

超短脉冲激光在引导闪电中的应用*

杨辉 张杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

摘要 超短超强激光可以在大气中引起非线性效应以及产生等离子体,超短超强激光的非线性自聚焦和等离子体散焦的平衡可以使激光在大气中传播很长的距离,从而产生一条较长的低密度的等离子体通道.文章对其形成的原理和利用其引导闪电的可行性进行阐述,说明该通道在外场下可以触发和引导闪电到安全地点.对其机制的深入研究对工业和国防应用具有重要的意义.

关键词 激光引雷,等离子体通道,大气传输,自聚焦

APPLICATION OF ULTRA-SHORT PULSE LASERS IN INDUCED LIGHTNING

YANG Hui ZHANG Jie

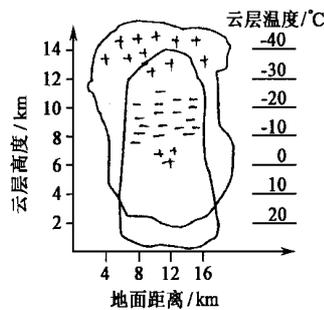
(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The balance between the nonlinear self-focusing effect and the de-focusing of plasmas provides a possibility for ultra-short and ultra-strong laser pulses to propagate in the atmosphere for a long distance, producing as a result a low density long plasma channel. This article describes the principles and the feasibility of using ultra-short pulse lasers to induce lightning.

Key words laser induced lightning, plasma channel, propagation in atmosphere, self-focusing

1 引言

闪电是自然界的一种放电现象.闪电发生于强对流云中,云的微物理和动力过程相互作用导致云内正负极性电荷的大量分区集聚.云层所带的电荷的种类由周围的温度所决定,一般在 -15°C 出现转折,高于 -15°C 云层带负电,低于 -15°C 云层带正电^[1].这时雷暴云中呈现上正下负的偶极子的结构,如图1所示.带有大量电荷的云层会在云层之间或云层和大地之间形成强大的电场,此电场强度可达 $10^3\sim 10^5\text{ V/cm}$,这样强的电场,在一定条件下可以使局部空气发生雪崩电离,形成先导.先导在外场作用下运动,其运动的速度约为 10^5 m/s ,运动路径可能弯曲,并可以分岔.但最终在云层和大地之间形成狭



* 国家自然科学基金(批准号:19825110,10004015)和国家863高技术惯性约束核聚变主题

2000-04-28 收到初稿,2000-08-30 修回

象上安装避雷针,或在重要设施上安装防雷设施,把放电电流引向地面,以防闪电直接攻击建筑物,这些措施在一定程度上可以减小雷电带来的灾害.但因为是被动的,不灵活,特别是在不易安装这些避雷设施的地方,就显得无能为力.因此发展一种主动的全新的引雷的方法是必要的.所谓主动的引雷方法就是在雷电形成之前采取措施以避免雷害,其关键是要在空气中产生放电通道,自然闪电中通道的形成是靠梯级先导放电逐步形成的.现在人工引导闪电的主要方法有:

利用火箭拖引导线飞向云层来引导云层电荷放电,在预定的安全地点,其主要思想来源于著名的18世纪的富兰克林的风筝实验.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通道,引导云层电荷沿通道运动而将其引向安全地点,以保护重要设施免遭雷击.虽然这种技术已发展较成熟,但由于利用火箭引雷方法不够灵活,受各种地形的限制,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^[2-4].

到20世纪70年代,随着激光技术的发展,美国人B. Ball在1974年提出了一种全新的方法^[5]:利用激光在大气中电离气体而产生一条放电通道,以引导闪电在通道中形成和发展,沿安全的路径放电.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.

2 激光在大气中产生等离子体通道原理

激光引导闪电,就是利用激光在云层和大地之间产生一个放电通道.其基本思路是,利用激光在空气中传播时产生的弱等离子通道,引导梯级先导沿激光等离子体通道向上发展直至云层而形成放电通道.因此要想利用激光引导闪电的关键就是要在空气中形成一条较长的等离子体通道.我们知道激光的光束可近似看作高斯分布,其瑞利长度($Z_r = kr_0^2/2$,其中 k 为波数, r_0 是激光聚焦半径)一般较短,因此激光在自由传输过程中就不可避免要发散,不可能产生很长的等离子体通道.但空气是非线性介质,只要激光的光强达到某一强度,其非线性效应就不可忽略,在激光场中介质的非线性折射率随光强的变化有如下关系^[6]:

$$n = 1 + \eta_2 I, \quad (1)$$

η_2 是非线性折射率系数, I 是激光强度,由于激光

场具有高斯分布, $I = I_0 \frac{r_0^2}{r^2} \exp\left[-\frac{r^2}{r_0^2}\right]$,这样在空气中就形成了中心折射率高、边缘折射率低的通道.该通道具有类似正透镜的作用,使光线发生会聚作用,这样就可以使光线传播很远的距离.当光束会聚时,这时光场强度变大,会引起气体电离,形成等离子体通道,因为等离子体具有散焦的作用,这时介质的折射率可以写成

$$n = 1 + \eta_2 I - \frac{n_c}{2n_c}, \quad (2)$$

式中 n_c 是电子密度, n_c 是等离子体的临界密度,这样我们可以从麦克斯韦的波动方程得:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E = 4\pi P. \quad (3)$$

于是得到光束的半径随传播距离的变化情况^[8,11,14]如下式所示:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1}{k^2 Z_r^2} \left[1 - \frac{P}{P_n} \right] + \frac{1}{2n} \int N_0 \omega(t, z) dt, \quad (4)$$

这里, $Z_r = kr_0^2$ 是瑞利长度, $P_n = 2\pi/k^2 \eta_2$ 是激光自聚焦的临界功率, η_2 是介质的非线性折射率系数,空气一般取 $5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{W}$, $\omega(t, z)$ 为原子电离率.

从上式可以看出,当功率 P 大于 P_n 时,这时光线将发生会聚作用,光束半径将缩小.当半径缩小时,激光功率变大,介质的电离率将变大,电子的密度将变大,也就是等离子体的散焦作用变大,最终使会聚和散焦达到平衡,从而使激光可以传输很远的距离(如图2所示),产生一条较长的低密度等离子体通道,从而为引导闪电提供必要条件.

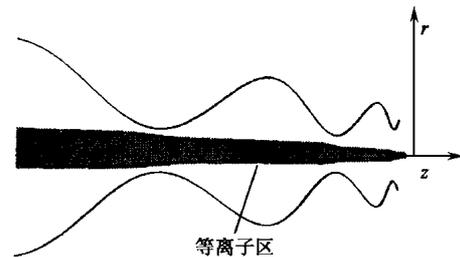


图2 激光在空气中传播示意图

3 超短脉冲激光引雷的特点

当电子的浓度超过一临界值时,在外电场的作用下,局部空气发生雪崩电离,这时形成先导,如果此时地面电场为正电场(定义云层下部电荷为正时为正电场),那么电子将沿着激光产生的等离子通道

向上运动,此即上行先导.先导逐步向上发展直至云层,与云层的正电荷发生中和而产生放电.现在利用激光引雷的方法主要有两种:一是利用高能量的CO₂激光系统;二是利用超强超快激光系统.

由于高能量的CO₂激光系统能量非常大,脉冲宽度较长,所以主要通过碰撞电离机制,使介质发生电离,从而形成一条等离子体通道.该激光系统结构复杂,并且使用这种方法所需能量非常大,产生的等离子体的浓度一般很高,可达到等离子体临界密度,这对激光的传输是很不利的,使激光不能传输很远的距离,因此不是很有效的方法.

人们在寻求一种更有效的方法.随着超强超短激光技术的迅速发展,利用CPA放大技术可以产生TW级的超短超强激光脉冲,为激光引雷提供了全新的工具.这种方法是利用超短脉冲激光与气体介质发生相互作用,从而使介质发生电离,其电离机制与CO₂系统不一样,由于激光光强非常大,一般可达10¹³ W/cm²,这时主要发生光致电离.因为空气中氧气和氮气的电离能分别为12eV和15.5eV,对不同激光系统其电离机制稍有差别,对紫外超短激光系统,由于其光子能量高,只需3—4个光子就可电离氧和氮气,因此主要考虑多光子电离^[12,13].其电离率方程为:

$$W = \alpha_k I^k, \quad (5)$$

其中 I 为激光强度, k 为电离所需的光子数, $kh\omega \geq \xi_1, \xi_2$ 是电离能,

$$\alpha_k = \omega k^{3/2} \left| \frac{l\pi e^2}{m_e c \omega^2 \xi_1} \right|^k, \quad (6)$$

l 为大于或等于1的参数,由实验条件决定.

对于红外激光系统来说,光子能量较低,需8—9个光子才可电离,所以一般考虑其隧道电离^[8-11,15-17].其电离的速率方程可用下式表示:

$$W_{dc}(z, t) = 1.61 \omega_0 \frac{Z^2}{n_{eff}^{4.5}} \left| 10.87 \frac{Z^3 E_0}{n_{eff}^4 E_s} \right|^{2n_{eff}-1.5} \exp \left| -\frac{2}{3} \left| \frac{Z^3}{n_{eff}^3} \frac{E_0}{E_s} \right| \right|. \quad (7)$$

其中 Z 为离子的电荷数, n_{eff} 为有效量子数, E_0 为氢原子在第一玻尔半径的原子电场强度 (5.1×10^9 V/cm), E_s 为静态场电场强度, ω_0 为频率的原子单位 ($4.1 \times 10^{16} s^{-1}$).

当电场强度为10¹³ W/cm²左右时,在这两种机制下原子的电离速率为10¹²/s左右,通道产生的电子的浓度约为10¹⁵/cm³,这个电子浓度大于外场下

触发闪电的临界电子浓度 $5 \times 10^{11}/cm^3$.一般紫外激光系统产生的电子浓度为连续的,较易于控制.而红外激光系统产生的电子浓度为非连续的,一般不易控制浓度.当电子在外电场的作用下发生加速运动,可以通过碰撞电离原子,使电子的浓度增加,引起电场的变化,当局部电场强度大于24 kV/cm时,这时气体将发生雪崩电离而形成先导.由于通道的电子浓度较大,其平均浓度可达10¹⁴—10¹⁵/cm³.通道的电阻较小,其电阻率一般只有10⁻³ Ω·m.因而先导将沿着通道运动发展,最后直达云层,这时云层大量电荷开始放电,在通道中形成强大的电流并以光的形式放出巨大的能量,这就是闪电.由于闪电沿着该通道放电,因而可以把闪电引向安全的地方,从而达到引导闪电的目的.

4 激光引雷的发展和展望

激光引雷由于其灵活方便,在工业和国防上展示出广阔的应用前景.虽然激光引雷在70年代就提出来了,但由于当时的激光条件的限制,未能得到很大的发展.随着激光技术的发展以及激光在大气中传输研究工作的进展,实验上证实激光可以在大气中传输并产生长达100 m的等离子体通道,因此激光引雷在技术上已成为可能.激光引雷以其灵活、半连续的触发方式而越来越受到人们的重视,并成为最有前途的引雷方式.现在美国、日本、加拿大、法国等国家的一些实验室正在进行该项研究.图3和表1将分别给出一般野外的引雷的装置和世界各国进行激光引雷研究的各实验室的情况.

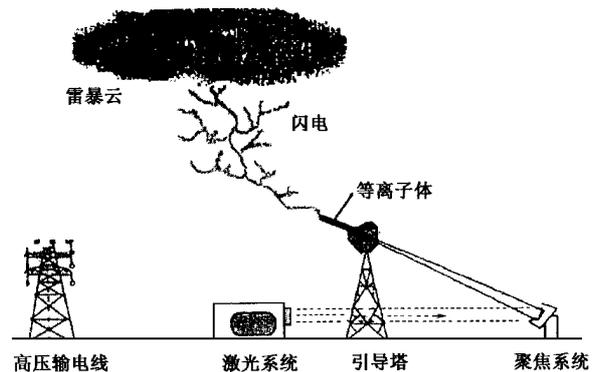


图3 野外引雷的实验装置

美国的新墨西哥州立大学的研究人员已在实验室内成功利用激光引导高压放电^[12],日本大阪大学的研究人员利用CO₂激光器进行了户外的实验,并有成功的报道^[1],其他实验室也报道了利用超短脉

冲激光产生较长等离子体通道的结果^[18]。但这些研究大多还集中在理论和初步实验上,离实际应用还有一段距离。主要原因是通道内的电子的发展受各种因素的影响,在何种条件下形成先导,以及先导的运动规律还不是很清楚。再者该实验需较大的监测

系统,对云层和地面的电场进行监测也较为困难,而这是选择合适的激光触发时机的关键。因此对激光引雷进一步深入研究是很有必要的,相信在不久的将来这项技术将造福于人类。

表1 从事激光引雷实验研究的世界主要单位

主要单位	主要成员	经 费	使用的激光器
OSAKA 大学	S. Uchida, Y. Shimada, H. Yasuda, S. Motokoshi 等	约 1,000,000 \$/年(1989 年起)	2 台 2000J 的 CO ₂ 激光器,首次报道野外引雷成功
Kansai 电力公司	Ysonoi, T. Nagai, H. Yasuda	未知	高能量 CO ₂ 激光器
Kyoto 大学	R. Itatani, M. Kubo, M. Jinno 等	未知	高能量 CO ₂ 激光器
CREIPI	T. Shindo, M. Miki, Y. Aihara 等	未知	高能量 CO ₂ 激光器(大约 1kJ)
Hydro Quebec 和 INRS	H. P. Mercure, H. Pepin, F. Rizk 等	1,000,000 \$/年(1997 起)	超短红外脉冲
RCIT 研究所	Y. A. Rezunkov, H. Pepin, F. Rizk 等	未知	1 kJ 高能量,长波长钕玻璃激光
Genenal 研究所	V. Apollonov 等	由 Lawrence Livermore 实验室 SDI 公司提供	高能量 CO ₂ 激光器
CEA Grenoble	Eybert Berard 等	未知	高能量分子激光器
New Mexico 大学	J. C. Diels, P. K. Rambo, J. Schwarz 等	2000,000 \$/年(1996 年起)	高重复率,超短紫外脉冲激光装置

5 结束语

激光引雷属于激光物理和大气物理学之间的交叉学科,具有很重要的应用价值。对它的真正的研究也是近几年才刚开始,现在各种模型和机制并不能完全解析和描述该过程。因此对它的深入研究对我国的气象、工业和国防事业具有重要的学术和应用意义。

致谢 该工作得到了李英骏、陈黎明博士许多有益的帮助,特此致谢。

参 考 文 献

[1] Yamanaka T. Laser triggered lightning. In: Asian Science Seminar on High-power Laser Matter Interaction. Tokyo: OS-
AKA,1999

[2] 王才伟,刘欣生,董万胜等.高原气象,1998,17:65[WANG
Cai-Wei, LIU Xin-Sheng, DONG Wan-Sheng *et al.* Plateau
Meteorology, 1998,17:65(in Chinese)]

[3] 言穆弘.高原气象,1998,17:11[YAN Mu-Hong. Plateau
Meteorology,1998,17:11(in Chinese)]

[4] 王才伟,刘欣生,董万胜等.高原气象,1998,17:272[WANG
Cai-Wei, LIU Xin-Sheng, DONG Wan-Sheng *et al.* Plateau
Meteorology,1998,17:272(in Chinese)]

[5] Ball L M. Appl. Opt.,1974,13:2292

[6] SHEN Yuan-Rang. The Principles of Nonlinear Optics. New
York: Wiley-Interscience, 1984.303

[7] Bharuthram R, Parashar J, Tripathi V K. Phys. Plasmas,
1999,6:1611

[8] Sprangle P, Esarey E, Ting A. Phys. Rev. A,1990,41:
4463

[9] Penetrante B M, Bardsley J N. Phys. Rev. A, 1991,43:
3100

[10] Augst S, Dmeyerhofer D, Strickland D *et al.* J. Opt. Soc.
Am. B,1991,8:858

[11] Leemans W P, Clayton C E, Mori W B *et al.* Phys. Rev. A,
1992,46:1091

[12] Zhao X M, Diels J C, Wang C Y *et al.* IEEE J. Quantum
Elect.,1995,31:599

[13] La Fontaine R, Vidal F, Contois D *et al.* IEEE Trans. Plas.
Sci.,1999,27:688

[14] Sarey E, Sprangle P, Jonathan J *et al.* IEEE J. Quantum
Elect.,1997,31:1879

[15] 王骥,张杉杉,卢兴发等.光学学报,1999,19:201[WANG
Qi, ZHANG Shan-Shan, LU Xing-Fa *et al.* Acta Opt. Sini-
ca,1999,19:201(in Chinese)]

[16] 陈德应,夏元钦,卢兴发等.光学学报,1999,19:884[CHEN
De-Yin, XIA Yuan-Qin, LU Xing-Fa *et al.* Acta Opt. Sini-
ca, 1999,19:884(in Chinese)]

[17] Corkum P B, Buenet N H, Runet F B. Phys. Rev. Lett.,
1989,62:1259

[18] Fontaine B L, Vidal F, Jiang Z *et al.* Physics of Plasmas,
1999,6:1615