

等离子体通道的声学诊断方法*

郝作强¹ 张杰^{1,†} 俞进²

(1 中国科学院物理研究所 中国科学院光物理重点实验室 北京 100080)

(2 Laboratoire de Spectrométrie Ionique et Moléculaire, UMR CNRS 5579,

Université Claude Bernard-Lyon 1 43, Bd. du 11 Novembre 1918, F-69622 Villeurbanne Cedex, France)

摘要 超短脉冲强激光在空气中传输可以形成很长的等离子体通道,目前对这种等离子体通道有许多诊断方法,文章介绍了一种十分简易但很有效的方法——声学测量方法.该方法可以根据通道不同位置的声音信号,测量通道的长度和通道内电子密度等一些参数,具有其他传统诊断方法无可比拟的优越性.

关键词 声学测量,等离子体通道

Acoustic diagnostics of plasma channels in air induced by intense femtosecond laser pulses

HAO Zuo-Qiang¹ ZHANG Jie^{1,†} YU Jin²

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

(2 Laboratoire de Spectrométrie Ionique et Moléculaire, UMR CNRS 5579,

Université Claude Bernard-Lyon 1 43, Bd. du 11 Novembre 1918, F-69622 Villeurbanne Cedex, France)

Abstract A long plasma channel can be formed when intense femtosecond laser pulses propagate in air. In contrast to other conventional diagnostic techniques, the acoustic method to probe the plasma channel has unique advantages. By measuring the sound signals at different locations, the channel length and distribution of the electron density along the channel can be retrieved easily.

Key words acoustic diagnostics, plasma channel

1 前言

近几年来,超短脉冲强激光在空气中的传输问题引起了人们的高度重视.对强激光在空气中形成的长等离子通道的认识也越来越深入,观测到了等离子体通道中的许多新的物理过程,如长等离子体通道的形成,超连续谱的产生和锥角辐射等等.在通道内,激光强度大约为 $5 \times 10^{13} \sim 1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ^[1], 电子密度高达 10^{18} cm^{-3} ^[2].在这样的条件下,直接对通道内的测量是不可能的,我们必须依据通道所表现出来的各种现象,间接进行测量.目前的测量方法主要有阴影成像法^[3]、光学干涉法^[2]、荧光法^[1,4]和电导法^[3,5-7]等,这些方法各有不同的优越性,但

又各有不足之处.文中介绍的声学测量方法就是根据通道的不同位置所发出的声音,得到等离子体通道的长度以及通道内电子密度分布.这是一种简单易行但又很有效的测量方法.

2 声学测量方法基本原理

超短脉冲强激光在空气中传输时,形成了长等离子体通道,空气在很短的时间内被电离,激发起等离

* 国家自然科学基金(批准号:10176034,10374116,10390160),国家高新技术研究发展计划和国家重点基础研究发展计划(批准号:G1999075206)资助项目

2003-06-05 收到初稿,2003-07-04 修回

† 通讯联系人. E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

子体冲击波,并很快衰变成等离子体声波.等离子体声波是和通道内的自由电子密度密切联系着的,只要找到声波和电子密度的联系,我们就可以根据探测到的声音信号得到通道内电子密度的分布情况.

等离子体通道内的自由电子主要来自空气中氮气和氧气的电离.我们可以用下式表示通道内电子密度的演化^[3]:

$$dN_e(t)/dt = R(I)_{N_2} \times N_{N_2} + R(I)_{O_2} \times N_{O_2}, \quad (1)$$

其中 N_{N_2} 和 N_{O_2} 分别为空气中氮气和氧气的密度, $R(I)_{N_2}$ 和 $R(I)_{O_2}$ 分别为其电离率,它随激光强度的增加呈指数增大趋势^[8].

在通道内,自由电子和中性分子碰撞,通过逆韧致辐射过程吸收光子,动能增加.动能的增加和电子密度、有效碰撞频率以及激光强度密切相关.在等离子体通道内,还要受到通道横截面积的限制.这样,我们就可以得到通道不同位置的电子动能 $E_e(z)$.

通道发出的声音可以用高灵敏度、低噪音的麦克风来探测.麦克风采集的声音信号是通道发出声音的声波压调制的一部分: $\mathcal{S}(t) = A \times p_0 f(t)$,其中 $\mathcal{S}(t)$ 表示麦克风探测到的声音信号, A 为信号增益, p_0 是压力波振幅, $f(t)$ 为其时间形式.小麦克风所能探测到的一小段光丝发出的声波基本上是球对称分布的,声波能量透过一个闭合曲面传播出去,声波的法向强度对时间和声波面的二重积分就是这段光丝所发出的声波能量.

这一小段光丝发出的声波能量可以和麦克风探测到的信号建立联系.声波能量是电子吸收光子的能量的一部分^[10],我们通过一个 γ 因子将其联系起来.那么,实验得到的峰值声音信号就和电子吸收的能量有了联系,进而就和通道内的激光强度建立了联系:

$$S_0(z) = C \sqrt{E_e(z)}, \quad (2)$$

其中 $S_0(z)$ 是探测到的声音的峰值信号, $C = \sqrt{\gamma A^2 \left[\frac{2\pi R l}{2\rho_0 c_0} \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t) dt \right]^{-1}}$ 为常数, R 为麦克风与通道之间的距离, ρ_0 为空气密度, c_0 为声波相速度.

最后,将得到的通道内的激光强度代回到(1)式,就可以得到通道内的自由电子密度及其随激光传输距离的变化情况.

3 实验验证及其应用前景

在国内,还没有人用声学方法对等离子体通道

进行测量研究,在国外也只有俞进等人^[9]进行了研究,他们将脉宽为120fs、频率为20Hz、能量为8mJ、波长为810nm的激光,用一焦距为5m的凹面镜聚焦,在空气中形成了长等离子体通道.图1是实验装置示意图.

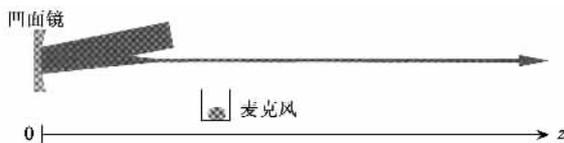


图1 实验装置示意图

利用高灵敏度、低噪音的小麦克风沿通道探测声音信号,测到的声音信号用示波器记录下来.从声音信号随激光传输距离的变化曲线(图2)可以看出,信号在2.5m处有一个很陡的上升沿,在4.2m处左右达到最大值,在7m处信号突然减小,由此可以断定等离子体通道在2.5m处开始形成,到7m处基本结束,并且在4.2m处对应的通道半径应该最小,这和用其他测量方法得到的结果符合得很好.

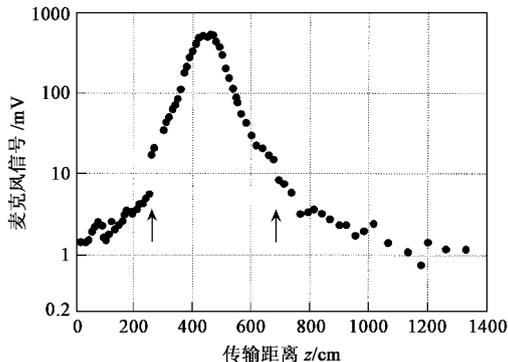


图2 麦克风信号随激光传输距离的变化

由测到的声音信号可以进一步得到通道的直径和通道内激光强度及其随激光传输距离的变化(图3),最终得到通道内的电子密度分布情况(图4).从图3和图4我们可以看出,通道直径很小的变化,就会引起电子密度很大的改变.在等离子体通道内,自由电子密度的变化达到3个量级,电子密度最大值超过了 10^{16} cm^{-3} ,这和其他的实验结果也基本符合^[11].

从上面的实验我们可以看出,只要探测等离子体通道不同位置的声音信号,就可以导出有关通道的很多参量,尤其是通道内的电子密度分布.这为等离子体通道的电子密度测量提供了一种简单快捷的测量方法.

运用声学方法来探测等离子体通道,具有很多

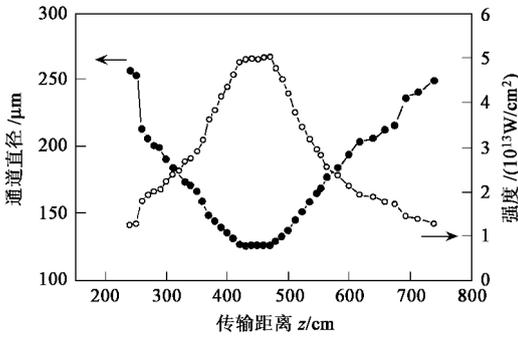


图3 通道直径和通道内激光强度随传输距离的变化

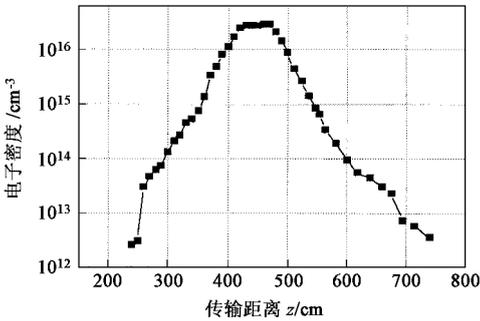


图4 电子密度随传输距离的变化

优点. 这种测量方法无破坏性, 可以进行实时探测, 克服了通道内激光强度太高而无法直接测量的困难, 相对其他的测量方法来说, 具有简单快捷、易于操作等优点. 尤其是当激光的参数改变或更换透镜后继续做实验时, 声学测量方法由于没有复杂的仪器设备需要调节, 更显示出了它的优越性. 如果将获

得的声音信号和通道内的电子密度建立固定的函数关系, 使之程序化, 它就可以更加方便地对等离子体通道进行更直观、更迅速的测量分析. 虽然它对环境的要求要苛刻一点, 但是在实验室环境下, 声学测量方法由于它独特的优点, 不失为一种代替其他测量方法的很好的选择. 声学测量方法必将在长等离子体通道的快速判断及其测量上发挥更大的作用.

4 结论

文章介绍了一种测定等离子体通道的新的方法——声学测量法. 超短脉冲强激光在空气中传输时, 形成长等离子体通道, 并伴随着声音的产生, 通过测量通道不同位置的声音信号, 最终可以得到通道的长度、半径和通道内的电子密度及其随激光传输距离的变化情况. 声学测量法为长等离子体通道的测定提供了一种简单易行、快速又十分有效的方法.

参 考 文 献

[1] Fontaine B La *et al.* Phys. Plasmas, 1999, 6 :1615
 [2] Yang H, Zhang J *et al.* Phys. Rev. E, 2002, 66 :016406
 [3] Talebpour S *et al.* Opt. Commun., 2000, 181 :123
 [4] Talebpour A *et al.* Opt. Commun., 1999, 171 :285
 [5] Schillinger H, Sauerbrey R. Appl. Phys. B, 1999, 68 :753
 [6] Tzortzakis S *et al.* Phys. Rev. E, 1999, 60 :R3505
 [7] Ladouceur H D *et al.* Opt. Commun., 2001, 189 :107
 [8] Talebpour A *et al.* Opt. Commun., 1999, 163 :29
 [9] Yu J *et al.* Appl. Opt. 2003, 42 :7117
 [10] Vogel A *et al.* Appl. Phys. B, 1999, 68 :271
 [11] Proulx A *et al.* Opt. Commun., 2000, 174 :305



· 物理新闻和动态 ·

星系团打破距离记录

天文学家发现了一个距地球约 13 万 2 千亿光年的星系团. 这是迄今为止所观察到的最遥远的星系团. 由这个叫做 Abell 1835 IR1916 的星系团发出的光线, 提供了有关宇宙在只有现今年龄的 3% 时的信息. 这种光线是在大爆炸后约 4.7 亿年时发出的, 因而能够告诉我们更多的关于早期宇宙的“黑暗时代”之后第一批星系团是如何形成的(Pello R *et al.* Astronomy & Astrophysics, 2004, to be published). 当早期宇宙中热的氢冷却并形成星系团时, 原子中的电子从激发态落到基态而发出强烈的远紫外辐射. 这种所谓的 Lyman α 发射是星系形成的信号, 其特征波长为 121.6nm. 但是, 这种辐射由于宇宙的膨胀而被红移到较长的波长, 天文学家可以通过测量 Lyman α 谱线的红移来计算星系的年龄.

法国的 Midi - Pyrenees 天文台的 Roser Pello, 瑞士日内瓦天文台的 Daniel Schaerer 等用位于智利的大型望远镜上的仪器 ISAAC 获得了星系团 Abell 1835 的影像. 这个星系团像一个重力透镜, 使天文学家能研究那些用其他方法观测不到的很暗的星系团.

法国 - 瑞士合作组在 Abell 1835 IR1916 的光谱中探测到一条弱的但是清晰的特征谱线. 他们认为这条谱线是红移到光谱的近红外区的波长为 1337nm 的 Lyman α 线, 这相当于红移为 10, 大大高于此前红移为 6.6 的记录.

此外, Pello 和 Schaerer 等还计算出这个星系团正在经历剧烈的恒星形成阶段, 已经产生了相当于约 1 千万倍的太阳系质量的恒星. 他们说, 这些恒星, 可能曾是组成现今大的星系团的“基石”, 为结束早期宇宙的黑暗时代提供了第一个光源.

(树华 编译自 Physics web News, 1 March 2004)