

文章编号: 1001-3806(2003)03-0256-03

## 飞秒激光脉冲在大气中的光丝现象及其应用<sup>\*</sup>

赵尚弘 石磊 李玉江 朱蕊频

(空军工程大学电讯工程学院,西安,710077)

**摘要:** 分析了飞秒激光脉冲在大气中传输时光丝的形成机理。克尔效应引起的光束自聚焦与多光子电离产生的等离子体散焦作用共同导致光丝的形成和长距离传输。讨论了光丝长距离传输特性在超宽带激光雷达和激光引导闪电等方面的潜在应用。

**关键词:** 飞秒激光;大气传输;光丝;激光雷达;激光引雷

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A

### Filamentation of femtosecond laser pulse in atmosphere and its application

Zhao Shanghong, Shi Lei, Li Yujiang, Zhu Ruipin

(Institute of Telecommunication Engineering, Air Force University, Xi'an, 710077)

**Abstract:** The mechanism of filamentation formed by femtosecond pulse laser beam propagating in atmosphere is investigated. The balance between the self-focusing of laser beam due to Kerr effect is countered by plasma defocusing caused by multiphoton ionization creates the stabilized long-distance filament propagation in atmosphere. The potential application of filament in ultra-wide-band lidar and laser induced lightning is also analyzed.

**Key words:** femtosecond laser; propagation in atmosphere; filament; lidar; laser induced lightning

### 引言

近年来,超强超短脉冲在大气中的远距离传输一直是一个极具吸引力的研究领域。因为超短脉冲激光束在空气中传输时会产生自聚焦现象,这使光束直径聚焦到只有几百微米,而且在远距离传输过程中能保持其高能量和瞬态结构不变,形成所谓的光丝<sup>[1]</sup>。最近的实验表明,TW级飞秒激光器产生的脉冲能传输到12km的高空,这也是基于光丝的特性所致<sup>[2]</sup>。这种高能量和超远传输能力以及由此引起的超强的自相位调制效应可产生从近紫外到近红外(300nm~4.5μm)的近似白光光谱,使得一种新型远距离光侦察和定位系统——超宽带激光雷达的发展成为可能<sup>[3]</sup>。另外,从近紫外到近红外频段展宽白光,可有效地破坏军事电子对抗装置中的传感器。同时,空气电离产生的等离子体通道可在主动引导闪电中发挥作用<sup>[4]</sup>。因此,飞秒激光脉冲在空气中的传输特性在军事及工业领域都具有重要

应用前景。但要决定该传输现象能否真正在这些和其它一些领域得到应用,就必须将一些隐含的基本物理问题弄清楚。例如,在这些光丝中,由于激光脉冲的非线性效应导致其空间(自聚焦,自导,自反射)、光谱(四波混频,自相位调制)和时域(脉冲自陡峭,脉冲分离)特性发生巨大的变化,这些问题有待进一步探讨。

### 1 光丝的形成和传输

理论上描述光丝现象的基础是非线性薛定谔方程,但目前有3种不同的理论模型,即自波导模型、动焦点模型和动态空间再补给模型<sup>[1]</sup>。自波导模型认为自聚焦和光场电离的共同作用形成一个波导通道,使光丝得以维持。而动焦点模型认为由于光场电离使脉冲的不同时间切片具有不同焦距,而在不同位置出现自聚焦,总效果即为光丝。动态空间再补给模型认为脉冲前沿的时间切片的成丝抑制了后沿时间切片的成丝,等到其衰弱后,后沿的时间片就会成丝,这样就可用不同时间切片的依次成丝来解释光丝的长距离传输现象。目前看来,3个模型各有优缺点。

在最早提出的自波导模型中,解释飞秒激光脉冲的长距离传输机理较为明了。在透明介质中传输

\* 空军工程大学学术基金资助项目。

作者简介:赵尚弘,男,1964年7月出生。博士后,博士生导师。现从事光通信与激光技术研究。  
收稿日期:2002-05-31

的高能 (TW 级) 超短波激光脉冲 (100fs) 的光束可近似地看作高斯分布,  $I = I_0 \exp(-2r^2/z_R^2)$ , 其瑞利长度 ( $z_R = k z_0^2$ , 其中  $k$  为波数,  $z_0$  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, 不可能传输很长距离。但空气是非线性介质, 只要激光的光强达到某一强度, 在激光场中空气的折射率变为:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (1)$$

$n_2$  是非线性折射率系数,  $I$  是激光强度, 空气折射率与光强度相关, 称为光克尔效应, 它构成自聚焦现象的基础。因为在空气中  $n_2$  太小, 所以要形成自聚焦过程, 激光脉冲功率必须超过几个 GW。只有强聚焦或超短脉冲激光能够提供这样强大的功率, 而飞秒脉宽的激光脉冲正好提供了这种条件。由于激光场具有高斯分布, 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, 使光束发生会聚作用。当光束会聚时, 光场强度变大, 会引起空气电离, 在光路上形成等离子体通道。这时空气的折射率可以写成:

$$n = n_0 + n_2 I - \frac{e^2}{2\epsilon_0} \quad (2)$$

式中,  $e$  是电子密度,  $\epsilon_0$  是等离子体的临界密度, 可见等离子体具有散焦作用。这样就可以从麦克斯韦的波动方程:

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

求得光束的半径随传播距离的变化情况:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1}{k^2 z_R^2} \left( 1 - \frac{P}{P_n} \right) + \frac{1}{2n_c} N_0 \mu(t, z) \quad (4)$$

式中,  $z_R$  是瑞利长度,  $P_n = 2 / k^2 n_2$  是激光自聚焦的临界功率,  $n_2$  是介质的非线性折射率系数, 空气一般取  $5 \times 10^{-19} \text{cm}^2/\text{W}$ ,  $\mu(t, z)$  为原子电离率。

从上式可以看出, 当功率  $P > P_n$  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, 激光功率密度变大, 空气电离产生电子的密度将变大, 使等离子体的散焦作用变得更明显, 最终使会聚和散焦达到平衡, 由此形成所谓的光丝。

实验中产生光丝的装置是相对简单的。一台 1kHz 钛宝石激光器发射脉宽 50fs、波长 810nm 的脉冲, 用电荷耦合相机 (CCD) 来测量其随时间和距离改变形状的情况, 相机记录了小部分从反射玻璃板弹回的光束。等离子体的产生情况用设置在光路上的电阻电路来测量, 当等离子体穿过两极时电路短路。

1994 年, 超短脉冲激光器投入运行后不久,

Mourou 和他的小组成员就在密西根大学的实验室上空发射 10GW, 200fs 的激光脉冲。他们的目的是想用光来模拟脉冲式的微波雷达。伴随着预料中的自聚焦过程, 他们惊奇地发现了一些别的现象。被称之为光丝的窄脉冲充当自己的波导, 保持它们自己的宽度且沿他们实验室上空传输了几十米远。

在一些类似的实验中证实, 等离子体结构在光丝传输中扮演一个重要的角色。自聚焦过程增加了光强度, 光强度的增加导致更强的自聚焦; 反之又更增加了强度。等离子体的作用阻止了这个塌陷过程。这是因为当自聚焦过程使功率密度超过  $10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ , 多光子电离产生了一个等离子体, 它的折射率 (低于空气) 导致光束散焦。若没有自聚焦过程放大, 电流就会降低于电离阈值。克尔效应和自聚焦过程重新开始。故光丝传输依赖于一个介于克尔效应自聚焦和等离子体散焦之间的准动态平衡。

## 2 光丝现象的应用

### 2.1 超宽带激光雷达

飞秒 TW 级激光脉冲在空气中超强的自相位调制效应使自导等离子体光丝中产生超连续白光谱, 这使超宽带激光雷达成为可能, 在雷达空间分辨的基础上又增加了光谱分辨。激光雷达的工作原理是: 雷达将光脉冲发向空中, 这些光脉冲在大气中扩散、后向散射, 由散射回来的信号可以推算出时间、距离, 光电探测器收集到反射信号后就可以检测到空间物体的位置信息。

最近的研究成果表明: 在发射出去的雷达信号中, 自导光丝中产生的白光优先反射回来, 从而可检测到从 13km 高空反射回来的白光雷达信号。在利用自聚焦激光脉冲来测定大气污染时, 向空中发射两束激光。一束光被调谐到所关心的污染物吸收波段, 另一束作为基准光。这两束光中, 有一束光被吸收, 另一束则不被吸收, 经大气中的氮、氧分子或其它杂质粒子散射后, 地面检测器探测两束光被反向散射回的微量光。

宽带激光雷达与传统激光雷达的 3 个区别是:

(1) 传统激光雷达一次只能测量一个污染物质, 这对于光丝来说不是什么问题, 因为它宽阔的连续频段包含大量的吸收波段; (2) 很多被测浮尘的吸收区域在红外波段, 因此, 在该波段的回波信号非常弱, 光丝根本不依赖于反向散射信号, 而且, 它们能够产生自己的红外发射信号, 由于等离子体引起的后向散射过程, 它可以直接反射回地面; (3) 传统激光雷

达的单色光源对浮尘的形状不灵敏,例如,它们不能够测量浮尘的大小。而宽波段光丝则没有这种限制,因为散射光谱正好依赖于散射粒子的大小。

## 2.2 引导闪电

由于自导激光脉冲在传输路径上电离空气,光丝变得可导,因此,光丝实际上成为可用来进行电光避雷通道,这种特性可用来保护敏感场所,如发电厂、机场等。

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。当激光脉冲自聚焦所致等离子体电子的浓度超过某一临界值时,在外电场的作用下,局部空气发生雪崩电离,如果这时地面电场是正电场,那么电子会沿着激光产生的等离子通道向上运动直至云层,与云层的正电荷发生中和而产生放电。利用激光引雷主要有两种措施:一是利用高功率的 CO<sub>2</sub> 激光系统;二是利用超强超快的激光系统。由于高功率的 CO<sub>2</sub> 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空气发生电离,从而形成一条等离子通道。该类激光系统结构复杂,并且由于使用这种方法所需能量非常大,产生的等离子体浓度一般很高,接近等离子体的临界密度,此时等离子体的散焦作用很明显,使激光不能传输很远的距离,这对激光的传输是很不利的,故不是很有效的方法。

随着超强超短激光技术的发展,利用啁啾脉冲再生放大技术(CPA)可以产生 TW 级的超强飞秒激光脉冲。当这种超短脉冲激光在大气中传输时与气体发生相互作用,使空气发生光致电离。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。

当超强飞秒激光脉冲的功率密度达  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> 左右时,多光子电离引起原子的电离速度为  $10^{12}$ /s 左右,等离子体通道产生的电子浓度约为  $10^{15}$ /cm<sup>3</sup> 量级,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<sup>3</sup>。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 24kV/cm 时,这时气体将发生雪崩电离。由于通道的电子浓度较大,其平均浓度可达  $10^{14}$ /cm<sup>3</sup> ~  $10^{15}$ /cm<sup>3</sup>,使通道的电阻较小,其电阻率一般只有  $10^{-3}$  Ω·m<sup>[5]</sup>,因而电子将沿着通道运动发展,最后直达云层,使云层大量电荷放电(即闪电),闪电沿着该通道放电,把闪电引向安全的地方,从而达到引导闪电的目的。

## 参 考 文 献

- [1] Mlejnek M, Wright E, Moloney J. IEEE J Q E, 1999, 35 (12): 1771.
- [2] Akozbek N, Bowden C, Talepour A *et al.* Phys Rev E, 2000, 61 (16): 4540.
- [3] Braun A, Korn G, Liu X *et al.* Opt Lett, 1995, 20(1): 73.
- [4] Brinkmann U. Laser Focus World, 1999, 35 (11): 59.
- [5] 杨 辉,张 杰.物理, 2001, 30(1): 18~21.

(上接第 255 页)

相差仅为 0.2nm。由此不难看出,在相同的实验条件下,国产磷酸盐钽玻璃片激光光谱中心波长位置与 YLF 振荡器输出激光光谱中心波长的匹配较好,放大器能够获得较高的增益。

在工作的完成过程中,得到了中物院激光聚变研究中心李明中、景峰、苏春燕、刘华等同志的指导和帮助,在此表示诚挚的谢意。

## 参 考 文 献

- [1] Erlandson A C, Rotter M D, Frank D N *et al.* ICF Quarterly Re-

port (5) 1. CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1995: 18~28.

- [2] Erlandson A C, Lambert H, Zapata L E *et al.* SPIE, 1996, 3047: 138~147.
- [3] Erlandson A C, Alger T, Horvath J *et al.* Fusion Technology, 1988, 34(11): 1105~1111.
- [4] 王成程,郑万国,於海武 *et al.* 中国激光, 2001, A28(4): 355~358.
- [5] 於海武. 强激光与粒子束, 2000, 12(1): 145~148.
- [6] 於海武. 中国激光, 2001, A28(11): 961~965.
- [7] 周炳琨,高以智,陈家骅 *et al.* 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1996.