei Chen An-Min Jin Ming-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 115201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.115201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.115201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1064nm 纳秒激光对熔石英元件后表面击穿的实验与数值研究

Experimental and computational study of damage process induced by 1064 nm nanosecond laser pulse on the exit surface of fused silica

物理学报.2016, 65(15): 155201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.155201>

杨树叶片的飞秒等离子体丝诱导击穿光谱研究

Analysis of heavy metals in poplar leaves by femtosecond filament-induced breakdown spectroscopy

物理学报.2015, 64(17): 175203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.175203>

基于飞秒激光等离子体丝诱导击穿光谱探测土壤重金属 Cr 元素含量

Detection of heavy metal Cr in soil by the femtosecond filament induced breakdown spectroscopy

物理学报.2014, 63(9): 095203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.095203>

激光冲击波压缩稠密铝辐射不透明度实验研究

Experimental studies on the opacity of dense aluminum compressed by a laser-driven shock waves

物理学报.2013, 62(12): 125202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.125202>

土壤中重金属元素的双脉冲激光诱导击穿光谱研究

Analyses of heavy metals by soil using dual-pulsed laser induced breakdown spectroscopy

物理学报.2013, 62(4): 045202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.045202>

# 飞秒激光成丝诱导Cu等离子体的温度和电子密度\*

杨大鹏<sup>1)</sup> 李苏宇<sup>2)3)</sup> 姜远飞<sup>2)3)</sup> 陈安民<sup>2)3)†</sup> 金明星<sup>2)3)‡</sup>

1)(吉林大学仪器科学与电气工程学院, 地球信息探测仪器教育部重点实验室, 长春 130012)

2)(吉林大学原子与分子物理研究所, 长春 130012)

3)(吉林省应用原子分子光谱重点实验室, 长春 130012)

(2017年2月22日收到; 2017年4月5日收到修改稿)

研究了飞秒激光成丝诱导铜击穿光谱, 利用光发射光谱对产生的铜等离子体光谱强度沿着丝长度进行了测量, 获得了在不同样品与聚焦透镜间距离的Cu(I)的强度分布. 结果显示, 由于强度钳箍效应成丝诱导的光谱在较大的透镜样品间距离范围内有较强的辐射强度. 另外, 利用玻尔兹曼图和斯塔克展宽计算了整个成丝繁衍距离中Cu等离子体温度和电子密度.

**关键词:** 激光诱导击穿光谱, 飞秒激光成丝, 等离子体温度, 电子密度

**PACS:** 52.50.Lp, 52.38.Mf, 32.30.Jc, 42.62.Fi

**DOI:** 10.7498/aps.66.115201

## 1 引言

在过去的20年里, 激光诱导等离子体光谱技术被认为是一种强有力的元素分析技术, 受到人们越来越多的关注<sup>[1]</sup>. 这种方法的特点是样品处理简单, 分析速度快; 需要样品量小, 近似无损分析; 配合光纤技术应用, 可实现远距离遥测; 特别是在难溶物质分析方面也显示了此方法的优越性. 世界著名的分析光谱专家 Winefordner 博士<sup>[2]</sup> 在他的一篇综述论文中将激光诱导击穿光谱称为“未来超级巨星”. 激光等离子体光谱分析方法具有高检测灵敏度、可实现在线检测、能够进行物质的快速定性定量分析等优点, 已经在许多研究领域得到了证实, 如土壤分析、冶金和采矿工业、珍藏艺术品、陶瓷制品分析、组织器官分析和制药行业<sup>[3]</sup> 等. 近年来, 激光诱导击穿光谱学 (LIBS) 和激光诱导等离子体光谱学 (LIPS) 等光谱技术所适用的样品范围

越来越广, 不仅对固体样品, 对气体和液体样品中物质成分的分析也取得了可喜成果<sup>[4,5]</sup>.

LIBS 可以远程操作是其中的一个重要的特点, 这一特性加大了这项技术的应用领域. 当待测试样品处于难以到达的危险区域时, 必须进行远程操作, 例如特殊地质的矿物分析、化学或核污染的工业或城市区域、大厦表面的污染物探测<sup>[6]</sup> 等. 传统的方法是用纳秒脉冲激光通过透镜聚焦到一个较长的距离去激发样品, 根据光学定律, 由于衍射的结果, 聚焦的直径随着距离的增加而逐渐增大. 随着距离的增加将需要极高的激光能量和很大焦距的聚焦透镜, 这在实际应用中令人望而却步. 因此在很长距离采用高激光能量密度和超越衍射极限的 LIBS 是远程元素分析的一个重要的难点<sup>[7]</sup>.

基于光学克尔效应的飞秒激光成丝是一个非常有趣的现象, 可以应用到远程探测中<sup>[8]</sup>. 超快激光传播过程中产生的长丝是非常窄的光束, 激光光

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11674128, 11474129, 11504129)、吉林省科技发展计划 (批准号: 20170101063JC) 和吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目 (批准号: 2016[400]) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: amchen@jlu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: mxjin@jlu.edu.cn

束的束腰在整个繁衍距离中几乎接近一个恒定的值, 远超过瑞利长度. 飞秒激光成丝已经被应用到许多领域, 包括大气气体和气溶胶的遥感、闪电控制、激光诱导光谱、相干反斯托克斯拉曼散射和太赫兹辐射的产生<sup>[9]</sup>. Durand等<sup>[10]</sup>在2013年已经演示了成丝的距离到达了1 km. 相比于纳秒LIBS, 飞秒激光成丝后的激光能量密度( $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>) 在很长的距离位置足以烧蚀并激发样品, 这就克服了纳秒激光的衍射极限的影响<sup>[11,12]</sup>.

虽然已有很多针对飞秒激光几何聚焦和成丝的LIBS的研究<sup>[13-16]</sup>, 但飞秒成丝诱导光谱的特性并不完全清楚. 例如, 几乎没有针对整个成丝距离范围内等离子体激发温度和电子密度变化的研究. 本文演示了飞秒激光成丝诱导铜等离子体光谱, 并通过谱线强度和谱线宽度计算了成丝激发等离子体的温度和电子密度.

## 2 实验装置

飞秒脉冲激光成丝诱导等离子体光谱实验装置如图1所示. 使用的飞秒激光系统是一台一体化的Ti:sapphire放大器(Coherent Libra), 激光系统输出的激光波长为800 nm, 重复频率为1 kHz, 脉冲宽度为50 fs. 一个焦距为1 m的石英透镜被用来聚焦激光产生等离子体的丝状通道, 同时这个聚焦透镜被安装到一个计算机控制的电动位移台来改变透镜与样品表面之间的距离. 飞秒激光成丝作用于Cu (99.9%)靶产生等离子体, 铜靶被安装在另一个计算机控制的三维位移台(Thorlabs, PT3/M-Z8), 这个位移台保证每个激光脉冲照射前

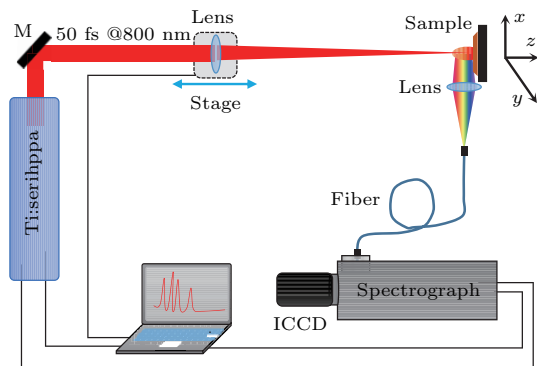


图1 飞秒激光成丝诱导铜等离子体光谱测量实验装置示意图

Fig. 1. Experimental setup for femtosecond filament-induced Cu plasma spectroscopy.

样品表面是新的. 成丝诱导的等离子体光谱用一个透镜(BK7, 焦距为75 mm)进行收集, 收集到的光通过光纤导入到一台光谱仪(Spectra Pro 500, PI Acton), 光谱仪的光栅为150, 1200和2400 grooves/mm. 通过光谱仪散射的光谱用一个ICCD (PI-MAX4, Princeton Instruments,  $1024 \times 1024$  pixels)相机进行探测, ICCD的同步信号来自于飞秒激光系统的同步与延迟发生器(SDG). ICCD的输出数据通过一台计算机进行记录. 整个实验过程在大气压的环境中进行.

## 3 结果与讨论

在整个实验过程中, 激光能量为3.5 mJ. 我们首先选用150 grooves/mm的光栅对产生的等离子体光谱进行探测, 观察到的谱线是Cu(I)的510.55, 515.32和521.82 nm, 随后, 我们选择1200 grooves/mm的光栅来提高光谱的分辨率. 另外, 为了避免连续谱和提高光谱的信噪比, ICCD的延迟时间设置为700 ns, 门宽设置为10  $\mu$ s. 典型的成丝诱导的铜等离子体发射光谱如图2所示, 沿着等离子体通道样品与透镜之间的距离分别为970, 1000和1030 mm, 测量的波长范围是505—525 nm. 图中有一凹陷, 这是ICCD在此处有坏点, 测量的光谱也避开了这个位置. 在纳秒激光诱导击穿光谱里, 可很容易地观察到较强的离子谱线, 而在大多飞秒诱导击穿的光谱里, 通常观察到的仅仅是原子谱线. 这是由于飞秒激光脉冲持续时间短, 几乎不存在激光与等离子体的相互作用<sup>[17]</sup>.

图3给出了飞秒激光成丝诱导铜等离子体光谱随着聚焦透镜与样品表面距离和波长的分布. 可以看出成丝诱导的等离子体光谱在960—1035 nm范围内都有较强的光谱发射强度, 能产生较强的等离子体光谱的长度范围大约为75 mm. 这个距离能有效地减小样品表面与透镜间距离对光谱发射强度的影响. 为了详细地了解光谱强度分布, 图4显示了成丝诱导等离子体光谱中Cu(I) 510.55 nm的强度随着透镜与样品距离的变化关系. 从图中可以看出, 光谱强度随着距离的增加而逐渐增加. 在大约990 mm处, 成丝诱导的等离子体光谱强度达到最大值. 继续增加透镜与样品的距离, 光谱强度逐渐降低. 而在1005—1015 mm的范围内, 光谱强度的变化出现了一个台阶, 这是由于飞秒激光成丝再

聚焦的结果. 这不同于传统的激光诱导等离子体的光谱强度的随着透镜与样品表面距离的变化, 传统短焦距的结果一般在透镜焦点位置左右两边有对称的辐射强度分布.

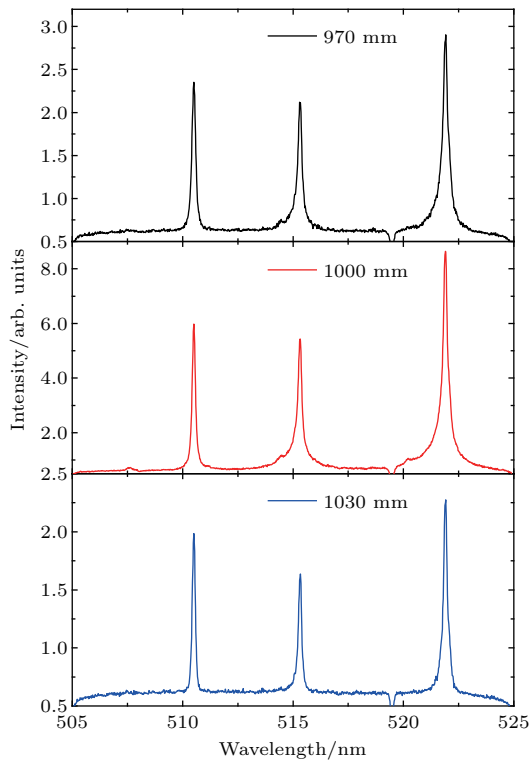


图2 典型的不同透镜与样品表面距离的飞秒激光成丝诱导Cu击穿光谱 波长范围为505—525 nm, 激光能量为3.5 mJ  
Fig. 2. Typical femtosecond filament-induced Cu plasma spectroscopy at different distances between lens and sample. Range of wavelength is 505–525 nm, laser energy is 3.5 mJ.

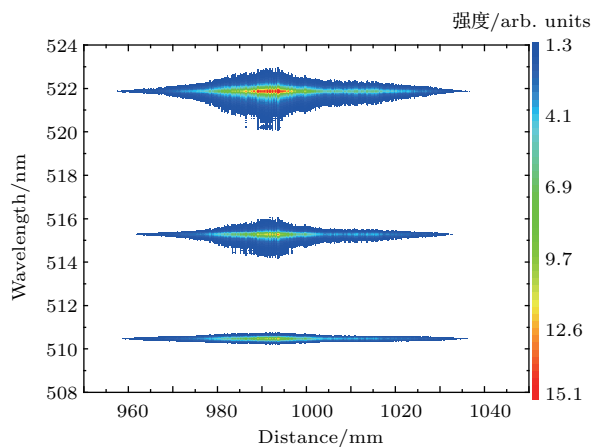


图3 (网刊彩色) 飞秒激光成丝诱导Cu击穿光谱随着透镜样品距离和波长的分布 波长范围为505—525 nm, 距离为950—1050 mm, 激光能量为3.5 mJ  
Fig. 3. (color online) Distribution of femtosecond filament-induced Cu plasma spectroscopy with wavelength and distance between lens and sample. Range of wavelength is 505–525 nm, distance is from 950 to 1050 mm, laser energy is 3.5 mJ.

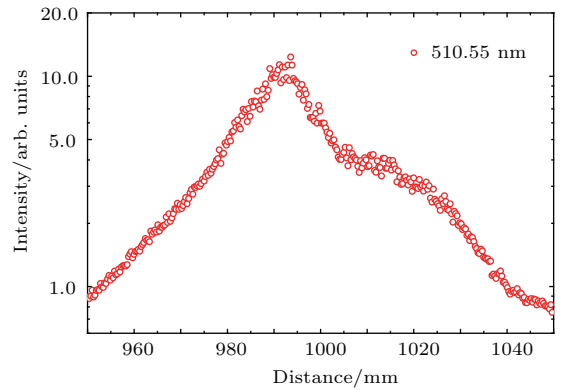


图4 飞秒激光成丝诱导Cu击穿光谱中Cu(I) 510.55 nm谱线随着透镜样品距离变化(距离为950—1050 mm, 激光能量为3.5 mJ)  
Fig. 4. Evolution of spectral intensity of Cu(I) 510.55 nm with the distance between lens and sample. Distance is from 950 to 1050 mm, laser energy is 3.5 mJ.

图5显示了Cu(I) 510.55 nm的信背比随着透镜与样品表面距离的变化, 信背比的计算来自于图3, 信背比的计算是线状光谱的强度与背景连续谱(基线)的比值. 信背比的变化类似于光谱强度的变化, 信背比随着距离的增加而增加, 在大约990 mm处达到了最大值. 继续增加透镜与样品表面的距离, 信背比降低, 在1005—1015 mm的范围时, 光谱强度的变化出现了一个台阶, 而后有一个拖尾状的变化. 图4和图5的变化符合飞秒激光诱导空气成丝的荧光强度沿着丝通道的分布.

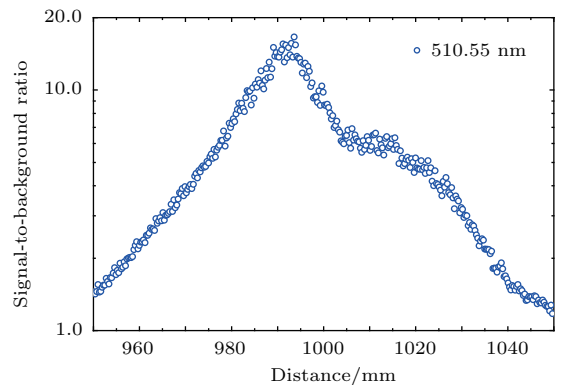


图5 飞秒激光成丝诱导Cu击穿光谱中Cu(I) 510.55 nm谱线信背比(SBR)随着透镜样品距离变化(距离为950—1050 mm, 激光能量为3.5 mJ)  
Fig. 5. Evolution of signal-to-background ratio (SBR) of Cu(I) 510.55 nm with the distance between lens and sample. Distance is from 950 to 1050 mm, laser energy is 3.5 mJ.

等离子体激发温度和电子密度是等离子体中两个重要的参数, 这两个参数能帮助我们理解等离子体的特点和许多等离子体中的过程. 讨论等

离子体温度必须假定等离子体处在局域热平衡 (LTE) 的条件下, 用于计算等离子体激发温度方程如下 [18]:

$$\ln\left(\frac{\lambda I}{g_k A_{ki}}\right) = -\frac{E_k}{k_B T} + C, \quad (1)$$

这里,  $\lambda$  是光谱的波长,  $I$  是光谱强度,  $A_{ki}$  是跃迁强度,  $g_k$  和  $E_k$  是上能级的简并与能量,  $k_B$  是玻尔兹曼常数,  $T$  是等离子体温度,  $C$  是常数.

通过方程 (1) 中的左边  $\ln(\lambda I/(g_k A_{ki}))$  与上能级能量  $E_k$  给出了线性拟合图, 等离子体的激发温度  $T$  可以从直线的斜率 ( $-1/(k_B T)$ ) 获得. 在当前的实验中, 用光谱线 Cu(I) 510.55 nm, Cu(I) 515.32 nm, Cu(I) 521.82 nm 来计算等离子体的激发温度  $T$ , 相应的光谱线参数如表 1 所列, 所有的谱线参数数据来源于 NIST.

典型的透镜与样品距离的玻尔兹曼图如图 6 所示, 选择的典型透镜样品距离分别为 970, 990, 1010 和 1030 mm. 从图 6 (a)–(d) 可以看出误差是比较低的, 不同位置的斜率不同. 同时, 由于

Cu(I) 515.32 nm 和 Cu(I) 521.82 nm 有非常接近的上能级能量, 得到相应的  $\ln(\lambda I/g_k A_{ki})$  值也几乎重合, 这说明了误差较低. 根据公式 ( $-1/(k_B T)$ ) 和图 6 中玻尔兹曼图的斜率, 我们就能得到等离子体的温度.

表 1 Cu(I) 的光谱参数表 [19]  
Table 1. Spectral parameters of Cu (I) [19].

波长/nm	$E_i/\text{cm}^{-1}$	$E_k/\text{cm}^{-1}$	$g_i$	$g_k$	$A_{ki}/\times 10^8/\text{s}^{-1}$
510.55	30783.69	11202.56	4	6	0.020(5)
515.32	49935.20	30535.30	4	2	0.60(15)
521.82	49942.06	30783.69	6	4	0.75(9)

电子密度是等离子体中的另一个重要参数, 等离子体电子密度根据光谱线的半高全宽  $\Delta\lambda_{1/2}$  来进行计算, 方程如下 [20]:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega \frac{N_e}{10^{16}}, \quad (2)$$

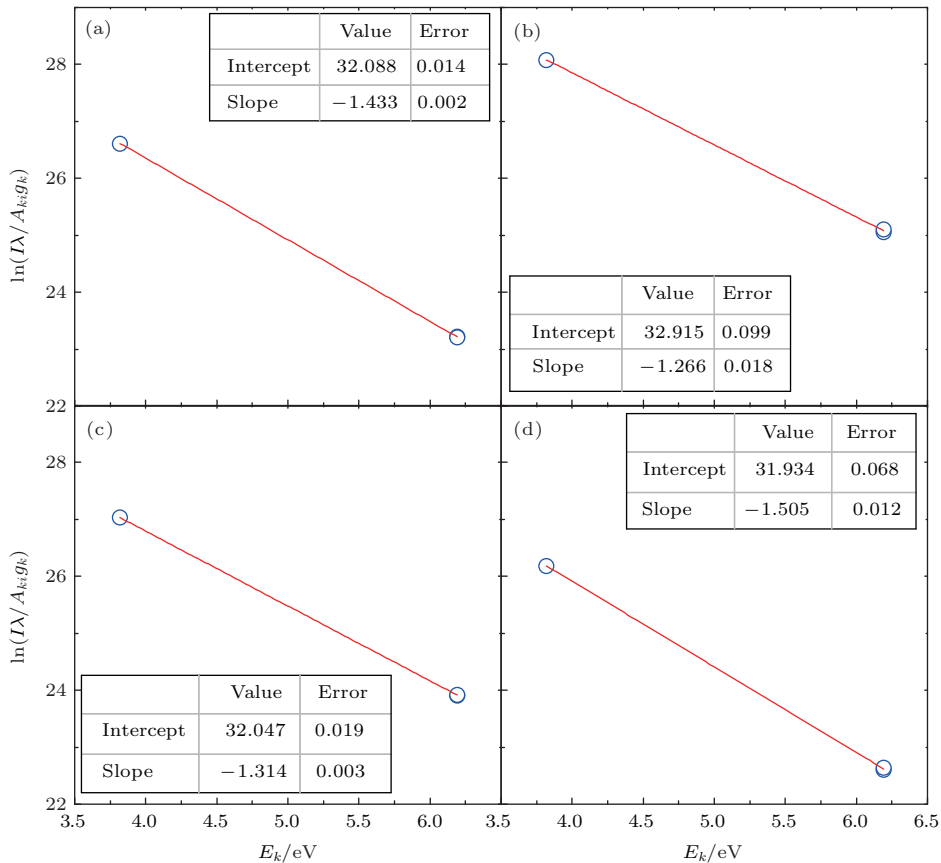


图 6 飞秒激光成丝诱导 Cu 击穿光谱典型的 Boltzmann 图 选择的典型透镜样品距离分别为 (a) 970 mm, (b) 990 mm, (c) 1010 mm 和 (d) 1030 mm

Fig. 6. Typical Boltzmann plot for femtosecond filament-induced Cu plasma spectroscopy: Selected distances between lens and sample are 970 mm (a), 990 mm (b), 1010 mm (c), and 1030 mm (d).



这里,  $\Delta\lambda_{1/2}$  是谱线的半高全宽, 即斯塔克加宽,  $N_e$  是电子密度,  $\omega$  是电子碰撞参数. 另外, 等离子体谱线加宽主要还有: 多普勒加宽  $\Delta\lambda_{FWHM}^D$ , 仪器加宽  $\Delta\lambda_{instrument}$  和自然展宽  $\Delta\lambda_{FWHM}^N$ , 即  $\Delta\lambda_{1/2} = \Delta\lambda_{observed} - \Delta\lambda_{FWHM}^D - \Delta\lambda_{FWHM}^N - \Delta\lambda_{instrument}$ . 当前, 我们用 Cu(I) 510.55 nm 谱线来计算电子密度, 波长 510.55 nm 的  $\omega$  值为 0.043 nm<sup>[21]</sup>.

图 7 显示了四个典型的透镜与样品间距离的成丝诱导等离子体光谱线中 Cu(I) 510.55 nm 的 Lorentz 拟合结果. 选择的透镜样品间距离分别为 970, 990, 1010 和 1030 mm. 在激光产生的等离子体里, 光谱线的展宽主要来源于碰撞展宽, 典型的谱线碰撞展宽用 Lorentz 线型进行描述. 可以看出, 不同位置的谱线宽度明显不同, 也就说明了各个位置的电子密度也完全不同.

为了详细地了解飞秒成丝诱导等离子体激发温度和电子密度随着透镜与样品表面间距离的变化, 我们给出了图 8. 对于等离子体激发温度, 随着距离的增加等离子体温度逐渐增加, 在大约 992 mm 处等离子体温度达到了一个极大值. 距离

继续增加, 温度先减小而后又增加到一个极大值. 之后等离子体温度逐渐降低. 对比图 4 可以看出, 等离子体激发温度反映了飞秒激光的成丝过程, 也就是聚焦-散焦-再聚焦的结果, 显然激光聚焦越强的位置等离子体温度越高. 另外从图 8 中结合等离子体温度和电子密度, 等离子体激发温度和电子密度沿着丝通道的变化可以分为三个区域: 1) 在 950—970 mm, 等离子体激发温度和电子密度随着距离的增加而逐渐增加; 2) 在 970—1030 mm 范围内, 等离子体激发温度和电子密度有着相反的变化; 3) 1030—1050 mm 范围内, 等离子体激发温度和电子密度随着距离的增加而逐渐减小. 在第一阶段, 主要是几何聚焦过程, 随着距离增加光斑面积逐渐减小, 激光能量密度增加, 使得激发产生的等离子体强度、温度和密度增加. 在第二阶段, 飞秒激光成丝过程中, 由于等离子体丝状通道的形成, 会影响等离子体羽的动力学变化, 强聚焦会比弱聚焦后形成电离度更高的等离子体通道, 这个强的电离通道由于等离子体的减阻效应而降低了等离子体膨胀的阻力<sup>[22]</sup>, 因此, 等离子体羽会膨胀得更大,

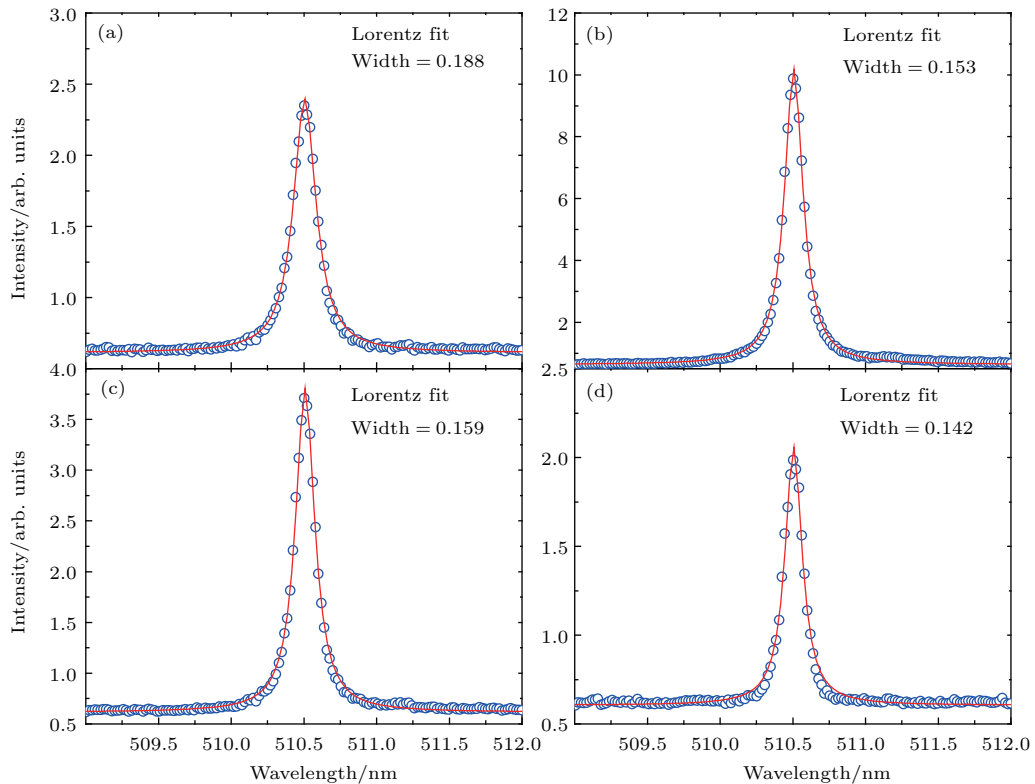


图 7 飞秒激光成丝诱导 Cu 击穿光谱典型的 Lorentz 拟合图 选择的典型透镜样品距离分别为 (a) 970 mm, (b) 990 mm, (c) 1010 mm 和 (d) 1030 mm; 波长为 510.55 nm

Fig. 7. Typical Lorentz fitting for femtosecond filament-induced Cu plasma spectroscopy: Selected distances between lens and sample are 970 mm (a), 990 mm (b), 1010 mm (c), and 1030 mm (d); spectral line is Cu (I) 510.55 nm.

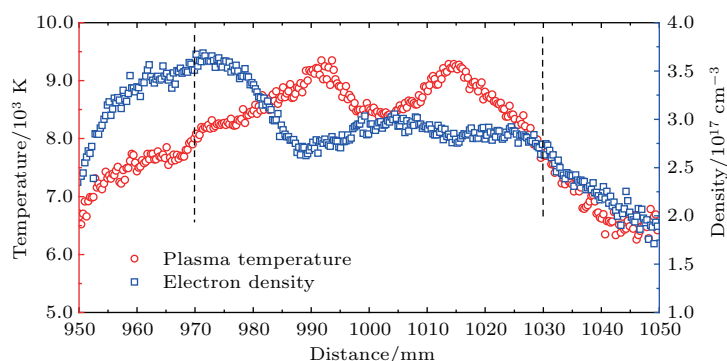


图8 (网刊彩色) 飞秒激光成丝诱导Cu击穿光谱的等离子体温度和电子密度随着透镜样品距离变化(距离为950—1050 mm, 激光能量为3.5 mJ)

Fig. 8. (color online) Plasma temperature and electron density with the distance between lens and sample for femtosecond filament-induced Cu plasma spectroscopy. Distance is from 950 to 1050 mm, laser energy is 3.5 mJ.

这使得电子密度降低了,这也反映了飞秒成丝中激光的横截面积的变化.在第三阶段,由于空气的电离消耗了很多激光的能量,这样不足以使得飞秒激光再聚焦,此阶段主要是激光散焦阶段,因此,激光光斑面积逐渐增大,激光能量密度逐渐降低,使得产生的等离子体逐渐变弱.

## 4 结 论

研究了飞秒激光成丝诱导Cu等离子体光谱,由于光学克尔效应成丝诱导的光谱在较大范围内有较强的辐射强度.同时,利用玻尔兹曼图和斯塔克展宽计算了整个成丝繁衍距离中的等离子体温度和电子密度.结果发现沿着丝通道产生的Cu等离子体的温度和电子密度在自聚焦与自散焦阶段有相反的变化关系,较强的自聚焦位置等离子体温度有极大值,而电子密度出现极小值.这源于自聚焦与散焦过程中产生等离子体丝状通道中电离度的不同,进而影响等离子体羽的动力学的变化.

## 参考文献

[1] Miziolek A W, Palleschi V, Schechter I 1997 *Crit. Rev. Anal. Chem.* **27** 257  
 [2] Winefordner J D, Gornushkin I B, Correll T, Gibb E, Smith B W, Omenetto N 2004 *J. Anal. Atom. Spectrom.* **19** 1061  
 [3] Lu C P, Liu W Q, Zhao N J, Liu L T, Chen D, Zhang Y J, Liu J G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 045206 (in Chinese) [鲁翠萍, 刘文清, 赵南京, 刘力拓, 陈东, 张玉钧, 刘建国 2011 物理学报 **60** 045206]  
 [4] Fortes F J, Moros J, Lucena P, Cabalín L M, Laserna J J 2013 *Anal. Chem.* **85** 640  
 [5] Wu Y Q, Liu J, Mo X X, Sun T, Liu M H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 054206 (in Chinese) [吴宜青, 刘津, 莫欣欣, 孙通, 刘木华 2017 物理学报 **66** 054206]

[6] Rohwetter P, Stelmaszczyk K, Woste L, Ackermann R, Méjean G, Salmon E, Kasparian J, Yub J, Wolf J P 2005 *Spectrochim. Acta B* **60** 1025  
 [7] Xu H L, Bernhardt J, Mathieu P, Roy G, Chin S L 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 033124  
 [8] Li S Y, Guo F M, Song Y, Chen A M, Yang Y J, Jin M X 2014 *Phys. Rev. A* **89** 3732  
 [9] Chin S L 2010 *Femtosecond Laser Filamentation* (New York: Springer)  
 [10] Durand M, Houard A, Prade B, Mysyrowicz A, Durecu A, Moreau B, Fleury D, Vasseur O, Borchert H, Diener K 2013 *Opt. Express* **21** 26836  
 [11] Xu S, Bernhardt J, Sharifi M, Liu W, Chin S L 2012 *Laser Phys.* **22** 195  
 [12] Xu S, Zheng Y, Liu Y, Liu W 2010 *Laser Phys.* **20** 1968  
 [13] Harilal S S, Yeak J, Brumfield B E, Phillips M C 2016 *Opt. Express* **24** 17941  
 [14] Stelmaszczyk K, Rohwetter P, Mejean G, Yu J, Salmon E, Kasparian J, Ackermann R, Wolf J P, Woste L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3977  
 [15] Gao X, Du C, Li C, Liu L, Song C, Hao Z Q, Lin J Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 095203 (in Chinese) [高勋, 杜闯, 李丞, 刘璐, 宋超, 郝作强, 林景全 2014 物理学报 **63** 095203]  
 [16] Zhang Y W, Gao X, Zhang Y, Song C, Lin J Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 175203 (in Chinese) [张亚维, 高勋, 张原, 宋超, 林景全 2015 物理学报 **64** 175203]  
 [17] Labutin T A, Lednev V N, Ilyin A A, Popov A M 2015 *J. Anal. Atom. Spectrom.* **30** 90  
 [18] Chen A, Jiang Y, Wang T, Shao J, Jin M 2015 *Phys. Plasmas* **22** 033301  
 [19] Atomic Spectral Database [http://physicsnistgov/Phys-RefData/ASD/lines\\_formhtml](http://physicsnistgov/Phys-RefData/ASD/lines_formhtml)  
 [20] Wang Y, Chen A, Li S, Sui L, Liu D, Tian D, Jiang Y, Jin M 2016 *J. Anal. Atom. Spectrom.* **31** 497  
 [21] Wiese W L, Fuhr J R, Lesage A, Konjevic, N 2002 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **31** 819  
 [22] Fu N, Xu D G, Zhang G Z, Yao J Q 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 0202003 (in Chinese) [付宁, 徐德刚, 张贵忠, 姚建铨 2015 中国激光 **42** 0202003]

# Temperature and electron density in femtosecond filament-induced Cu plasma\*

Yang Da-Peng<sup>1)</sup> Li Su-Yu<sup>2)3)</sup> Jiang Yuan-Fei<sup>2)3)</sup> Chen An-Min<sup>2)3)</sup>† Jin Ming-Xing<sup>2)3)</sup>‡

1) (Key Laboratory of Geo-exploration Instrumentation Ministry of Education, College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

2) (Institute of Atomic and Molecular Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

3) (Jilin Provincial Key Laboratory of Applied Atomic and Molecular Spectroscopy (Jilin University), Changchun 130012, China)

( Received 22 February 2017; revised manuscript received 5 April 2017 )

## Abstract

Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), which is also known as laser-induced plasma spectroscopy (LIPS), is a very promising spectral analysis technique for detecting elemental composition. The possibility of remote operation of LIBS is one of the properties, which expands the application scope of this technique. The remote LIBS technique is based on a long-range lens. With the increase of focusing distance, it is difficult to tightly focus laser pulse due to the diffraction limits. The size of focusing spot increases with focusing distance increasing. This will require extremely high laser energy. Femtosecond laser filamentation due to optical Kerr effect can be applied to the remote LIBS. During the filament propagation, the waist of laser beam is close to a constant value. The laser intensity inside the filament is about  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> (intensity clamping). The intensity is sufficient to ablate sample and produce the plasma. It can overcome the influence of the diffraction limit in nanosecond LIBS. Although many researchers have studied the femtosecond geometrical focusing and femtosecond filamentation LIBSs, the spectral characteristics have not been completely understood. In this paper, we study the femtosecond laser filament-induced Cu plasma spectroscopy. Femtosecond laser system is an ultrafast Ti:sapphire amplifier (Coherent Libra). The full-width at the half maximum is 50 fs at a wavelength of 800 nm with a repetition rate of 1 kHz and its output energy is 3.5 mJ. A quartz lens with a focal length of 1 m is used to focus the laser to generate a filament channel. The spectral intensity of produced Cu plasma along the filament channel is measured by using the optical emission spectroscopy, and the distribution of Cu(I) intensity versus the distance between sample and focused lens is obtained. The results indicate that in a longer distance range along the filament, plasma spectroscopy has stronger emission due to the intensity clamping effect in femtosecond laser filamentation. In addition, we also calculate the plasma temperature and electron density by using the Boltzmann plot and the Stark broadening. The plasma temperature and electron density along the filament channel can be divided into three main regions: region 1) from 950 mm to 970 mm, in which the plasma temperature and electron density increase with the increase of distance; region 2) from 970 mm to 1030 mm, in which the change of plasma excitation temperature is opposite to the change of electron density; region 3) from 1030 mm to 1050 mm, in which the plasma temperature and electron density decrease with the increase of distance.

**Keywords:** laser-induced breakdown spectroscopy, femtosecond laser filament, plasma temperature, electron density

**PACS:** 52.50.Lp, 52.38.Mf, 32.30.Jc, 42.62.Fi

**DOI:** 10.7498/aps.66.115201

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11674128, 11474129, 11504129), the Jilin Province Scientific and Technological Development Program, China (Grant No. 20170101063JC), and the Thirteenth Five-Year Scientific and Technological Research Project of the Education Department of Jilin Province, China (Grant No. 2016[400]).

† Corresponding author. E-mail: [amchen@jlu.edu.cn](mailto:amchen@jlu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [mxjin@jlu.edu.cn](mailto:mxjin@jlu.edu.cn)