

飞秒激光等离子体单丝导电性能的空间分辨研究*

郭凯敏^{1) 2)} 高 勋¹⁾ 薛念亮¹⁾ 赵振明¹⁾ 李海军¹⁾ 鲁 毅²⁾ 林景全^{1)†}

1) (长春理工大学, 理学院, 长春 130022)

2) (包头师范学院, 物理科学与技术学院, 包头 014030)

(2010年11月8日收到; 2011年3月15日收到修改稿)

对飞秒激光等离子体单丝的导电性能进行空间分辨研究. 在消除测量时引入的接触电阻的影响后, 得到单丝电阻在 280—630 k Ω /cm 范围. 为了进一步研究单丝的导电性能, 对单丝诱导放电能力进行了空间分辨测量. 结果显示, 最低放电阈值降低至自发放电的 ~50%. 从每段细丝的电阻和诱导放电阈值的空间分布看出: 在成丝阶段, 二者的变化趋势基本一致, 细丝的电阻值和放电阈值均在焦点附近出现迅速下降. 将每段细丝的电阻和放电阈值相对应, 建立了细丝诱导放电阈值-电阻的线性拟合关系, 证实了细丝电阻对放电阈值的影响.

关键词: 飞秒激光, 等离子体丝, 电阻率, 接触电阻

PACS: 52. 38. Hb

1. 引言

自从 1995 年首次发现飞秒激光大气成丝现象以来^[1], 高强度超短脉冲激光大气成丝现象已经引起国内外科研人员的广泛关注^[2-8]. 飞秒激光脉冲的峰值功率高达亚 TW 甚至百 TW 量级, 即使在较弱的非线性介质空气中传输, 也很容易产生明显的非线性自聚焦效应, 形成长达百米^[9] 甚至数千米的等离子体通道^[10]. 不同于传统的短脉冲和长脉冲激光的电离, 超短脉冲激光在大气中非线性传输形成的长电离通道给科学家们多年来的激光引雷梦想带来新的希望^[11-14]. 科学家们还计划利用等离子体通道的导电性实现电能的远距离传输以及射频电磁能的定向传输^[15, 16]. 上述飞秒脉冲激光大气成丝的应用均与其导电性密切相关.

近年来, 国内外一些实验小组对细丝的导电性能进行了研究. Tzortzakis 等人^[17] 和 Yang 等人^[18] 先后测得等离子体丝的电阻率为 $\sim 1 \Omega\text{cm}$ ^[17, 18]. Schillinger 等人通过等效电路方法测得 25 cm 长细丝的电阻为 $1 \times 10^5 \Omega$ ^[19]. 张喆等人消除了测量过程中接触电阻的影响后得到细丝的最小电阻率为 $0.036 \Omega\text{cm}$ ^[20]. 迄今为止, 各研究小组对飞秒激光

等离子体通道导电性的测量主要是针对多丝组成的通道开展的, 而对单根等离子体丝导电特性的研究报道较少. 本文中我们利用一种简单方法消除测量中接触电阻的影响, 对等离子体单丝的电阻进行了研究, 并通过每段等分细丝的诱导放电阈值和电阻值的对应关系建立了细丝放电阈值-电阻的函数关系.

2. 实验装置

实验采用美国相干公司生产的啁啾脉冲放大飞秒激光系统(型号: Hydra-25-F)作为激光源, 输出中心波长 800 nm, 重复频率 10 Hz 的脉冲激光, 单脉冲输出最大能量 30 mJ, 脉冲宽度 100 fs. 为保证形成单丝, 我们控制飞秒激光输出能量为 2 mJ, 输出的飞秒脉冲激光通过 350 cm 焦距的凸透镜后在空气中可形成一段较长的单丝组成的等离子体通道.

我们分别采用图 1 所示的等离子体丝电阻测量和等离子体丝诱导高压放电两套装置对等离子体通道的每一小段的导电性进行逐个测量. 两套实验装置中, 被测电离通道均由开有小孔的电极耦合到测量电路. 图 1(a) 所示电阻测量装置中, 耦合电极为中心开有直径 0.5 mm 小孔的矩形钼质电极板, 间隙为 1 cm 或 2 cm, 直流电源输出电压为 960 V, 保

* 国家自然科学基金(批准号: 11074027, 60978014)、吉林省科技厅基金(批准号: 20100521, 20100168, 20090523)、吉林省教育厅基金(批准号: [2009]40)和长春市科技局国际合作项目(批准号: 09GH01)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: linjingquan@cust.edu.cn

护电阻为 50 kΩ,测量信号采用 2.5 GHz 带宽的数字示波器(美国 Tektronix, TDS254B)对 100 Ω 的取样电阻测量获得. 图 1(b)所示放电装置中,两电极分别为球形和矩形铜质电极,间隙为 1 cm,电离通道从中心开有直径 2.5 mm 小孔的球-板电极通过,电路中的保护电阻为 25 MΩ,直流高压电源的最大输出电压为 100 kV. 实验过程中,我们保证每次电阻测量和诱导放电测量都针对同一段细丝进行.

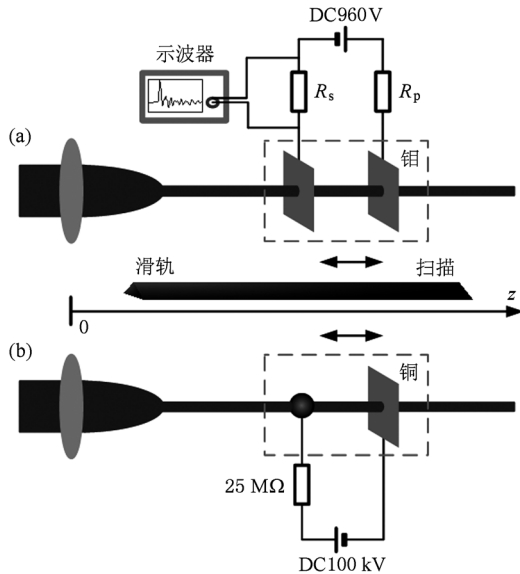


图1 (a)飞秒激光等离子体细丝电阻测量;(b)等离子体细丝诱导高压放电实验装置.

为了证实实验中产生的等离子体通道由单丝组成,我们对细丝的光斑模式进行测量. 将楔形镜置于成丝位置处使光束偏离原光路,反射光束经衰减片将光束能量衰减后进入光束质量分析仪(美国 Spiricon, LBA-712PC-D),测得等离子体通道内的光强分布.

在细丝的电阻测量实验中,每组数据均是对示波器信号的 200 次平均所得. 电路总电阻满足

$$R_{\text{总}} = R_s + R_p + R, \quad (1)$$

其中,取样电阻 R_s 为 100 Ω,保护电阻 R_p 为 50 kΩ,两电极之间的电阻 R 由被测细丝电阻 R_{fil} 和接触电阻 R_c 两部分组成. 电路电流 I 可由取样电阻 R_s 及相应的示波器信号 U_s 求得,即

$$I = \frac{U_s}{R_s}, \quad (2)$$

由(1)和(2)式得,被测细丝两端电极之间的电阻满足

$$R = \frac{U}{U_s/R_s} - R_s - R_p, \quad (3)$$

其中,电源电压 U 为 960 V.

由上述方法分别测得了 1 cm 和 2 cm 等间隔的细丝电阻,获得两种间隙下电阻空间分布. 该测量方法实际上包含接触电阻 R_c . 对此,我们采用以下做差方法可以消除接触电阻对测量结果的影响,得到更准确的细丝电阻值.

测量细丝电阻的具体方法如图 2 所示. 透镜位置为 0 点,光束传播方向为 z 轴正方向. 从成丝初始位置附近的 A 点开始,沿 z 轴分别进行 1 cm 和 2 cm 间隔的等间隔测量. 在每段细丝的测量过程中都存在接触电阻,这是由被测细丝与两电极小孔边缘的耦合过程导致的.

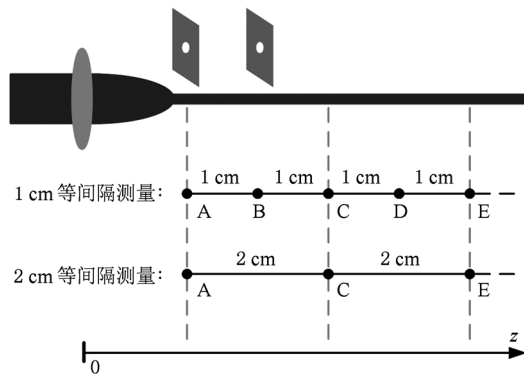


图2 细丝等间隔测量示意图

实验直接测量所得电阻为

$$R = R_{\text{fil}} + R_c. \quad (4)$$

例如,测得 AB 段(1 cm 间隙)的电阻 R_{AB} 包括等离子体丝自身的电阻 $R_{AB, \text{fil}}$ 和接触电阻 $R_{AB, c}$;测得 AC 段(2 cm 间隙)的电阻包括细丝自身电阻 $R_{AC, \text{fil}}$ 和接触电阻 $R_{AC, c}$. 测量过程中认为同一位置附近的接触电阻基本不变,如接触电阻 $R_{AB, c} = R_{AC, c}$; $R_{CD, c} = R_{CE, c}$ 等. 我们对 AC 和 AB 两段测量值做差得到 BC 段(长 1 cm)细丝本身的电阻. 即,BC 段等离子体丝本身的电阻

$$R_{BC, \text{fil}} = R_{AC} - R_{AB}, \quad (5)$$

同理,通过 CD 和 CE 段的测量值相减求得 DE 段细丝电阻,将相同的方法用于每段细丝,最终得到细丝电阻的空间分布.

3. 结果与讨论

图 3(a)为 2 mJ 能量下飞秒激光等离子体通道的光强分布. 为了对比,我们同时测量了 8 mJ 能量

下通道的光强分布,如图3(b)所示. 从2 mJ 能量的光强分布可以看出,光束能量主要集中在直径~100 μm的范围内,由此可以断定,2 mJ 能量下的等离子体通道为单丝组分. 而8 mJ 能量下光斑分布不均匀,出现多个亮点区域,所以8 mJ 能量时形成多丝(>3 个细丝).

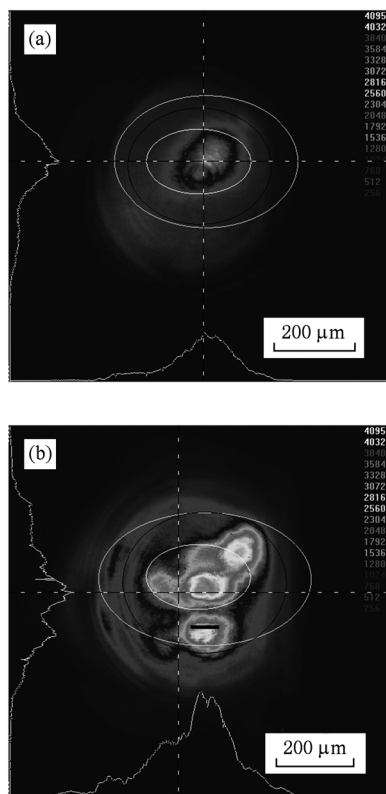


图3 (a)2 mJ 和(b)8 mJ 能量下飞秒脉冲激光等离子体通道的光斑模式

图4 给出等离子体单丝电阻及对应接触电阻的空间分布. 图中的矩形数据点都是对每一位置处1 cm 和2 cm 电极间隔的测量电阻相减得到的细丝电阻值. 通过做差的方法求得细丝最低电阻为280 kΩ/cm(电阻范围:280—630 kΩ/cm);接触电阻在180—1280 kΩ 范围. 图4 显示,等离子体丝电阻在焦点附近~5 cm 范围内变化平缓,对应的接触电阻也是最低的.

根据电阻定律 $R = \rho L/S$, 可得等离子体丝的电阻率

$$\rho_{fil} = R_{fil} S/L, \quad (6)$$

其中,细丝长度 L 为1 cm 和2 cm, 横截面积 $S = \pi d^2/4$, 直径 $d \sim 100 \mu\text{m}$. 根据(6)式求得细丝的电阻率在22—50 Ωcm 范围内.

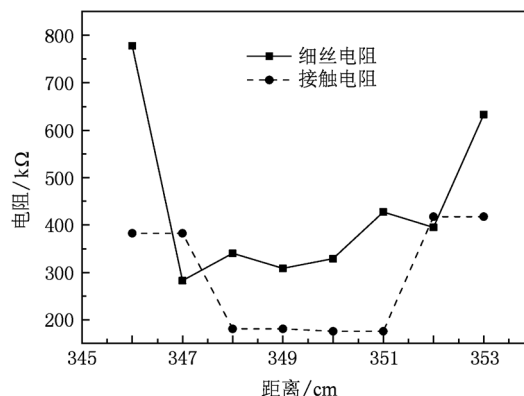


图4 等离子体单丝电阻以及测量中对应的接触电阻空间分布

本文中测得2 mJ 激光脉冲能量形成的单丝通道最低电阻率为22 Ωcm. 和多丝相比^[8, 20], 单丝通道的导电性较差. 由于一般情况下形成单丝时所用的激光脉冲能量远低于多丝时的情况, 所形成的等离子体丝相对较短, 即单丝导电长度短于多丝情况.

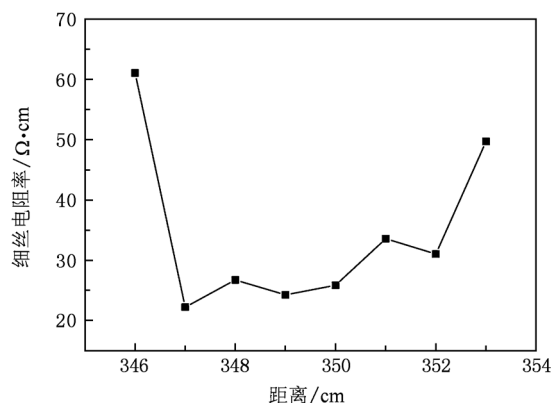


图5 等离子体单丝的电阻率空间分布

为了进一步研究细丝的导电性能, 我们对其诱导放电能力进行测量. 细丝电阻测量和诱导放电测量装置均采用两电极小孔与细丝耦合的方式. 通过两电极对空间上1 cm 等分的每段细丝电阻及其放电阈值逐一测量. 细丝电阻及其放电阈值的空间分布如图6 所示.

通过对比电阻测量与细丝诱导放电实验结果, 我们发现: 在细丝形成前期(337—345 cm 范围内), 放电阈值迅速降低, 这是因为会聚的光束沿传播方向的峰值功率密度不断提高, 到337 cm 位置时开始产生一定电离, 且电离随峰值功率密度的提高逐渐增强. 而多光子电离产生的电子成为“启动”碰撞电

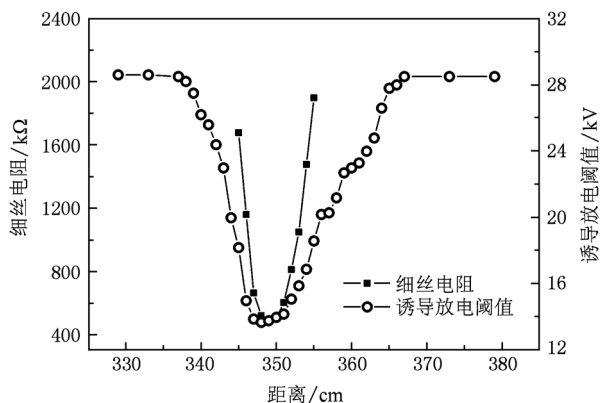


图6 等离子体单丝电阻和诱导放电阈值的空间分布. 电极间
隙为 1 cm

离的种子电子^[21],对最终的雪崩电离也至关重要. 初始电子密度越大,发生雪崩击穿所需的电场越小,以致传播方向上诱导放电阈值也愈低. 然而,较弱的多光子电离产生的初始电子密度极低,远没有达到等离子体丝的典型电子密度 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ^[17],不足以形成欧姆连接,所以该阶段没有出现明显的电阻测量信号. 在成丝阶段(345—355 cm 范围内),电阻值和放电阈值在焦点附近均出现迅速降低,且二者的变化趋势基本一致. 由于该范围内丝内光强较高,产生较强电离,所以初始电子密度较高,欧姆桥已经形成,且诱导放电阈值最低. 在细丝结束后期(355—367 cm 范围内),情况与细丝形成前期相反,沿传播方向的激光峰值功率密度逐渐降低,多光子电离产生的初始电子密度也随之减小,此时只能通过增强外加电场实现碰撞电离以致雪崩电离,表现为放电阈值逐渐升高,直至达到自发放电阈值 28.6 kV/cm ^[22].

从图 6 中整个测量范围来看,电阻测量信号的区域在 345—355 cm 范围(长 10 cm)具有较高电离,能够形成欧姆桥,所以等离子体丝长 $\sim 10 \text{ cm}$;而放电装置测得的阈值变化区域在 337—367 cm 范围,说明放电装置测量结果能够反映出细丝的形成前期、细丝的维持及其结束后期完整的电离演化过程.

我们把图 6 中成丝阶段(345—355 cm 之间)的每个测量点(1 cm 等分细丝)的电阻值和放电阈值相对应,如图 7 所示,并且进行数据拟合,建立了细

丝诱导放电阈值与其电阻值的函数关系:

$$U = 12 + 3.4 \times 10^{-3}R, \quad (7)$$

其中, U 表示 1 cm 长的细丝诱导放电阈值,单位 kV; R 表示同一段细丝的电阻值,单位 kΩ. 数据拟合结果表明:在传播方向上每段(1 cm)细丝的电阻变化范围内,放电阈值随电阻的增加而增大,并且呈线性关系.

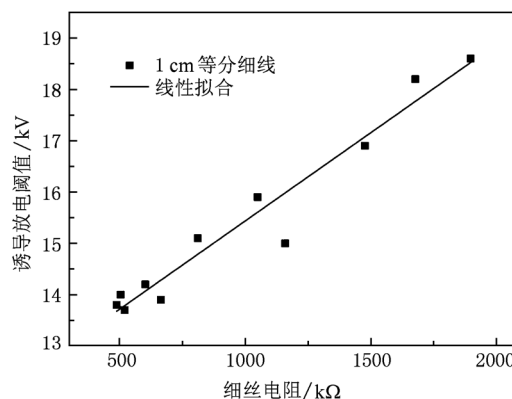


图7 等离子体单丝诱导放电阈值与其电阻的函数关系

4. 结 论

我们采用一种简单方法对等离子体单丝的电阻进行了等分测量,消除了接触电阻的影响,得到单丝电阻在 $280\text{--}630 \text{ k}\Omega/\text{cm}$ 范围内(电阻率在 $22\text{--}50 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围). 测量引入的接触电阻在 $180\text{--}1280 \text{ k}\Omega$ 范围内. 我们测得单丝通道最低电阻率 $22 \Omega\text{cm}$. 测量结果说明单丝通道的导电性较多丝通道的情况差,并且导电长度短于多丝情况.

为了进一步研究细丝的导电性能,我们对细丝的诱导放电能力进行了空间分辨测量. 通过对比发现,等离子体通道诱导放电阈值降低的空间尺度明显大于欧姆桥形成的长度. 在我们的实验条件下,发现单丝欧姆桥的长度为 $\sim 10 \text{ cm}$;在透镜焦点附近 $\sim 30 \text{ cm}$ 的长度内放电阈值均出现明显降低. 细丝电阻的空间分辨结果反映出单丝的阻值变化过程;而细丝诱导放电阈值的空间分辨实验结果反映出单丝的形成前期、成丝阶段及细丝结束后期的完整演化过程.

- [1] Braun A, Korn G, Liu X, Du D, Squier J, Mourou G 1995 *Opt. Lett.* **20** 73
- [2] Chin S L 2010 *Femtosecond Laser Filamentation* (London: Springer)
- [3] Kasparian J, Wolf J 2008 *Opt. Express* **16** 466
- [4] Couairon A, Mysyrowicz A 2007 *Phys. Rep.* **441** 47
- [5] Lu X, Xi T T, Li Y J, Zhang J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3404 (in Chinese)[鲁欣、奚婷婷、李英竣、张杰 2004 物理学报 **53** 3404]
- [6] Li Y T, Zhang J, Chen L M, Zhao L Z, Xia J F, Teng H, Li Y J, Zhu C Y, Jiang W M 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 204 (in Chinese)[李玉同、张杰、陈黎明、赵理曾、夏江帆、滕浩、李英竣、朱成银、江文勉 2001 物理学报 **50** 204]
- [7] Deng Y P, Zhu J B, Ji Z G, Liu S, Shuai B, Li R X, Xu Z Z, Théberge F, Chin, S L 2006 *Opt. Lett.* **31** 546
- [8] Hao Z, Zhang J, Zhang Z, Yuan X H, Zheng Z Y, Lu X, Jin Z, Wang Z H, Zhong J Y, Liu Y Q 2006 *Phys. Rev. E* **74** 66402
- [9] La Fontaine B, Vidal F, Jiang Z, Chien C, Comtois D, Desparois A, Johnston T, Kieffer J, Pèpin H, Mercure H 1999 *Phys. Plasmas* **6** 1615
- [10] Comtois D, Chien C Y, Desparois A, Génin F, Jarry G, Johnston T W, Kieffer J C, Fontaine B L, Martin F, Mawassi R, Pèpin H, Rizk F A M, Vidal F, Couture P, Mercure H P, Potvin C, Bondiou-Clergerie A 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 819
- [11] Rodriguez M, Sauerbrey R, Wille H, Wöste L, Fujii T, André Y B, Mysyrowicz A, Klingbeil L, Rethmeier K, Kalkner W, Kasparian J, Salmon E, Yu J, Wolf J P 2002 *Opt. Lett.* **27** 772
- [12] Kasparian J, Ackermann R, André Y, Méchain G, Méjean G, Prade B, Rohwetter P, Salmon E, Stelmaszczyk K, Yu J, Mysyrowicz A, Sauerbrey R, Wöste L, Wolf J P 2008 *Opt. Express* **16** 5673
- [13] Zhang Z, Lu X, Liang W X, Hao Z Q, Zhou M L, Wang Z H, Liu X, Zhang J 2009 *Opt. Express* **17** 3461
- [14] Zhang Z, Lu X, Liang W X, Hao Z Q, Zhou M L, Wang Z H, Liu X, Zhang J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1136
- [15] Houard A, D'Amico C, Liu Y, Andre Y B, Franco M, Prade B, Mysyrowicz A, Salmon E, Pierlot P, Cleon L M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 171501
- [16] Dormidonov A E, Valuev V V, Dmitriev V L, Shlenov S A, Kandidov V P 2007 *Proc. of SPIE* 67331S
- [17] Tzortzakis S, Franco M A, Andr Y B, Chiron A, Lamouroux B, Prade B S, Mysyrowicz A 1999 *Phys. Rev. E* **60** R3505
- [18] Yang H, Zhang J, Li Y, Zhang J, Li Y T, Chen Z L, Teng H, Wei Z Y, and Sheng Z M 2002 *Phys. Rev. E* **66** 16406
- [19] Schillinger H, Sauerbrey R Electrical 1999 *Appl. Phys. B* **68** 753
- [20] Zhang Z, Zhang J, Li Y T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 357 (in Chinese)[张喆、张杰、李玉同 2006 物理学报 **55** 357]
- [21] Wang X L, Zhang N, Zhao Y B, Li Z L, Zhai H C, Zhu X N 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 354 (in Chinese)[王晓雷、张楠、赵友博、李智磊、翟宏琛、朱晓农 2008 物理学报 **57** 354]
- [22] Zhao X M, Diels J C, Wang C Y, Elizondo J M 1995 *IEEE J. Quantum Elect.* **31** 599

Spatially-resolved measurement of conductivity of plasma single filament generated by femtosecond laser*

Guo Kai-Min¹⁾²⁾ Gao Xun¹⁾ Xue Nian-Liang¹⁾ Zhao Zhen-Ming¹⁾ Li Hai-Jun¹⁾ Lu Yi²⁾ Lin Jing-Quan^{1)†}

1) (*School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

2) (*School of Physical Science and Technology, Baotou Teachers College, Baotou 014030, China*)

(Received 18 November 2010; revised manuscript received 15 March 2011)

Abstract

Electric conductivity and high voltage breakdown threshold of single plasma filament generated by femtosecond laser are spatio resolved measured. The results show that the resistance of the single filament is in a range of 280—630 k Ω cm after eliminating the contact resistance, and the breakdown threshold can be reduced down to \sim 50% of the original value in air. Furthermore, the variations of resistance and discharge threshold follow the same trend as that for the same part filament. The relation between breakdown threshold and resistance of the single filament is established.

Keywords: femtosecond laser, plasma filament, resistivity, contact resistance

PACS: 52.38.Hb

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11074027, 60978014), the Jilin Commission of Science and Technology, China (Grant Nos. 20090523, 20100521, 20100168), the Educational Commission of Jilin Province, China (Grant No. [2009] 40), and International Cooperation projects of Changchun Technology Division, China (Grant No. 09GH01).

† Corresponding author. E-mail: linjingquan@cust.edu.cn