文章编号:1001-5078(2011)11-1179-04

· 激光应用技术 ·

# 193 nm 激光脉冲空气电离及导电特性研究

张 华,方照勋,陈德章,路英宾 (西南技术物理研究所,四川成都 610041)

**摘 要:**实验研究了193 nm 激光脉冲空气电离及其形成的等离子体导电通道导电特性,采用 闪光法测得193 nm 激光脉冲空气电离阈值约为9.58×10<sup>9</sup> W/cm<sup>2</sup>,用单脉冲能量约145 mJ的 纳秒级193 nm 紫外激光脉冲在实验室空气中建立了长度约2 m 的等离子体导电通道,实验测 得通道的等效电阻值可达10<sup>9</sup> Ω 量级,通道导电寿命约为30 μs。

关键词:激光等离子体;紫外激光空气电离;空气电离阈值;等离子体导电通道 中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2011.11.001

## Research on air ionization and conducting characters induced by 193 nm UV laser pulse

ZHANG Hua, FANG Zhao-xun, CHEN De-zhang, LU Ying-bin

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract:193 nm UV laser pulses induced air ionization and the plasma channel conductivity caused by the pulses were investigated experimentally. The ionization threshold of 193 nm laser pulses is found to be about 9.58  $\times$  10<sup>9</sup> W/cm<sup>2</sup>. A plasma conducting channel about 2 meters long with a resistance of 10<sup>9</sup>  $\Omega$  in magnitude was established with nanosecond 193 nm UV laser pulses. The lifetime of the plasma channel is about 30  $\mu$ s.

Key words: laser induced plasma; UV laser air ionization; air ionization threshold; plasma conducting channel

#### 1 引 言

众所周知,高功率激光脉冲在大气中传输,会与 空气中的气体分子、杂质及气溶胶粒子等发生非线 性作用,将使气体分子外层电子、杂质及气溶胶粒子 表面电子挣脱束缚成为自由电子,从而使空气电离 形成激光等离子体。等离子体具有导电能力,如若 能够获得一条连续的激光等离子体通道,即在空气 中获得了一条"光导线"。

激光等离子体的产生机制主要有多光子电离和 雪崩式电离两种<sup>[1-2]</sup>。多光子电离是指一个大气分 子连续吸收多个光子的能量而使其外层电子成为自 由电子而电离的过程,多光子电离仅涉及原子或分 子的状态跃迁,与碰撞无关。雪崩式电离机制中,空 气中原存的种子电子(多光子电离或者杂质电离产 生的自由电子)受到强激光电场的作用而加速,与 气体分子发生碰撞(逆韧致吸收过程)而使之电离, 从而产生新的自由电子,碰撞产生的自由电子再被 电场加速,产生电子雪崩效应形成等离子体。多光 子电离和雪崩式电离哪种起主导作用应视具体的大 气条件、激光单脉冲能量、激光脉宽等因素而定。对 于紫外激光脉冲而言,脉宽窄时主要发生多光子电 离,若脉宽较宽则多光子电离与雪崩式电离并存。

由于激光等离子体及其光导线技术在激光引导 放电、激光引雷、激光致僵等领域的潜在应用价值, 自 20 世纪 80 年代以来,科技工作者们对激光空气

作者简介:张 华,男,在读硕士研究生,主要研究方向为紫外脉 冲激光与空气的相互作用。E-mail;huashi801@yahoo.com.cn 收稿日期;2011-04-21;修订日期;2011-05-11

电离及"光导线"技术进行了大量的研究。目前已 经取得的一些研究成果大多集中于可见与红外波 段<sup>[3-5]</sup>。少数学者对紫外波段 248 nm 激光脉冲在 空气中的传播进行了研究<sup>[6-10]</sup>。作者研究了 193 nm 紫外纳秒激光脉冲与空气的相互作用,测试 了其电离击穿阈值,并对其建立的等离子体通道导 电特性进行了初步研究。

### 2 实验方法及装置

2.1 193 nm 激光脉冲空气电离阈值研究

目前,常见的判别激光电离阈值点的方法主要 有闪光法、激光衰减法、辉光发射法和电子收集法 等。其中,闪光法简单,可靠,易操作,因此我们决定 采用闪光法来测量 193 nm 激光脉冲空气电离阈值。 闪光法测量激光脉冲空气电离阈值的实验装置如图 1 所示,在黑暗环境下,从 193 nm 激光器发出的激 光脉冲经过聚焦透镜后,与空气相互作用,观察在焦 点处击穿空气形成闪光点的情况,每组发射 60 个脉 冲,记录产生闪光点的次数,改变激光脉冲的能量, 进行新的实验组观察,以出现闪光点概率达到 50% 作为空气及击穿的阈值点。



图 1 闪光法测量电离阈值实验装置示意图 Fig. 1 experiment setup for the measurement of air ionization threshold with spark watching method

2.2 193 nm 激光等离子体通道导电特性研究

激光等离子体通道导电特性研究实验装置如图 2 所示。193 nm 紫外激光脉冲经过透镜聚焦作用于 实验室空气,在空气中形成激光等离子体通道。限 流电阻 R1、采样电阻 R2 和高压直流电源通过铜质 探针与激光等离子体通道连接(探针针尖置于导电 通道边缘,切忌被激光脉冲打出火花),形成串联回 路,利用示波器检测取样电阻R2两端的电压即可



得到激光等离子体通道的等效电阻。实验中改变通 道上施加的直流电压、激光脉冲能量、激光脉冲重频 等,观察它们对等离子体通道导电特性的影响。

### 3 实验结果

实验中采用的激光器为美国相干公司 COMP Pex Pro 205 型 193 nm 准分子激光器,激光器参数 为:最大单脉冲输出能量为 250 mJ,最大激光重频 50 Hz,脉宽 20 ns,束散角大约 0.8 mrad,出口光斑 尺寸 10 mm × 24 mm。实验中实验室相对湿度大约 为 53% ~ 62%。

3.1 193 nm 激光脉冲空气电离阈值研究

电离阈值实验中,聚焦透镜焦距为400 mm的, 激光重频为1 Hz,实验结果如表1所示。图3为闪 光点概率与激光脉冲能量关系及其线性拟合曲线 图,以出现闪光点概率50%作为空气电离阈值的标 准,从图3可知193 nm激光对空气电离阈值点的激 光能量约为112 mJ,实验测得相应焦点处光斑尺寸 约为0.134 mm×0.436 mm,可得激光空气击穿功 率密度阈值为9.58×10<sup>9</sup> W/cm<sup>2</sup>。

表1 闪光法测量空气电离阈值实验结果

Tab. 1 result of air ionization threshold measurement

with spark watching method

激光脉冲能量 E/mJ	闪光次数	脉冲总数	闪光概率
119	57	60	0.9500
112	41	60	0.6833
112	27	60	0.4500
110	26	60	0.4333
112	27	60	0.4500
111	27	60	0.4500
109	20	60	0.3333
111	21	60	0.3500
108	15	60	0.2500
109	13	60	0.2166
107	17	60	0.2833
113	31	60	0.5166
112	36	60	0.6000
114	38	60	0.6333
113	38	60	0.6333
113	42	60	0.7000



with spark watching method

3.2 193 nm 激光等离子体通道导电特性实验研究 首先对探针上施加的直流电压对通道导电特性 的影响进行了研究。实验中R1 = 27.7 KΩ, R2 = 1 MΩ,探针间距为2.4 m,透镜焦距为1 m,激光 脉冲重频为1 Hz。表2 和图4分别为直流电压对等 离子体通道等效电阻的影响的实验结果及其分布图。 实验结果显示,激光等离子体通道的等效电阻阻值随 施加在等离子体通道上的电压增大而减小,可见增大 电压可改善等离子体通道的导电性能,但是随着施加 的直流电压增大,通道等效电阻变化率减小。

表2 直流电压对通道等效电阻的影响实验结果

Tab. 2 effect of DC voltage to the resistance

of the plasma channel

收集电压	脉冲能量	信号电压	信号脉宽	通道等效电阻
Vc/kV	E∕mJ	Vs/V	$ au/\mu s$	$R/\Omega$
30	134	6.0	25	$5.00 \times 10^{9}$
28	134	5.4	25	$5.18 \times 10^{9}$
26	134	4.8	25	$5.41 \times 10^{9}$
24	134	4.2	24	$5.71 \times 10^{9}$
22	134	3.2	25	$6.87 \times 10^{9}$
20	134	3.0	26	$6.67 \times 10^{9}$
18	134	1.8	27	$1.00 \times 10^{10}$
16	134	1.5	26	$1.07 \times 10^{10}$





接着研究了激光脉冲能量对通道导电性的影响,实验中探针间距2.4 m,直流电压26 kV,激光脉冲重频为10 Hz,透镜焦距为1 m。表3 和图5 为激光脉冲能量与等离子体通道导电特性关系研究的实验结果。实验结果表明,激光脉冲能量越高,示波器信号幅度越大,导电通道的等效电阻越小,而且在实验测试的能量范围内等离子体通道等效电阻与激光脉冲能量之间近似为线性关系。

表3 脉冲能量对通道等效电阻的影响实验结果

Tab. 3 effect of single pulse energy to the resistance of the plasma channel

激光脉冲能量	信号电压	信号脉宽	通道等效电阻
<i>E</i> ∕mJ	Vs/V	$ au/\mu s$	$R/\Omega$
252	4.2	25	6. $19 \times 10^{9}$
240	4.0	25	$6.50 \times 10^{9}$
230	3.8	25	$6.84 \times 10^{9}$
212	3.4	25	$7.65 \times 10^{9}$
203	3.5	25	$7.43 \times 10^{9}$
190	3.3	25	$7.88 \times 10^{9}$
175	3.0	25	$8.67 \times 10^{9}$
159	2.9	25	$8.97 \times 10^{9}$
143	2.4	25	$1.08 \times 10^{10}$
127	2.4	25	$1.08 \times 10^{10}$
111	2.3	25	$1.13 \times 10^{10}$





UV laser pulse to the resistance of the plasma channel

接着还研究了激光脉冲重频对通道等效电阻的 影响。仅改变重频,激光脉冲能量维持在145 mJ 左 右,其他实验条件同前面一致,实验结果如表4 和图 6 所示。实验结果表明,激光等离子体导电通道的 等效电阻随着激光脉冲重频的增大而增加,其具体 原因有待进一步研究。

Tab. 4 effect of PRF to the resistance of the

plasma channel						
脉冲重频 <i>fr</i> /Hz	信号电压 Vs/V	信号脉宽 τ/μs	通道等效电阻 <i>R/</i> Ω			
50	1.8	25	$1.44 \times 10^{10}$			
45	1.8	25	$1.44 \times 10^{10}$			
40	1.8	25	$1.44 \times 10^{10}$			
35	2.0	25	$1.30 \times 10^{10}$			
30	2.6	25	$1.00 \times 10^{10}$			
25	2.6	25	$1.00 \times 10^{10}$			
20	2.2	25	$1.18 \times 10^{10}$			
15	3.2	25	$8.12 \times 10^{9}$			
10	3.4	25	$7.65 \times 10^{9}$			
5	4.2	25	$6.19 \times 10^{9}$			



以上的实验中,当没有激光脉冲的时候,电阻 R2上没有电流,当有激光脉冲时电阻 R2 上才会出 现一个脉冲电流。示波器检测到的 R2 上的脉冲信 号脉宽(FWHM)在 30 µs 附近波动,说明导电通道 的寿命约为 30 µs,电阻 R2 上的典型取样信号如图 7 所示。



采用闪光法测得纳秒级 193 nm 激光脉冲空气

结

4

电离阈值约为9.58×10<sup>9</sup> W/cm<sup>2</sup>;使用脉宽20 ns 的 193 nm 激光脉冲在实验室空气中获得了长度约为 2 m 且寿命达30 μs 的激光等离子体通道,实验测 得激光等离子体通道等效电阻值约为10<sup>9</sup> Ω量级, 研究发现增大直流电压及激光脉冲能量有助于改善 等离子体通道的导电性能。

实验过程中发现紫外激光脉冲与空气相互作用 产生的臭氧会对紫外激光的传播产生不利影响,具 体的影响机制有待研究。

### 参考文献:

- [1] Paul K Kennedy. A first-order model for computation of laser-induced breakdown thresholds in ocular and aqueous media:partI-theory [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(12).
- [2] Chen Dezhang, Gao Jianbo, Ye Jingfeng, et al. Experiment study of air ionization and plasma channel conducting with nanosecond ultraviolet laser pulses [J]. Laser Technology, June, 2008, 32(3):262 264. (in Chinese) 陈德章, 高建波, 叶景峰, 等. 纳秒紫外激光空气电离及等离子体导电实验研究[J]. 激光技术, 2008, 32 (3):262 264.
- [3] A Couairon, L Berge. Light filaments in air for ultraviolet and infrared wavelengths [J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 88 (13):135003.
- S Tzortzakis, L Berge, A Couairon, et al. Breakup and fusion of self-guided femtosecond light pulses in air [J].
  Phys. Rev. Lett. ,2001,86(24):5470-5473.
- [5] Duan Zuoliang, Chen Jianping, Liu Ruxin, et al. Optical breakdown and filamentation of femtosecond laser pulses propagating in air at a kHz repetition rate [J]. Chinese Physics, 2004, 13(3):358 - 363.
- [6] Thomas A Niday, Ewan M Wright, Miroslav Kolesik, et al. Stability and transient effects in nanosecond ultraviolet light filaments in air [J]. Phys. Rev. E72,016618,2005.
- [7] Jens Schwarz, Patrick Rambo, Jeanclaude Diels, et al. Ultraviolet filamentation in air [J]. Optics Communications, 2000, 180:383 – 390.
- [8] S Tzortzakis, B Lanouroux, A Chiron, et al. Nonlinear propagation of subpicosecond ultraviolet laser pulses in air [J]. Optics Letters, 2000, 25(17):1270-1272.
- [9] J Schwarz, P Rambo, J C Diels. Measurements of multiphoton ionization coefficients with ultrashort ultraviolet laser pulses [J]. Applied Physics, 2001, B72:343 - 347.
- [10] S Tzortzakis, B Lanouroux, A Chiron, et al. Femtosecond and picoseconds ultraviolet laser filaments in air: experiments and simulations [J]. Optics Communications, 2001,197:131-143.