

# 激光引雷研究中的若干基础物理问题

鲁欣<sup>1</sup>, 张喆<sup>1</sup>, 郝作强<sup>1</sup>, 王兆华<sup>1</sup>, 魏志义<sup>1</sup>, 江秀臣<sup>2</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院物理研究所, 北京 100190; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 激光引雷是一种新概念的防范雷击的技术,其基本原理是利用高强度的激光电离空气而产生一条放电通道,以引导闪电沿安全的路径释放。为促进该技术的应用研究,中国科学家在激光引雷这一领域也开展了多年的研究工作,在激光等离子体通道的产生及其控制,通道寿命的延长以及激光引导放电等基本物理问题上取得了一系列重要的进展。本文介绍了激光引雷技术的基本原理,发展历史和研究现状以及目前面临的科学和技术问题,主要包括如何产生长距离、长寿命的等离子体通道及激光诱导高压放电的基本物理过程。

**关键词:** 激光引雷; 雷电防护; 电离空气; 等离子体通道; 放电; 超短脉冲激光

**中图分类号:** O473; O461; TM83; TM86 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6520(2008)10-2059-06

## Some Fundametntal Physical Problems of Lightning Control by Laser

LU Xin<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>, HAO Zuo-qiang<sup>1</sup>, WANG Zhao-hua<sup>1</sup>,  
WEI Zhi-yi<sup>1</sup>, JIANG Xiu-chen<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Physics, Chinese Academy of Scienses, Beijing 100190, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The lightning control by using high intensity laser beam is one of most perspective lightning protection technologies. The main principle is to trigger the lightning and to guide the stroke to safe places by plasma channels, which is produced by intense laser beam in air. However, some fundamental problems, such as generation of plasma channel with long distance and long lifetime, the mechanism of laser triggered discharge require to be investigated further. The basic theory, the developing history, the present research status and the difficulties in this technique are introduced in this paper. Some important progresses in generation and control of plasma channel, prolonging the lifetime of plasma channel and laser guided high voltage discharge are achieved.

**Key words:** laser triggered lightning; lightning protection; ionization of air; plasma channel; discharge; ultra-short laser pulse

## 0 引言

闪电是自然界的一种放电现象。自然界中雷电的巨大破坏力对人们的生命、建筑物以及各种设施的安全构成严重威胁,雷电产生的强电磁脉冲辐射也会造成电子仪器和电力设施的故障和损坏。如今雷电灾害在全球平均每年夺走数千条人命,并且造成数十亿美元的直接经济损失。因此人们想尽各种办法来避免雷害。

预防雷击的常规方法是使用避雷针把雷电电流经电缆引向大地,以防止闪电直接攻击建筑物以及其它设施,这些措施在一定程度上可以减小直击雷的危害。但是在当今时代,微电子设备已经普及到了生产和生活中的每一个角落。雷电发生时伴随的

强电磁脉冲对电子仪器会形成严重的干扰和破坏,轻则使之暂时失灵,重则使之永久损坏,信息丢失。如果雷击发生在国家的政治、经济、国防系统的要害部位,雷电电磁脉冲的打击会产生无法估量的间接损失。传统的避雷针虽然能有效地保护人员和设备免遭直击雷的打击,但随着时代的发展其弱点和不足之处也越来越明显。例如,在防范雷电电磁脉冲方面避雷针起了“引雷入室”的反作用,因为越靠近闪电区域,电磁脉冲越强。为了解决这一问题,科学家们提出了“主动引雷”的新概念。所谓主动引雷方法就是在雷击形成之前采取措施以避免雷害,其关键是要在空气中产生可导电的通道,使雷电通过预定的路径在远离被保护对象的地方释放出来,这样既避免了直击雷和感应雷的危害,又大幅度降低了雷电电磁脉冲的影响。自然闪电中通道的形成是靠梯级先导放电逐步形成的。目前人工引导闪电的主要方法是利用火箭拖引导线飞向云层而引导云层电荷放电在预定的安全地点。这种方法非常直观,其目的就是利用导线在云层和大地之间形成一个放电

**基金资助项目:** 国家自然科学基金(10634020; 10734130; 60621063); 国家重点基础研究发展计划(2007CB815101)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (10634020, 10734130, 60621063), National Basic Research Program of China(2007CB815101).

通道,将雷电引向安全地点,以保护重要的设施免遭雷击。虽然这种技术已发展较成熟,但火箭引雷对能源和材料的消耗很大,特别是它不能处在准连续工作状态,因此其成功率只有 50% 左右。

20 世纪到 70 年代,随着激光技术的发展,美国科学家于 1974 年就提出了激光引雷的新概念<sup>[1]</sup>。利用激光电离空气而产生一条放电通道,以引导闪电沿安全的路径释放。这种方法既无污染又安全灵活,不受地点限制,可以连续工作,因而受到越来越多科学家的重视,被认为是最有前途的防范雷击的技术之一。

## 1 激光引雷研究的发展历史

激光引雷的关键环节是利用激光在空气中产生导电的等离子体通道,并且等离子体通道的品质(长度、导电性能、寿命)要达到一定的要求。虽然激光技术的发展一直都十分迅速,激光的功率、能量在不断提高,将激光聚焦在一个“点”上电离空气只需要很少的激光能量就可以实现,但要在很长的一条“线”上实现空气的有效电离,仍然不是一件容易实现的事情。不同脉冲宽度、波长、和强度的激光电离空气的物理过程有很大区别,在空气中的传输特性也不相同。对于长脉冲激光而言,主要是碰撞电离机制起主要作用,即空气中的自由电子被激光场加速到高于空气分子电离势的能量,经过碰撞电离空气分子,新产生的电子继续电离其它分子,从而产生更多的自由电子,形成电子崩。电子崩一旦发生,通常会导致空气的击穿,产生明亮的火花并伴随着爆炸声。由于从最初自由电子的产生发展到电子崩需要一定的时间,因此长脉冲激光相对而言(持续时间为 ns 或更长)更容易引起空气的击穿。激光击穿空气的强度阈值随波长和脉冲宽度而变化,脉冲持续时间越长,击穿光强阈值越低。通常 ns 激光击穿空气的强度阈值在  $(G \sim T) \text{ W/cm}^2$ , GW, TW, PW 分别为  $10^9 \text{ W}$ ,  $10^{12} \text{ W}$ ,  $10^{15} \text{ W}$ 。例如脉冲宽度为 7 ns 的倍频 YAG 激光(波长  $0.53 \mu\text{m}$ )击穿空气的强度阈值为  $0.2 \text{ TW/cm}^2$ ,而脉冲宽度为  $0.3 \mu\text{s}$  的  $\text{CO}_2$  激光(波长  $10.6 \mu\text{m}$ )的强度只要达到  $\text{GW/cm}^2$  就能击穿空气。随着激光技术的不断发展,在上个世纪末期已经可以产生脉冲宽度达到几十 fs ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) 的超短超强激光。当激光脉冲的持续时间短至 ps ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ 秒}$ ) 甚至 fs 量级时,电子崩来不及发展,空气的电离主要依靠激光场和分子的直接相互作用。空气的主要成分中,氧分子的电离能约  $12.1 \text{ eV}$  ( $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ),氮分子约  $15.6 \text{ eV}$ ,目前常用的激光的单光子能量都不足以电离空气,

因此空气分子必须一次吸收多个光子的能量才能够发生电离,这个过程在物理学上被称作多光子电离。多光子电离机制只有在光强很高的条件下才会起明显作用。对于波长约  $800 \text{ nm}$  的钛宝石 fs 激光,多光子电离空气的光强阈值在  $10 \text{ TW/cm}^2$  附近。当激光强度达到  $0.1 \text{ PW/cm}^2$  以上时,隧道电离机制开始起主要作用,关于多光子电离以及隧道电离的基本理论可参考文献<sup>[2]</sup>。激光引雷研究的发展也经历了从长脉冲激光到超短脉冲激光两个阶段。

上世纪 70~80 年代,科学家们主要利用大能量,脉冲宽度  $\mu\text{s}$  量级的  $\text{CO}_2$  激光在空气中产生电离通道。当时美国和日本的科学家都开展了激光诱发自然雷的实验,但进展很不顺利。美国空军的研究组在野外将  $100 \text{ J}$  的  $\text{CO}_2$  激光聚焦,在大气中生成等离子体,企图诱导闪电。但由于生成的等离子体处于地面与雷云中间的电绝缘状态,结果没能诱发闪电。后来的研究主要集中在激光引导人工高压放电过程中的一些基础物理问题。这期间比较具有代表性的实验是日本的一个研究组利用反射镜将激光分成三束,在空中拼成“Z”字形的等离子体通道,在世界上首先成功地实现了自由空间的 Z 字形放电,确认放电通道可以用激光加以控制<sup>[3,4]</sup>。90 年代中期,日本大阪大学为中心的一个研究小组将  $\text{CO}_2$  激光聚焦在一个铁塔顶端形成一个长约  $5 \text{ m}$  的等离子体通道,在实验中他们利用了自然闪电的先驱放电来触发激光,确实观察到了几次在激光发射后不久有闪电落到塔顶上,于是该小组宣称激光引雷成功,但其实验结论一直存在争议,因为在那样的条件下即使没有激光,雷电也有可能击到塔顶上<sup>[5]</sup>。利用紫外激光电离空气引导放电的研究也有不少的报道<sup>[6,7]</sup>,紫外激光主要依靠多光子电离产生等离子体通道,但通道的电子密度相对较低,而且由于空气对紫外激光吸收较强,通道的长度也受到一定限制。关于长脉冲  $\text{CO}_2$  激光引雷的研究在《雷电与人工引雷》一书中有很详细的说明<sup>[8]</sup>。

由于长脉冲激光在空气中聚焦后容易使空气产生雪崩电离而造成击穿,激光能量被等离子体强烈吸收而迅速衰减,难以形成空间上连续的长距离电离通道,因此在本世纪利用长脉冲激光进行激光引雷的研究基本上停滞了。上世纪 90 年代以来,随着超短超强激光技术的迅速发展,采用啁啾脉冲放大技术可以产生峰值功率为 TW 级的超短超强激光脉冲<sup>[9]</sup>,为在空气中产生长距离的电离通道提供了更有效的方法。一方面,超短激光脉冲一般具有很高的峰值功率,很容易在大气中产生较强的非线性自聚焦,从而使光在传播过程中发生会聚;另一方

面,超短超强激光脉冲在大气中传播时,由于自聚焦使激光的强度逐渐增大,当激光的强度超过空气的电离阈值时,就会使空气电离,在空气中产生等离子体,而等离子体具有散焦作用。当非线性自聚焦过程和等离子体的散焦过程两者之间达到动态平衡时(即自导引),激光光束在传播过程中就不会发散,形成稳定的电离通道。由于超短脉冲激光引起的电离比较微弱,能量损耗很小,因此电离通道能够延伸到很远的距离。飞秒激光在空气中自聚焦形成电离通道的现象最初于 1995 年在实验中被观察到<sup>[10]</sup>,这样电离通道为激光引雷提供了另一种可能的方案。

最近几年美国、西欧、日本和加拿大等国投入了大量的人力、物力和财力进行激光引雷的实验和理论研究。世界上很多实验室都对超短脉冲激光产生的等离子体通道引导放电进行了研究<sup>[11-15]</sup>。加拿大的一个研究小组曾经利用飞秒脉冲激光形成的等离子体通道在 1 MV 左右的高压下引导长达 2.8 m 的放电<sup>[13]</sup>。欧洲的 Teramobile 研究组利用车载移动 TW 级 fs 激光装置,成功诱发和引导了 3.2 m 长间隙、2 MV 的高压放电<sup>[14]</sup>。研究中发现,超短脉冲激光等离子体通道的诱发作用能有效地降低空气间隙的击穿电压阈值,并且能引导放电通道使其沿激光传播的方向发展。我国科研工作者的进一步研究表明:在 fs 激光脉冲后加上 ns 激光脉冲能有效延长等离子体通道寿命<sup>[16]</sup>,将更加有利于激光诱发和引导放电<sup>[17]</sup>。

2008 年 Teramobile 小组的科学家和美国的研究人员联合公布了他们在激光引雷领域最新的一项进展<sup>[18]</sup>,随后许多新闻媒体对这项研究工作进行了跟踪报道。研究人员在利用位于美国新墨西哥州高约 3200 m 的南伯帝峰顶端的车载移动飞秒激光器向经过的雷暴云发射激光脉冲,结果成功制造了云中电流的小型局部放电。尽管这种小型局部放电没有能够发展成真正的闪电,但毕竟让人们看到了一丝曙光。

## 2 激光引雷研究在中国

我国的科学家自 20 世纪 90 年代末也积极地开展了激光引雷方面的研究,中国科技大学于 1999 年研究了纳秒钕玻璃激光经长焦距透镜聚焦后形成的电离通道对高压放电的诱发和引导作用<sup>[19]</sup>。中国科学院物理研究所在飞秒激光等离子体通道的产生以及激光引雷方面进行了多年的探索,2003 年该研究所的研究人员将能量 60 mJ,脉冲宽度 30 fs 的激光脉冲发射到大气中,成功观测到了长距离的电离通道(见图 1)并对其物理性质开展了深入研



图 1 中国科学院物理研究所利用超短脉冲激光在空气中产生的电离通道

Fig. 1 Long plasma channel produced by intense fs laser pulse in the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

究<sup>[16,20-30]</sup>;此研究所在国际上率先对等离子体通道寿命的延长进行了研究并取得了一定突破,实验中首先采用 fs 脉冲在空气中产生电离通道,经过 10 ns 的延时再向通道入射一个脉宽 300 ps 的后续脉冲,实验结果显示这种方法将等离子通道的寿命提高了一个数量级<sup>[16]</sup>,在国内首次实现了 fs 激光等离子体通道引导的长间隙高压放电<sup>[29]</sup>。实验中将脉宽 50 fs,能量为 40 mJ 的 fs 激光脉冲经焦距为 4 m 的透镜聚焦,在焦点附近形成长约 50 cm 的等离子体通道。实验中采用的高压电源可提供最高 180 kV 的静态正高压。高压电极为直径 55 cm 金属圆盘,接地电极为直径 1 cm 的金属小球。在圆盘和小球的中心都有一个直径 2 mm 的小孔,通过调节聚焦透镜位置将通道中光强最强的一段置于两个电极之间。超短脉冲激光形成的等离子体通道穿过小球与极板上的小孔将电源的正负极连接起来,从而诱发高压放电。图 2、3 是中国科学院物理研究所实验中拍摄到的自然放电和激光引导放电的电弧,激光引导放电电极间距为 23 cm。

## 3 激光引雷的技术瓶颈

激光引雷的研究虽然已经开展了几十年,但距离真正的实际应用还有很多的技术瓶颈有待突破。

### 3.1 激光器的造价

目前无论是大功率、高能量的长脉冲激光,还是超短超强脉冲激光都具有体积庞大,造价高昂的特点,并且这些激光的操作和维护都很复杂,运行成本也很高,现阶段难以实现大规模应用。

### 3.2 等离子通道的品质有待进一步提高

目前实验上产生的激光等离子体通道的品质距

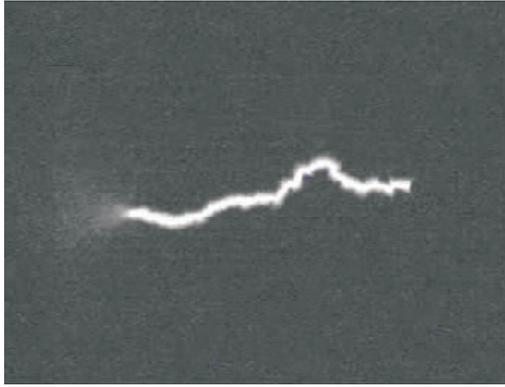


图2 自发放电

Fig. 2 Natural discharge

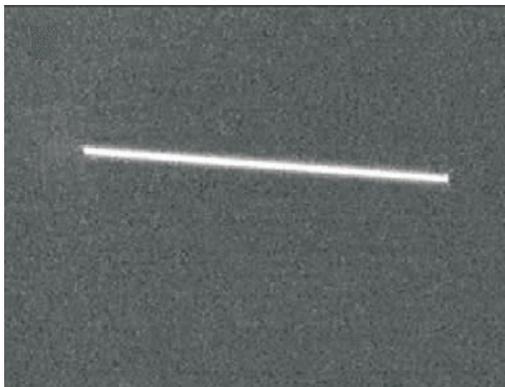


图3 fs激光引导放电

Fig. 3 Femtosecond laser triggered and guided discharge

离实现真正的引雷还相差很远。在这一方面大能量长脉冲激光,紫外激光,以及超短超强脉冲激光都有各自的不足。长脉冲激光产生的通道是一连串的击穿火花,尽管寿命和电子密度较高,但通道不连续,激光在通道中衰减很快,限制了其传输距离;紫外激光由于大气的吸收较强,也难以产生长距离的通道;超短脉冲激光虽然可以产生很长的电离通道(km量级),但电子密度很低,单个激光脉冲产生的通道寿命只有几个 ns,而激光引雷要求通道的寿命至少要达到  $\mu\text{s}$  甚至 ms 量级。采用超短脉冲产生长距离的先期电离通道,再用长脉冲激光维持其寿命已经被实验证明具有一定的效果。但从长远发展来看,采用间隔 ns 量级的超短脉冲序列产生同时具有长距离和长寿命的电离通道或许是更为可行的办法。

### 3.3 激光引雷的物理机制尚未完全揭晓

虽然一系列的实验演示了激光引雷在基本原理上的可行性,但目前的实验研究仅仅局限于对现象的观察,尚未真正深入到物理机制的研究。激光引导高压放电是激光传输与气体放电的交叉领域,涉及到的物理过程十分复杂,但至今尚未建立起较为

完善的理论模型,人们对这种现象的物理机制还不十分清楚。以往对气体放电过程的研究主要集中在自发放电,而激光引导的放电与自发放电的区别在于放电过程开始之前,空气中已经有了一定密度分布的自由电荷,通道中的自由电荷在高压电场的作用下产生漂移,导致原来的电场发生畸变,在这种情况下,局部的电场强度甚至可以超过原电场,即使原电场不足以引起空气间隙的击穿,但是在等离子体通道的参与下,仍然有可能使局部的电场强度超过击穿阈值,这就是等离子体通道能够提前诱发放电的主要原因。局部电子崩形成的流注沿着等离子体通道发展,最终形成等离子体通道引导的高压放电。从这些定性的分析可以看出,通道中的自由电荷引起电场的畸变和流注沿通道的发展是激光引导放电最关键的两个物理过程。而目前针对这两个过程的理论研究非常之少,主要原因还是其物理过程过于复杂,建模难度很大。有人尝试采用粒子模拟的方法研究放电问题,但一直也没有突破性的进展

## 4 激光引雷研究的深入内容

根据上面提及的激光引雷涉及的物理问题和技术瓶颈,有必要深入开展以下几个方面的科研工作。

### 4.1 激光等离子体通道引导高压放电的规律的实验研究

由于目前国际上对激光等离子体通道引导高压放电的研究基本上处于效果演示阶段,对引导放电的效果与等离子体通道的各种特征参数之间的关系尚未进行系统的定量测量。需要在实验室环境下利用人工产生的静态直流高压对 fs 激光引导放电的特性开展深入研究;对等离子体通道的参数进行优化,寻找等离子体通道各种特征参数之间的最佳匹配,争取利用尽可能少的激光能量实现对长间隙高压放电的诱发和引导。同时在实验上监测放电发展过程中的每一个环节,包括等离子通道的产生和控制,电晕放电,流柱与先导的产生和发展,以及回击过程。通过比较自发放电与引导放电发展过程的特征,揭示激光引导放电的机理。

### 4.2 建立描述等离子体通道与高压放电耦合过程的理论模型和模拟程序

虽然激光等离子体通道诱发和引导的高压放电涉及到的物理过程十分复杂,但放电现象归根结底是电磁场与电荷的强耦合过程,其中还有碰撞电离,光电离等过程的参与。因此,在现有的气体放电理论的基础上对放电过程的电磁场进行求解,同时考虑放电发展过程中的辐射输运等因素,对等离子体通道引导高压放电的各个发展阶段建立相应的数学模

型和模拟程序是十分必要的,这对从事气体放电、雷电科学和电磁场研究的理论工作者是也一个巨大的机遇和挑战。

## 5 结 语

激光引雷属于激光物理、大气物理学与高电压技术之间的交叉学科,具有很重要的学术价值和实用价值,现在各种模型和机制并不能完全解析和描述该过程。激光引雷的核心物理过程是激光等离子通道对高压放电的诱发和引导,而这一物理现象的应用范围不仅仅限于激光引雷,在高压电控制技术等方面也具有很大的应用前景。同时激光引雷的研究对高电压技术,激光技术的发展也有着巨大的牵引作用,对我国的自然灾害预防、经济和科技事业的发展具有重要的学术和应用意义。

## 参 考 文 献

- [1] Ball L M. The laser lightning rod system - thunderstorm domestication[J]. *Appl Opt*, 1974, 13(10): 2292-2296.
- [2] Keldysh L V. Ionization in the field of a strong electromagnetic wave[J]. *Sov Phys JETP*, 1965, 20:1307-1314.
- [3] WANG D, Kawasaki Z I, Matsuura K, et al. A preliminary study on laser triggered lightning[J]. *J Geophys Res*, 1994, 99 (D8): 16907-16912.
- [4] WANG D, Ushio T, Kawasaki Z J, et al., The study of the possibility of lightning triggering by means of laser[J]. *J Atmos Electr*, 1994, 14(1): 49-55.
- [5] Tamanaka T, Uchida S, Shimada Y, et al. First observation of laser triggered lightning[J]. *SPIE*, 1998, 3343: 281-288.
- [6] Zhao X M, Diels J C, Wang C Y, et al. Femtosecond ultraviolet laser pulse induced lightning discharges in gases[J]. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 1995, 31(3): 599-612.
- [7] Patrick Rambo, Jens Schwarz, Jean-Claude Diels. High-voltage electrical discharges induced by an ultrashort-pulse UV laser system[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2001, 3:146-158.
- [8] 王道洪, 郗秀书, 郭昌明. 雷电与人工引雷[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2000.
- [9] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulse[J]. *Opt Commun*, 1985, 56(3): 219-221.
- [10] Braun A, Korn G, Liu X, et al. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air[J]. *Opt Lett*, 1995, 20: 73-75.
- [11] Bruno La Fontaine, Daniel Comtois, Ching-Yuan Chien, et al. Guiding large-scale spark discharges with ultrashort pulse laser filaments[J]. *J Appl Phys*, 2000, 88(2): 610-615.
- [12] Tzortzakis S, Prade B, Franco M, et al. Femtosecond laser-guided electric discharge in air[J]. *Phys Rev E*, 2001, 64: 057401.
- [13] Comtois D, Chien C Y, Desparois A, et al. Triggering and guiding leader discharges using a plasma channel created by an ultrashort laser pulse[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(7): 819-821.
- [14] Rodriguez M, Sauerbrey R, Wille H, et al. Triggering and guiding megavolt discharges by use of laser-induced ionized filaments[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(9):772-774.
- [15] Ackermann R, Stelmaszczyk K, Rohwetter P, et al. Triggering and guiding of megavolt discharges by laser-induced filaments under rain conditions[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85 (23): 5781-5783.
- [16] Hao Z Q, Zhang J, Li Y T, et al. Prolongation of the fluorescence lifetime of plasma channels in air induced by femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys B*, 2005, 80: 627-630.
- [17] Guillaume Méjean, Roland Ackermann, Jérôme Kasparian, et al. Improved laser triggering and guiding of megavolt discharges with dual fs-ns pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 021101.
- [18] Jérôme Kasparian, Roland Ackermann, Yves-Bernard Andr, et al., Electric events synchronized with laser filaments in thunderclouds[J]. *Opt Express*, 2008, 16(8): 5757-5763.
- [19] 李志刚, 王声波, 郭大浩, 等. 强激光引导和诱发大气高压放电研究[J]. *激光技术*, 1999, 23(6): 332-334.  
LI Zhi-gang, WANG Sheng-bo, GUO Da-hao, et al. Experimental study of guiding and triggering of air discharge by laser induced plasma[J]. *Laser Technology*, 1999, 23(6): 322-334.
- [20] 杨 辉, 张 杰, 马锦绣, 等. 对超短脉冲激光引雷产生的等离子体通道的特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(5): 537-540.  
YANG Hui, ZHANG Jie, MA Jin-xiu, et al. The characteristic studies on plasma channels in ultra-short laser pulses triggered lightning[J]. 2000, 12(5): 537-540.
- [21] Yang H, Zhang J, Yu W, et al. Long plasma channels generated by femtosecond laser pulses[J]. *Phys Rev E*, 2001, 65: 016406.
- [22] Yang H, Zhang J, Li Y J, et al. Characteristics of self-guided laser plasma channels generated by femtosecond laser pulses in air[J]. *Phys Rev E*, 2002, 66: 016406.
- [23] Yang H, Zhang J, Zhao L Z, et al. Third-order generation by self-guided femtosecond pulses in air[J]. *Phys Rev E*, 2003, 67: 015401.
- [24] Jin Z, Zhang J, Xu M H, et al. Control of filamentation induced by femtosecond laser pulses propagating in air[J]. *Opt Express*, 2005, 13: 10424-10430.
- [25] Xi T T, Lu X, Zhang J. Interaction of light filaments generated by femtosecond laser pulses in air[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96: 025003.
- [26] Zuoqiang Hao, Jie Zhang, Zhe Zhang, et al. Characteristics of multiple filaments generated by femtosecond laser pulses in air: Prefocused versus free propagation[J]. *Phys Rev E*, 2006, 74: 066402.
- [27] Hao Z Q, Zhang J, Lu X, et al. Spatial evolution of multiple filaments in air induced by femtosecond laser pulses[J]. *Opt Express*, 2006, 14(2):773-778.
- [28] Zuo-Qiang Hao, Jie Zhang, Ting-Ting Xi, et al. Optimization of multiple filamentation of femtosecond laser pulses in air using a pinhole[J]. *Opt Express*, 2007, 15(24):16102-16109.
- [29] 张 喆, 鲁 欣, 郝作强, 等. 飞秒激光引导闪电的模拟实验

研究[J]. 物理学报, 2007, 56(9): 5293-5297.

ZHANG Zhe, LU Xin, HAO Zuo-qiang, et al. Laboratory simulation of femtosecond laser guided lightning discharge[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(9): 5293-5297.

[30] Yuan-yuan Ma, Xin Lu, Ting-ting Xi, et al. Widening of long-range femtosecond laser filaments in turbulent air[J]. Opt Express, 2008, 16(12):8332-8341.



LU Xin  
Ph. D.

Associate professor



ZHANG Zhe

**鲁欣**

1973—,男,博士,副研究员  
超短超强脉冲激光大气传输及其应用  
电话:(010)82648014  
E-mail: luxin@aphy. iphy. ac. cn

**张喆**

1981—,男,硕士  
超短超强脉冲激光大气传输及其应用  
电话:(010)82648028  
E-mail: z Zhang@aphy. iphy. ac. cn

**郝作强**

1977—,男,博士  
超短超强脉冲激光大气传输及其应用  
电话:(010)82648028  
E-mail: zqhao@aphy. iphy. ac. cn



HAO Zuo-qiang  
Ph. D.



WANG Zhao-hua  
Ph. D.



WEI Zhi-yi  
Ph. D., Professor



JIANG Xiu-chen  
Ph. D., Professor



ZHANG Jie  
Ph. D., CAE member

**王兆华**

1977—,男,博士,副研究员  
超短脉冲激光技术  
电话:(010)82649328  
E-mail: zhwang@aphy. iphy. ac. cn

**魏志义**

1963—,男,博士,研究员  
超短脉冲激光技术  
电话:(010)82648115  
E-mail: wzhy@aphy. iphy. ac. cn

**江秀臣**

1965—,男,博士,教授  
高电压技术  
电话:(021)34205431  
E-mail: xcjiang@aphy. iphy. ac. cn

**张杰**

1958—,男,博士,院士  
高能量密度物理  
电话:(010)82649356  
E-mail: jzhang@aphy. iphy. ac. cn