

空气中激光等离子体通道导电性能的研究*

张 1) 张 杰^{1)†} 李玉同¹⁾ 郝作强¹⁾ 郑志远¹⁾ 远晓辉¹⁾²⁾ 王兆华¹⁾

1) 中国科学院物理研究所光物理开放实验室 北京 100080)

2) 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室 西安 710068)

(2005 年 1 月 21 日收到 2005 年 4 月 6 日收到修改稿)

超强飞秒激光在大气中传输时,可以形成很长的等离子体通道.对通道电阻率和测量电极与等离子体通道间的接触电阻进行了测量,并对影响等离子体通道电阻率的主要因素进行了研究分析.提出减小等离子体通道电阻的方案.

关键词:等离子体通道,电阻率,接触电阻

PACC:5280D

1. 引言

近年来,超强飞秒激光在空气中的传输问题得到了各国科学家的广泛重视^[1-4].近年的很多实验研究发现,高强度的飞秒激光脉冲可以产生长达百米^[5]甚至千米^[6]的等离子体通道.激光等离子体通道导电现象与很多实际应用密切相关,例如用激光等离子体通道可以诱导闪电,实现远距离电能传输等.这些应用都要求激光等离子体通道的电阻较小.世界上很多实验室都对激光等离子体通道的电阻率进行了研究^[7-10].研究发现激光等离子体通道的电阻率与激光参数等因素有很大关系.我们利用中科院物理研究所光物理实验室的极光 II 号飞秒激光系统进行实验.该激光系统产生的激光脉冲在大气中传输形成了很长的等离子体通道,我们对此等离子体通道电阻率以及测量电极和等离子体通道间的接触电阻进行了实验测量,并对其影响因素做了研究分析.

2. 等离子体通道电阻率理论计算

激光等离子体通道的形成机理与激光的强度和类型有关.对于超短激光脉冲而言,由于形成等离子体通道的激光强度 I 在 10^{14} — 10^{15} W/cm²,其电离机理

主要是隧道电离.静态场中粒子隧道电离速率为

$$\omega_{ac} = 4 \left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{(2E_{ion})^{1/2} E^{1/2}} \times \exp \left(\frac{\alpha (2E_{ion})^{3/2}}{3E} \right) \omega_0, \quad (1)$$

其中 $2E_{ion}$ 为用氢原子第一电离能归一化的粒子电离能,空气中主要是氮原子和氧原子(即 $2E_{ion} = E_N \times 70\% + E_O \times 30\%$); E 为用氢原子在第一波尔半径处的原子电场强度归一化的光电场强度. ω_0 为频率的原子单位 (4.1×10^{16} s⁻¹).

通道内电子密度为

$$dn_e/dt = \omega_{ac}(N_0 - n_e), \quad (2)$$

其中 N_0 为空气密度, n_e 为通道内电子密度, τ 为激光脉冲宽度.我们的激光系统产生的激光脉冲宽度为 50fs.为了方便可考虑激光脉冲在时间上为矩形分布,因此上式可变为

$$n_e = N_0(1 - e^{-\omega_{ac}\tau}). \quad (3)$$

当光场强度从 10^{13} — 10^{15} W/cm² 变化时, n_e/N_0 增长得很快,如图 1 所示.

当光场强度接近 10^{15} W/cm² 时,通道已经达到 1 级完全电离.此时通道属于强离子化通道.粒子之间的碰撞主要为电子和离子的碰撞,考虑无磁、稳态情况下,根据流体运动方程可得电流密度

$$J = \frac{n_e e^2}{m_e \nu_{ei}} E, \quad (4)$$

* 国家自然科学基金(批准号:60321003,10374116,10390161),国家重点基础研究专项基金(批准号:G1999075206)和国家高技术激光核聚变主题基金资助的课题.

† E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

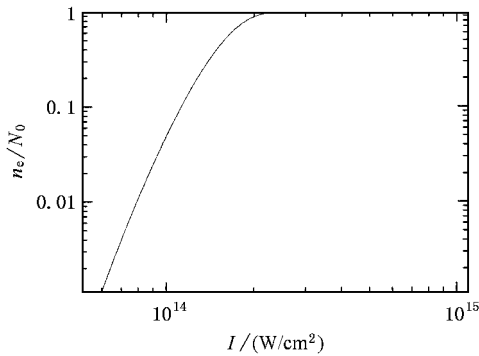


图1 自由电子密度随光强变化

其中 ν_{ei} 为电子和离子碰撞频率, 考虑电子速度的麦克斯韦分布, 有

$$\nu_{ei} = \frac{4\sqrt{2}\pi}{3} \frac{n_e e^4}{m_e^{1/2} T_e^{3/2}} Le, \quad (5)$$

其中 Le 为库仑对数, 密度和温度在不大范围内变化时可以认为 Le 为常数, 可以取 10.

由(4)式可得电阻率

$$\eta = \frac{m_e \nu_{ei}}{n_e e^2}. \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式可得, 1级完全电离通道下, 电阻率 $\eta = 4.8 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}$.

当光场强度在 $10^{13} - 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 时, 通道内电子密度在 10^{16} cm^{-3} 量级, 通道属于弱电离通道, 粒子之间的碰撞主要为电子和中性原子的碰撞, 同(4)式可得此时电流密度

$$J = \frac{n_e e^2}{m_e \nu_0} E, \quad (7)$$

其中 ν_0 为电子和中性原子碰撞频率, 有

$$\nu_0 = n_0 u_e \sigma_0, \quad (8)$$

其中 u_e 为电子平均热速度, σ_0 为电子和中性原子碰撞截面, 对于空气中的氮气和氧气可以取 $\sigma_0 = 1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ [11].

由(7)式可得电阻率

$$\eta = \frac{m_e \nu_0}{n_e e^2}. \quad (9)$$

取 $n_e = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = 1 \text{ eV}$, 将(8)式代入(9)式可求得此时通道电阻率 $\eta = 3.3 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}$.

3. 实验原理及布局

高强度飞秒脉冲激光在空气中聚焦时会形成很长的等离子体通道, 通道内部会形成细丝 [11], 细丝

内自由电子密度很高. 在细丝周围由于存在激光能量背景, 会形成一个等离子体鞘层. 鞘层中自由电子密度比细丝中低很多, 因此鞘层电阻率也较大. 在空气中等离子体通道内电能传输主要在细丝中进行.

我们使用的激光装置是中科院物理研究所光物理实验室的极光 II 号激光系统, 该系统单脉冲输出时能量最大可达 640mJ, 脉宽 30fs, 中心波长 800nm, 重复频率 10Hz. 实验中只用了部分激光能量. 实验装置如图 2, 将两个中心有小孔的铜极板放在电路中, 调整光路让光刚好通过小孔. 两板间加直流高压 (V 远低于空气击穿电压). 电路中串联一个 10k Ω 的限流电阻. 聚焦激光从小孔通过时, 由于细丝直径远小于小孔直径, 细丝和极板间由细丝周围的等离子体鞘层导通. 由于鞘层电阻率较大, 在等离子体细丝和极板间会产生一个较大的接触电阻 R_c . 接触电阻 R_c 和等离子体通道电阻共同导通两块极板间的空气, 形成通路. 示波器从电阻 R 上获得电压信号.

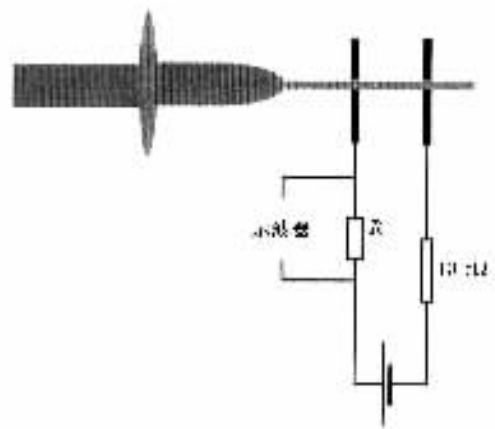


图2 实验装置示意图

根据示波器上的电压信号 U , 由 $I = U/R$ 计算出电路中的电流. 再由总电压 V 计算出电路总电阻 R_T . 于是, 通道电阻 $R_e = R_T - 10\text{k}\Omega - R$. 其中通道电阻 R_e 包括两部分: 一部分是等离子体通道电阻率产生的电阻, 另一部分是等离子体通道和极板间的接触电阻 R_c , 有

$$R_e = L\eta/S + R_c, \quad (10)$$

其中 L 为板间距离, 即等离子体通道长度. S 为通道横截面积, 通道直径 $120\mu\text{m}$ [12], R_c 为等离子体通道和极板的接触电阻. 当通道位置不变且 L 较小时 (在焦点附近通道稳定性较好, L 选取 5—10cm, 在离焦点较远的地方通道稳定性较差, 电阻率变化较

大, L 选取 1—3cm), 可认为 η, S, R_c 都为常数, 改变板间距离 L 就可以由 (10) 式求出接触电阻 R_c .

最后由电阻率公式 $R = \eta L / S$ 求出等离子体通道电阻率.

4. 实验数据及结果分析

实验中用激光能量 18mJ, 铜板小孔直径 0.5mm. 测得等离子体通道电阻随通道长度变化关系如图 3 (图 3 为 $f = 2m$ 透镜, 焦点后 205cm 处测量所得).

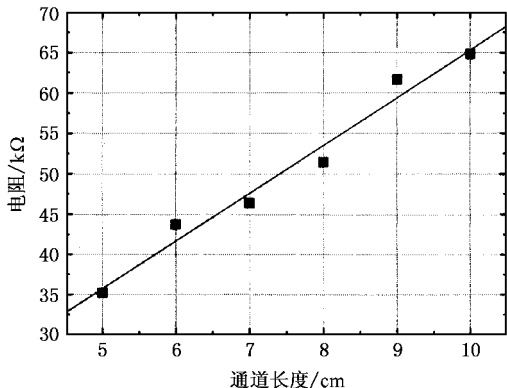


图 3 等离子体通道电阻随通道长度变化

从图 3 可以看出, 等离子体通道电阻和通道长度基本是线性关系, 通道电阻率在一个较短通道长度内保持不变. 由图 3 及 (10) 式就可求出等离子体通道接触电阻和电阻率.

实验分别对 $f = 2m$ 和 $f = 4m$ 焦距的透镜在空气中聚焦形成的等离子体通道进行了电阻率和接触电阻的测量. 实验结果如图 4 和图 5 所示.

在 $f = 2m$ 透镜的通道中, 电阻率和接触电阻在焦点附近有最小值. 在焦点前, 由于自聚焦效应, 已有比较强的通道, 电阻率也较小, 但是通道并不稳定, 因此接触电阻比较大.

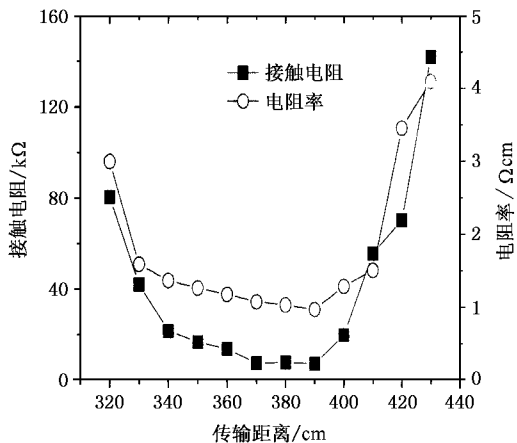


图 5 $f = 4m$ 透镜通道接触电阻及电阻率随通道传输距离变化

在 $f = 4m$ 透镜的通道中, 在焦点附近较长距离内, 特别是焦点前, 都有明显的等离子体通道, 且通道内细丝较多, 因此通道电阻率和接触电阻在相当长的空间距离保持稳定. 但是其通道内电子密度不如焦距 2m 的透镜形成的等离子体通道, 因此电阻率比焦距 2m 的透镜形成的等离子体通道电阻率大. 实验中还观察到, 在通道开始的位置虽然也有细丝出现, 但是细丝的形成以及出现的位置都很不稳定.

在 $f = 2m$ 透镜的焦点处, 对通道电阻率和接触电阻随激光能量变化进行了测量. 如图 6.

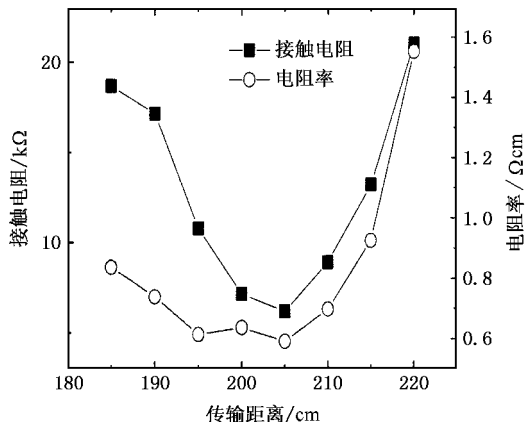


图 4 $f = 2m$ 透镜通道接触电阻及电阻率随通道传输距离变化

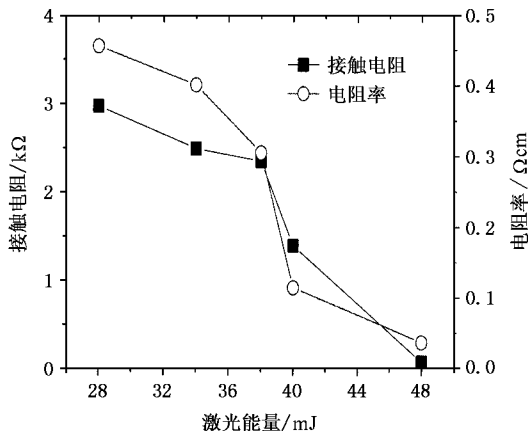


图 6 通道电阻率和接触电阻随能量的变化

电阻率和接触电阻随激光能量的升高都有明显的降低.

5. 结 论

用上面的实验方法,我们测得了强飞秒激光脉冲产生等离子体通道的电阻率和接触电阻.实验数据采用直线拟合,如图3,可以计算出接触电阻,因此可以得到更加准确的通道电阻率数据.在实验中测得通道电阻率最小值为 $\eta = 3.6 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}$.接触电阻最小值为 $R_c = 0.5 \text{k}\Omega$.电阻率和接触电阻最小值都出现在短焦距透镜焦点附近,在这个区域等离子体通道内细丝比较强,电子密度较大,且细丝比较

稳定.

从实验结果分析可以得到,减小等离子体通道的电阻有以下可行方法:

1. 提高等离子体通道稳定性.从图4、图5可以看出在离焦点较近的地方等离子体通道更加稳定.通道稳定性的提高可以使接触电阻明显减小.焦距越长的透镜,形成稳定的通道越长.

2. 适当增加激光能量,能明显减小通道电阻率和接触电阻.当激光能量增加到一定值时,将会发生更强的电离,进而大大增加通道内自由电子密度.从图1中可以看出当光强到 10^{15}W/cm^2 时,大气中的氧和氮可以达到一级强电离,其电子密度可达到 10^{19}cm^{-3} ,此时通道电阻率会有明显的减小.

-
- [1] Tzortzakis S, Franco M A, Andre' Y B *et al* 1999 *Phys. Rev. E* **60** R3505
- [2] Hao Z Q, Zhang J, Yu J 2004 *Wuli (Physics)* **33** 443 (in Chinese) [郝作强、张 杰、俞 进 2004 物理 **33** 443]
- [3] Hao Z Q, Zhang J 2004 *Wuli (Physics)* **33** 741 (in Chinese) [郝作强、张 杰 2004 物理 **33** 741]
- [4] Hao Z Q, Yu J, Zhang J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1290 (in Chinese) [郝作强、俞 进、张 杰等 2005 物理学报 **54** 1290]
- [5] Fontaine B La, Vidal F, Z Jiang *et al* 1999 *Phys. Plasmas* **6** 1615
- [6] Wöste L, Wedekind C, Wille H *et al* 1997 *Las. Optoelectron.* **29** 51
- [7] Comtois D, Chien C Y, Desparois A *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 819
- [8] Schillinger H, Sauerbrey R 1999 *Appl. Phys. B* **68** 753
- [9] Proulx A, Talebpour A, Petit S *et al* 2000 *Opt. Commu.* **174** 305
- [10] Ouyang J T, Shao F Q, Wang L *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1907
- [11] Ma T C, Hu X W, Chen Y H 1988 *The Principle of Plasma Physics* (Hefei : USTC Press [in Chinese] 马腾才、胡希伟、陈银华 1988 等离子体物理原理(合肥:中国科学技术大学出版社)]
- [12] Yang H, Zhang J, Li Y J *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **66** 016406

Measurements of electric resistivity of plasma channels in air^{*}

Zhang Zhe^{1)†} Zhang Jie^{1)†} Li Yu-Tong¹⁾ Hao Zuo-Qiang¹⁾

Zheng Zhi-Yuan¹⁾ Yuan Xiao-Hui^{1)‡} Wang Zhao-Hua¹⁾

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

2) *State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,*

Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China

(Received 21 January 2005 ; revised manuscript received 6 April 2005)

Abstract

A long plasma channel can be formed when ultra-intense femtosecond laser pulse propagate, in air. We measured the value of the resistivity of the plasma channel and the contact resistance between the plasma channel and the electrodes. We also investigated the main factors affecting the resistivity of the plasma channel.

Keywords : plasma channel, resistivity, contact resistance

PACC : 5280D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60321003, 10374116, 10390161), the National Key Basic Research Special Foundation of China (Grant No. G1999075206) and National Hi-Tech ICF program.

[†] E-mail : jzhang@aphy.iphy.ac.cn