

纳秒激光诱导空气等离子体的红外辐射特性研究

王兴生, 苑莉薪, 李馨, 王铭, 高勋*, 林景全*

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 纳秒激光诱导空气等离子体存在从紫外、可见、近红外乃至射频微波的宽谱段辐射,但目前的研究大多关注紫外到可见波段的光谱辐射。激光等离子体作为一种新型的红外辐射源具有很多优势,相比于红外干扰弹以及红外干扰手段而言,空气等离子体红外辐射源可以灵活布置,成本低廉,因此研究空气等离子体的红外辐射特性就很有必要。针对目前脉冲激光诱导空气等离子体的红外干扰研究需要,对激光波长为532 nm的纳秒脉冲激光诱导空气等离子体的红外辐射特性进行实验研究,探讨激光能量对空气等离子体红外辐射强度的影响规律,以及空气等离子体红外辐射的角度分布特性,分析了等离子体红外辐射的可能产生机制。实验结果表明,激光诱导空气等离子体在950~1700 nm范围内的红外光谱为线状谱和连续谱的叠加。其中线状谱主要是氮和氧的中性原子谱线,并且氮原子红外辐射占主导。随着激光能量的增加,由于空气击穿产生的氧和氮原子数量增加,导致空气等离子体红外辐射的谱线强度逐渐增大。随着红外探测角度的变化,在探测角度为75°时,O I 1 128.63 nm和N I 1 246.96和1 362.42 nm谱线强度达到最大,在探测角度为120°时,N I 1 011.46和1 053.96 nm谱线强度达到最大,这是因为空气等离子体红外辐射强度随探测角度变化呈现空间非对称性,表明空气等离子体内不同粒子的空间分布呈现非对称性。

关键词 纳秒脉冲激光; 空气等离子体; 红外辐射

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2698-04

引言

1960年第一台激光器诞生不久,激光等离子体相关的研究就已经开始。激光等离子体的辐射波段非常宽,可覆盖从极紫外^[1],紫外^[2],可见光^[3],红外^[4],太赫兹^[5]以及微波波段^[6],激光等离子体作为一种辐射源已经应用于诸多领域。激光等离子体作为X射线源较好地应用于时间分辨诊断测量^[7],空气等离子体产生的太赫兹波在武器制导、安全检查有明显优势^[8],根据超短脉冲聚焦样品而兴起的LIBS(激光诱导击穿光谱)技术已经在冶金分析、环境监测与化学检测与分析上得到应用^[9-11]。这些相关技术作为发展迅猛的重大高新技术已经渗入到国家社会的各个层面,在医疗、工业、军事等领域都取得了重大成果。

高功率的纳秒激光直接聚焦在空气中,与空气中的成分发生相互作用会诱导产生空气等离子体。这一现象早已被人们发现,并且经过多年的探索与研究,人们对激光与大气中的分子、原子的相互作用过程已有初步的了解。空气等离子

体的光辐射具有很宽的范围,涵盖紫外,可见,红外,微波波段。在空气等离子体可见光辐射波段,2004年,李小银等^[12]对空气等离子光谱辐射(300~900 nm)特性进行了实验研究,将波长为1.06 μm的纳秒激光聚焦到空气中产生等离子体,研究了其辐射特性。实验结果表明空气等离子体光谱为线状谱和连续谱的叠加,并且初步讨论了空气激光等离子体的空间和时间特征与等离子体物理特性之间的关系。2017年戴宇佳等^[13]研究了激光诱导空气等离子体的射频辐射特性,实验发现空气等离子体在30~800 MHz频率范围内有较强的射频电磁辐射产生。而在空气等离子体的红外辐射波段,还未有相关文献报道。由于激光空气等离子体具有宽波段、强辐射特性,国内已经有相关单位初步研究空气等离子体的可见光辐射对光电探测器的干扰。目前国内外针对空气等离子体红外辐射波段的研究较少,另外激光等离子体作为一种新型的红外辐射源具有很多优势,相比于红外弹以及红外干扰手段而言,空气等离子体红外辐射源可以灵活布置,成本低廉,因此研究空气等离子体的红外辐射特性很有必要。但是激光诱导空气等离子体红外辐射产生的具体机制尚

收稿日期: 2018-05-22, 修订日期: 2018-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575030), 吉林省自然科学基金项目(20180101283JC), 吉林省教育厅项目(JJKH20190539KJ)资助

作者简介: 王兴生, 1989年生, 长春理工大学理学院博士研究生 e-mail: xingsheng-w@126.com

* 通讯联系人 email: lasercust@163.com; linjingquan@cust.edu.cn

不明确,有待进一步研究。分子、原子内的电子跃迁,分子的转动及振动,热辐射等均会产生红外辐射,具体哪种原因是空气等离子体辐射红外信号的原因有必要进行深入研究。本文主要研究纳秒激光诱导空气等离子体的红外辐射特性,分析红外辐射强度、波长与激光能量以及探测角度的关系,并且通过已有数据库及相关资料对红外谱线进行初步的辨认。

1 实验部分

纳秒激光脉冲诱导击穿空气等离子体红外辐射特性测量实验装置图如图 1 所示。

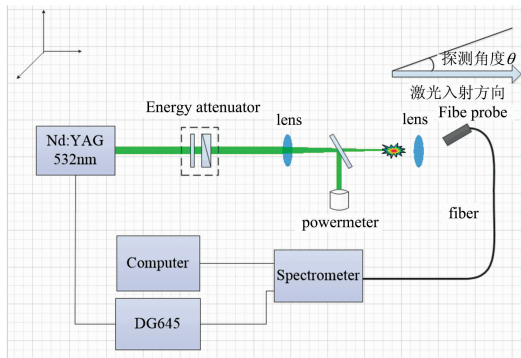


图 1 等离子体辐射实验原理图

Fig. 1 Schematic of the plasma emission experimental system

空气等离子体激发光源为一台输出波长为 532 nm, 重复频率为 10 Hz, 脉宽 8 ns 的 Nd : YAG 固体激光器 (Continuumllite II, 美国), 激光光束直径为 10 mm, 偏振方向为垂直偏振, 单脉冲能量最大约为 250 mJ。采用激光光束经二分之一波片和格兰棱镜组成的能量调节系统改变激光能量, 经焦距为 200 mm 的石英透镜聚焦诱导击穿空气产生等离子体。实验中利用能量计实时在线监测诱导击穿空气等离子体的激光脉冲能量。空气等离子体的红外辐射信号由焦距为 75 mm 的石英透镜收集, 聚焦至光纤探头并由配有红外 CCD 电荷耦合探测器的近红外光谱仪 (Flame-NIR) 同步采集数据, 实验过程中, CCD 曝光时间 100 ms, 为了避免激光能量的不稳定对实验数据的影响, 光谱数据 10 次平均后导入计算机进行处理。光谱仪的探测波长范围 950~1 650 nm, 光学分辨率为 10 nm。石英透镜和光纤探头固定在可旋转的平台上 (以激光光束经透镜聚焦的几何中心为原点旋转), 通过旋转光谱收集方向与激光入射方向的角度, 可以测量空气等离子体不同角度的红外辐射光谱。利用数字延时触发器 (Stanford, DG645) 同步触发光谱仪和激光器工作。实验在标准大气压 1 atm、室温 23 ℃、相对湿度为 40% 环境中进行。

2 结果与讨论

图 2 为激光能量为 100 mJ, 探测角度为 45° 时, 激光诱导空气等离子体的红外辐射光谱图。由图 2 可知, 空气等离

子体的红外辐射光谱由连续光谱以及叠加在连续谱上的线状谱组成, 其中线状谱为 O I 1 128.63 nm 和 N I 1 011.46 nm, N I 1 053.95 nm, N I 1 246.96 nm, 1 362.42 nm 及 N I 1 558.22 nm, 主要是氧和氮的中性原子谱线, 并且氮原子红外辐射占主导, 没有观察到 O₂ 和 N₂ 的分子光谱。随着波长的增加, 空气等离子体辐射的红外光谱强度逐渐减弱。

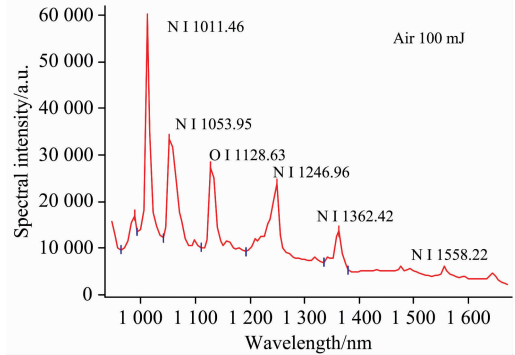
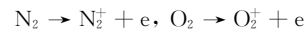


图 2 激光能量 100 mJ、探测角度为 45° 时激光诱导空气等离子体红外辐射光谱

Fig. 2 Infrared radiation spectrum of air plasma, Laser energy of 100 mJ, and the detection angle of 45 degree

根据美国 NIST 数据库对 950~1 650 nm 范围内的空气等离子体红外辐射线状谱线进行初步分析如表 1 所示。根据表 1, 空气等离子体红外辐射在 950~1 650 nm 范围内主要来源于氮和氧的中性原子的电子跃迁, 并且中性氮原子跃迁辐射占主导地位。空气的主要成分为 N₂ 和 O₂, 在强纳秒激光光场诱导击穿作用下, 空气分子首先发生电离, 即发生如下反应



在高功率密度激光光场作用下, 分子离子的化学键可进一步软化解离

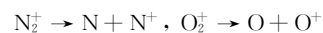


表 1 空气等离子体红外辐射光谱

Table 1 Infrared radiation spectrum of air plasma

粒子种类	谱线位置 /nm	跃迁形式
NI	1 011.461 5	2s ² 2p ² (³ P)3p ⁴ D ^{7/2} ←2s ² 2p ² (³ P)3d ⁴ F 9/2
NI	1 053.957 5	2s ² 2p ² (³ P)3p ⁴ P ^{5/2} ←2s ² 2p ² (³ P)3d ⁴ D 7/2
OI	1 128.631 7	2s ² 2p ³ (⁴ S ^o)3p ³ P 1←2s ² 2p ³ (⁴ S ^o)3d 3D ²
NI	1 246.961 5	2s ² 2p ² (³ P)3p ² D ^{5/2} ←2s ² 2p ² (³ P)3d ² F 7/2
NI	1 362.418	2s ² 2p ² (³ P)3p ² P ^{3/2} ←2s ² 2p ² (³ P)3d ² D 5/2
NI	1 558.228 7	2s ² 2p ¹ (³ P)3p 2P ^{3/2} ←2s ² 2p ² (³ P)4s ² P 3/2

空气中 O₂ 和 N₂ 分子以及 O 和 N 原子的电离势分别为 12.1 eV(O₂), 15.6 eV(N₂) 以及 13.6 eV(O) 和 14.5 eV(N), 而 O⁺ 和 N⁺ 的一价离子的电离势分别为 35.1 eV(O⁺) 和 29.6 eV(N⁺)。相比于 O₂ 和 N₂ 分子以及 O 和 N 原子而言, O⁺ 和 N⁺ 的一价离子的电离势较高, 因此 O⁺ 和 N⁺ 的一价离子只有很小的概率进一步电离。

由理论分析, O_2 分子和 O 原子的电离势均小于 N_2 分子和 N 原子的电离势, 激光诱导空气等离子体中的中性氧原子应该远远多于中性氮原子, 但是实验结果显示, 空气等离子体的红外辐射主要来源于中性氮原子的电子跃迁, 导致这一现象的原因尚不清楚, 有待于进一步的研究。

图 3 是固定探测角度为 45° , 不同激光脉冲能量诱导击穿空气等离子体的红外辐射光谱。从图 3 可以看出, 随着激光能量的增加, 空气等离子体红外辐射的线状光谱谱线强度不断增加, 同时连续光谱强度也在增加。这是因为随着激光能量的增加, 诱导击穿空气电离的氮气和氧气分子数目增加, 产生的中性氮原子和氧原子数目也随着增加, 因此单位时间跃迁产生的红外辐射光谱强度逐渐增大。而当脉冲能量小于 40 mJ 时, 空气等离子体的红外辐射信号较弱, 探测器只能探测到等离子体散射的激光基频光信号, 即 1 064 nm 的红外信号。

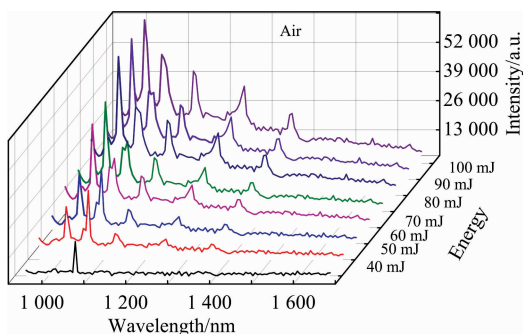


图 3 探测角度为 45° 时不同激光能量的红外辐射光谱
Fig. 3 Infrared radiation spectrum under different laser energy at the detection angle of 45 degree

实验设定光纤探头探测方向与激光入射方向之间的夹角为探测角度。由于实验平台距离有限和光纤探头尺寸的限制, 空气等离子体的探测角度只能测到 $30^\circ \sim 120^\circ$ 。图 4 为固定激光脉冲能量为 60 mJ, 改变探测角度得到的空气等离子体红外辐射光谱数据。从图 4 可以看出, 空气等离子体红外

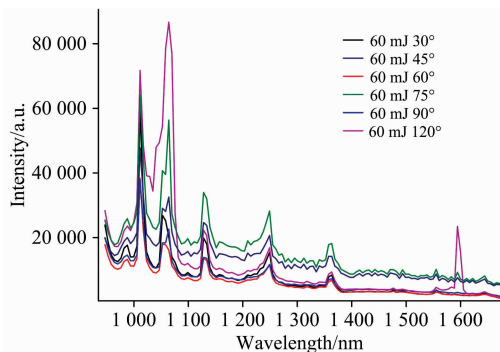


图 4 60 mJ 时空气等离子体红外辐射强度随探测角度的变化
Fig. 4 Infrared radiation intensity of air plasma varies with the detection angle with Laser energy of 60 mJ

辐射中的 O I 和 N I 光谱强度随着探测角度的变化不同。在探测角度为 75° 时, O I 1 128.63 nm 和 N I 1 246.96 nm, N I 1 362.42 nm 这三条光谱的谱线强度达到最大。而在探测角度为 120° 时, N I 1 011.46 nm 和 N I 1 053.96 nm 这两条光谱的谱线强度达到最大。

图 5 为空气等离子体红外辐射光谱强度与探测角度的变化曲线。从图 5 可以看出, 空气等离子体红外辐射的空间分布并不是各向同性。可能原因有以下几个方面: 第一, 由于激光脉冲具有一定宽度, 其在经过透镜汇聚时, 脉冲前沿对应的焦点位置与脉冲后沿的焦点位置并不重合, 从而沿激光传输方向上存在很多热点, 由于瑞利-泰勒不稳定性, 会导致空气等离子体出现翻滚现象, 从而导致空气等离子体红外辐射光谱强度的空间分布具有各向异性; 第二, 由于激光脉冲是高斯分布, 经过透镜汇聚时, 在空间上存在光束中间强, 周围弱的现象, 这将加剧等离子体红外辐射光谱强度的空间分布不均匀性; 第三, 激光光束传输过程中, 其强度分布在传输方向和径向方向的分布也不均匀, 很大程度上导致了空气等离子体的形状不对称分布。

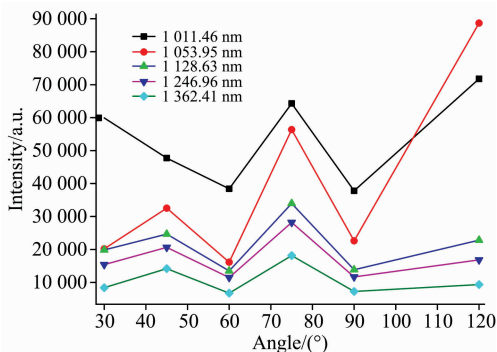


图 5 红外辐射光谱强度与探测角度之间的关系
Fig. 5 The relationship between the infrared spectral intensity and the detection angle with Laser energy of 60 mJ

3 结 论

对波长为 532 nm 的纳秒激光诱导击穿空气等离子体的红外辐射光谱特性进行了研究, 获得了激光能量对空气等离子体红外辐射的影响规律以及等离子体红外辐射的角度分布特性。实验发现激光诱导击穿空气等离子体红外辐射光谱为线状谱与连续谱的叠加, 其中线状谱为 O I 1 128.63 nm 和 N I 1 011.46 nm, N I 1 053.95 nm, N I 1 246.96 nm, 1 362.42 nm 及 N I 1 558.22 nm, 主要是氮和氧的中性原子谱线, 并且氮原子红外辐射占主导。随着激光脉冲能量的增加, 诱导击穿空气电离的氮气和氧气分子数目增加, 空气等离子体红外辐射光谱强度呈线性增加。随着探测角度的变化, 探测得到的红外辐射信号强度出现较大变化, 表明空气等离子体的红外辐射的空间分布并非各向同性。

References

- [1] DOU Yin-ping, SUN Chang-kai, LIN Jing-quan(窦银萍, 孙长凯, 林景全). Chinese Optics(中国光学), 2013, 6(1): 20.
- [2] WU Li-zhi, SHEN Rui-qi, XU Jiao, et al(吴立志, 沈瑞琪, 徐 姣, 等). Journal of Atomic and Molecular Physics(原子与分子物理学报), 2010, 27(1): 117.
- [3] Ball A J, Hohreiter V, Hahn D W. Applied Spectroscopy, 2005, 59(3): 348.
- [4] Abdulmajid S N, Suliyanti M M, Kurniawan K H, et al. Applied Physics B, 2006, 82(1): 161.
- [5] LI Na, BAI Ya, LIU Peng(李 娜, 白 亚, 刘 鹏). Acta Physica Sinica(物理学报), 2016, 65(11): 58.
- [6] Chen Z Y, Li J F Li J, et al. Physica Scripta, 2011, 83(5): 055503.
- [7] DONG Quan-li, ZHANG Jie, WANG Shou-jun, et al(董全力, 张 杰, 王首钧, 等). Physics(物理), 2007, (8): 609.
- [8] ZHANG Li-wen, SONG Xiao, YIN Nan, et al(张立文, 宋 潇, 殷 南, 等). Laser Journal(激光杂志), 2012, 33(1): 11.
- [9] CHEN Jin-zhong, WANG Jing, SONG Guang-ju, et al(陈金忠, 王 敬, 宋广聚, 等). Chinese Science Bulletin(科学通报), 2016, 61(10): 1086.
- [10] GU Yan-hong, ZHAO Nan-jing, MA Ming-jun, et al(谷艳红, 赵南京, 马明俊, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(3): 982.
- [11] Cheng Xiao, Yang Xinyan, Zhu Zhihao, et al. Applied Optics, 2017, 56(33): 9114.
- [12] LI Xiao-yin, LIN Zhao-xiang, LIU Yu-yan, et al(李小银, 林兆祥, 刘煜炎, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2004, 24(8): 1051.
- [13] DAI Yu-jia, SONG Xiao-wei, GAO Xun, et al(戴宇佳, 宋晓伟, 高 勋, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2017, 66(18): 161.

The IR Radiation Characteristics of Nanosecond Pulsed Laser Induced Air Plasma

WANG Xing-sheng, YUAN Li-xin, LI Xin, WANG Ming, GAO Xun*, LIN Jing-quan*

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

Abstract Nanosecond laser-induced air plasma has a wide spectrum of radiation from ultraviolet, visible, near-infrared, and even radio frequency microwaves, but most people are currently concerned about spectral radiation from the ultraviolet to visible wavelength range. Laser plasma has many advantages as a new type of infrared radiation source. Compared with infrared bombs and infrared interference means, air plasma infrared radiation sources can be flexibly arranged and have low cost. Therefore, the study of the infrared radiation characteristics of air plasma is necessary. In view of the current research on the infrared interference of pulsed laser-induced air plasma, the infrared radiation characteristics of nanosecond pulsed laser-induced air plasma with a laser wavelength of 532 nm are experimentally studied. The influences of laser energy on the infrared radiation intensity of the air plasma are discussed, the angle distribution characteristics of the infrared radiation are presented, the possible mechanisms of plasma infrared radiation are analyzed. The experimental results show that the infrared spectrum of the laser-induced air plasma in the range of 950~1 700 nm is a superposition of the line spectrum and the continuous spectrum. The main spectrum is the neutral atomic lines of nitrogen and oxygen, and the infrared radiation of nitrogen atom dominates at the whole radiation. As the laser pulse energy increases, which induces the amount of oxygen and nitrogen atoms increasing produced by the air breakdown, the intensity of the infrared spectrum of the air plasma gradually increases. With the change of infrared radiation detection angle, the spectral intensity of O I 1 128.63 nm and N I 1 246.96 nm and 1 362.42 nm reaches the maximum at the detection angle of 75 degrees. When the detection angle is 120 degrees, the spectral intensity of N I 1 011.46 nm and 1 053.96 nm reaches peak. The biggest reason is that the intensity of infrared radiation in the air plasma shows a spatial asymmetry with the change of the detection angle, indicating that the spatial distribution of different particles in the air plasma is asymmetric.

Keywords Nanosecond pulsed laser; Air plasma; Infrared radiation

(Received May 22, 2018; accepted Oct. 9, 2018)