

激光击穿大气等离子体的光谱实验研究^y

林兆祥, 常启海, 程学武, 李发泉, 王嘉岷, 吴礼金, 龚顺生

(中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 对一个大气压的 N_2 , O_2 和纯净空气, 用 YAG 脉冲激光的 1.06 μm 光束产生激光等离子体, 对该等离子体在大约 400—800 nm 谱段的发射光谱进行了实验研究. 实验表明, 空气及其主要组分的激光等离子体光谱均由较强的连续光谱背景和迭加在其上的若干线状光谱组成. 随着光谱采样的延时, 激光等离子体中各光谱组分的强度有很不相同的相对变化. 而且, 处于等离子体不同空间部位发出的光谱, 也有很大的不同. 对此类问题的定量分析正在进行之中.

关键词: 激光; 电离; 大气; 等离子体; 光谱

中图分类号: O539 **文献标识码:** A

1 引言

激光大气电离的研究长期以来一直为人们所关注, 也取得了许多有意义的成果^[1,2]. 但对激光电离以后形成的等离子体性质特别是光谱特性的研究却开展得不多. 本文介绍一种对激光电离大气产生的等离子体进行光谱研究的实验方法, 并给出一些初步的研究结果. 本研究的目的是期望能对激光大气电离的激发和复合机制获得更为清晰的了解.

气体的激光电离机制概括起来有两种, 即多光子电离和电子级联电离(或称雪崩电离). 当然, 在强激光场下, 有时还涉及到场致电离或隧道电离等机制. 而上述两类主要电离机制之间存在着较大差异, 所形成等离子体的特征也很不相同, 从而其复合机制也会很不相同. 简单而言, 多光子电离过程产生于激光脉冲较短和气体压力较低($< 10^2$) 的情形, 而电子级联电离产生于激光脉冲较长和气体压力较高($> 10^2$) 的情况. 通常认为, 当 $p \cdot \tau$ 大于 400 Pa·ns 时, 电离过程以多光子电离为主. 其形成的激光等离子体的温度较高, 弛豫时间较长(可达 10^{-3} s 量级); 而当 $p \cdot \tau$ 小于 400 Pa·ns 时, 电离过程以多光子电离为主, 其形成的激光等离子体温度较低、复合较快、弛豫时间较短(约 10^{-8} — 10^{-7} s 量级)^[3-5].

由于我们使用的是 YAG 激光器, 其脉冲宽度在 1 ns 以上, 电离介质为 1 个大气压的气体, 电离

机制是激光场中的电子级联碰撞所导致的级联电离(雪崩电离). 该过程的初始自由电子往往由多光子电离产生, 主要电离过程的能量来源则为电子在与其它粒子碰撞过程中对激光光子的吸收, 即逆韧致(inverse bremsstrahlung)过程. 当电子级联电离使气体迅速离化后, 就产生大气击穿(breakdown), 很容易产生完全离化(即离子密度达 $10^{19}/cm^3$) 的激光等离子体.

我们对 1 大气压下的纯净空气、氮气及氧气在 Nd: YAG 激光器 1.06 μm 的激光作用下所产生的等离子体的光谱性质进行了实验研究, 得到了一些初步的、有意义的结果.

2 实验装置

激光电离大气及其光谱测量的实验装置见图 1. YAG 激光器产生的一束光线经透镜(F) 进入密闭容器(A) 后, 在 A 中的某点聚焦, 加大激光能量, 使其焦点处的气体被连续击穿, 产生等离子体. 激光电离等离子体产生的光辐射通过收光透镜聚焦于单色仪的入射狭缝. 单色仪的输出光信号由光电倍增管转换成电信号, 该信号经前置放大器放大以后, 由 Boxcar 进行处理, Boxcar 输出信号经过 A/D 转化后由计算机储存. 计算机还控制单色仪的扫描和数据的同步收集. 实验用的密闭容器由玻璃管及两端透光窗片等组件构成, 并与抽气系统、充气系

^y 收稿日期: 2002 - 04 - 25; 修改日期: 2002 - 05 - 31

作者简介: 林兆祥(1971-), 男(汉族), 福建福州人, 博士生, 从事激光等离子体, 原子分子物理研究.

统相连, 可控制容器内的气体种类和压强.

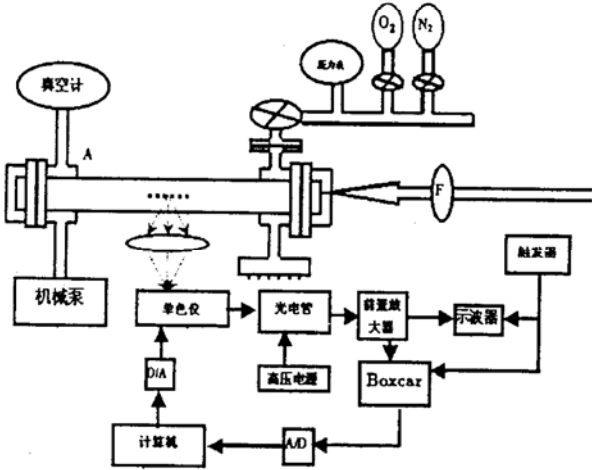


图1 实验装置图

3 初步结果

3.1 光谱的概貌

图2的的是在1大气压下的 N_2 , O_2 , $N_2 + O_2$ 和空气激光等离子体在400—750 nm之间的光谱. 采集这组数据时, 激光脉冲与Boxcar采样门之间的延时约30 ns, 所以基本上可以看成是激光等离子体在形成初始阶段的发射光谱. 由图可见, 此组光谱的主要特征是在连续光谱的本底上迭加着若干线状光谱. 谱图中各种光谱成份的进一步确认尚在进行之中, 但从图2可以看出如下几个特征: N_2 的线状谱较 O_2 更为丰富, 且 O_2 谱和 N_2 谱相比, 其连续光谱在紫端较强, 而线状谱在红端较强. 从图2还

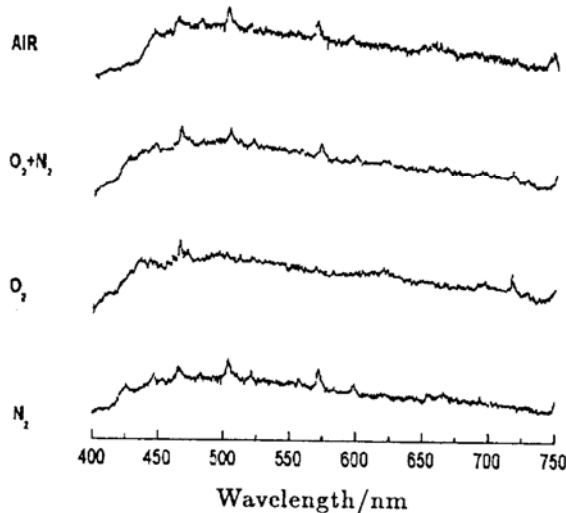


图2 空气、氧气、氮气全谱

可以看出, $N_2 + O_2$ 和空气光谱基本上表现为 O_2 谱和

N_2 谱的迭加, 且更类似于 N_2 谱. 仔细分析还可发现 $N_2 + O_2$ 和空气谱的细微差别, 如空气谱在650 nm段连续谱本底的增强, 可认为空气中其它微量成份或 N_2 和 O_2 相互作用产物的发光表现.

3.2 光谱的时间演化

我们在不同的Boxcar采样门相对于激光脉冲的延时下测量了各种气体成份的激光等离子体的光谱, 发现不同的光谱成份具有相差很大的时间演化(寿命)特征. 我们认为, 通过这类实验研究, 有可能获得对激光等离子体弛豫过程更为明晰的了解. 作为一个例子, 图3给出对空气样品进行这种时间

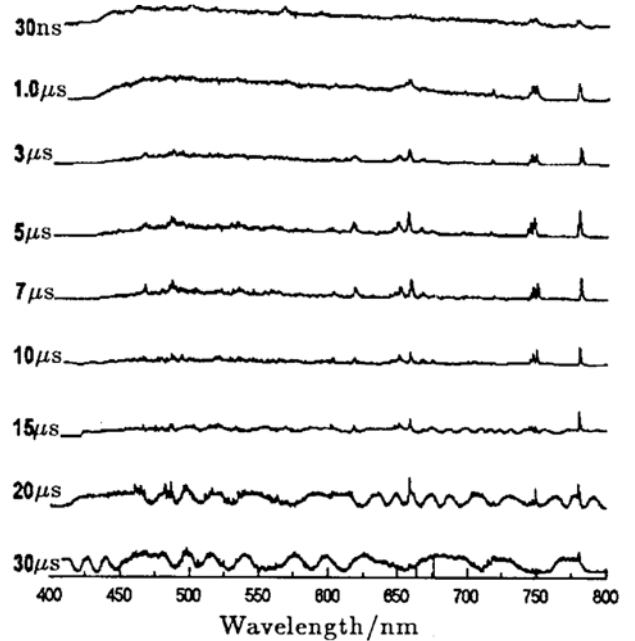


图3 空气全谱的时间演化

演化光谱测量的结果. 由图可见, 随着采样延时的加长, 连续光谱的本底迅速减弱, 对于线状光谱,

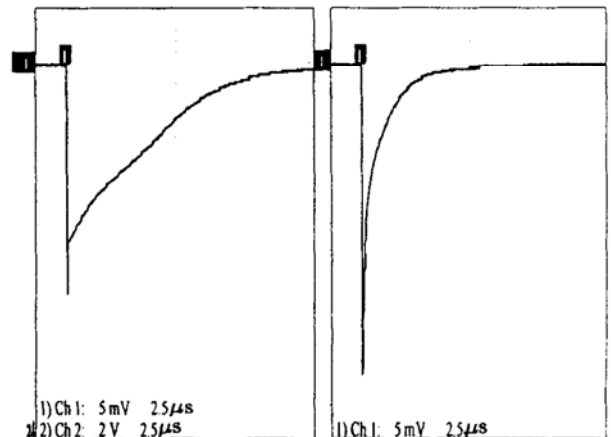


图4 不同波长的等离子体的衰减过程

(a) 长寿命线状谱780 nm, (b) 短寿命连续谱480 nm.

则是紫端的减弱得快，而红端的减弱很慢。在大约 30 μ s 以后，还能检测到几条红端线状光谱的信号。从相应的在某个固定波长下的发光信号的时间演化图(取自快速数字示波器)上也可看出这种长短寿命发光信号的情形，如图 4 所示。图中长寿命信号来自约 780 nm 线状光谱，而短寿命信号来自紫端的连续本底。

3.3 光谱的空间位置变化

我们在实验过程中发现来自激光产生的大气等离子体不同位置的光谱有比较大的变化，表明激光等离子体的结构在空间上是不均匀的。为了仔细研究这种现象我们采用在激光等离子体和单色仪之间加小孔光阑或刀片狭缝的方法，收集来自等离子体不同空间位置的光谱，获得了一些有趣的结果。图 5 所示为一组来自激光大气等离子体不同垂直位置的光谱。由图可见，随着采谱垂直位置的变化，等离子体光谱的明显本底和线状光谱均有连续的变化。更为有趣的是，在垂直方向上向等离子体的上下偏离时，其光谱的改变是非对称的，随着高度的

上移，紫端连续谱和部分线状谱逐渐消失。

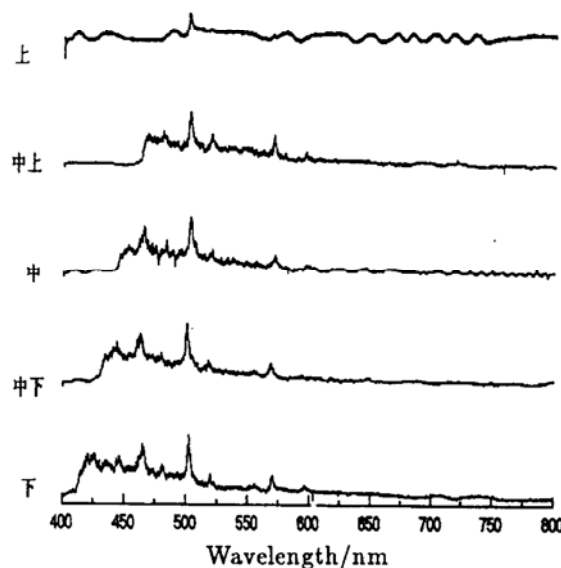


图 5 空气全谱的垂直分布

以上是我们在大气激光等离子体光谱实验研究中所获得的很初步的结果，相应的定量和仔细分析工作正在进行中，部分结果将在会议上报告。

参 考 文 献:

[1] Damon E, Thomlinson R. Observation of Ionization of Gases by a Ruby Laser[J]. Appl opt, 1963, 2: 546.

[2] Yosr E E-D Gamal, M S E-D Shafik, Jamal M Daoud. A Numerical Investigation of the Dependence of the Threshold Irradiance on the Wavelength in Laser-induced Breakdown in N_2 [J]. J Phys D: Appl Phys, 1999, 32: 423.

[3] Grey Morgan C. Laser-induced Breakdown of Gases[J]. Rep Prog Phys, 1975, 38: 621.

[4] Ireland C L M, Grey Morgan C. Gas Breakdown by a Short Laser Pulses[J]. J Phys D: Appl Phys, 1973, 6: 720.

[5] Rosen D I, Weyl G. Laser-induced Breakdown in Nitrogen and the Rare Gases at 0.53 and 0.35 μ m[J]. J Phys D: Appl Phys, 1985, 20: 1 264.

Spectrum study of Air Plasmas by Laser-induced Breakdown

LIN Zhao-xiang, CHANG Qi-hai, CHENG Xue-wu, LI Fa-quan, WANG Jia-min, WU Li-jin, GONG Shun-sheng
(Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Plasmas were produced by laser-induced breakdown in nitrogen, oxygen and air at 1 atm using the 1.06 μ m beam from an YAG laser. The spectra of these plasmas in the range of 400—800 nm were obtained. The preliminary result shows that all the spectra consist of a strong continuous background and some line structures. With delay sampling, the spectra vary remarkably. By sampling at the different position of the plasmas, the spectra change in a special way. The quantitative analysis is in progress.

Key words: laser; ionization; air; plasma; spectra