

·激光技术·

1.06 μm 激光等离子体散射特性研究

王鹏冲¹, 张瑞亮¹, 赵万利², 闫秀生²

(1. 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110159; 2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 利用波长为 1.06 μm 、单脉冲能量约为 500 mJ 的脉冲 Nd:YAG 激光经焦距为 300 mm 的正透镜聚焦, 使焦点处激光能量密度剧增而引起大气分子中的原子电离, 在发生同波长激光散射和多光谱电磁辐射现象的同时, 开展空间分辨光谱的探测, 获得 1.06 μm 脉冲激光经大气等离子体散射的空间分布情况。采用 HR4000 光谱仪对散射情况进行测量分析, 通过计算机模拟计算得到等离子体对 1.06 μm 激光散射的方向图, 基于 Mie 理论解释了入射波长为 1.06 μm 脉冲激光散射角与散射强度之间的关系。

关键词: Mie 散射; 等离子体散射特性; 光谱空间分布图样; 散射方向图

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)04-0026-04

Research on Scattering Property of 1.06 μm Laser Plasma

WANG Peng-chong¹, ZHANG Rui-liang¹, ZHAO Wan-li², YAN Xiu-sheng²

(1. Shen yang University of Science and Technology, Shenyang 110159, China;

2. Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

Abstract: The pulse Nd:YAG laser whose wavelength is 1.06 μm and the single pulse energy is about 500 mJ is focused by a lens with 300 mm focal length. So the laser energy density leaps at the focus and it leads to atom ionization phenomena. At the phenomenon of laser scattering with the same wavelength and multi-spectral electromagnetic radiation, the distributions of spacial spectrums are detected. And the spacial distribution states of pulse laser with 1.06 μm scattered by plasma in the atmosphere are obtained. The scattering states are measured and analyzed by HR4000 spectrometer. According to the simulation calculation of a computer, the directional pictures of the laser with 1.06 μm wavelength from plasmas scattering are obtained. Based on Mie theory, the relationship between the scattering angle and scattering intensity of the pulse laser with 1.06 μm incident wavelength is explained.

Key words: Mie scattering; plasma scattering character; the spacial distribution of spectrum; scattering directional diagram

根据经典 Mie 散射理论, 1.06 μm 脉冲激光在大气中传输时, 其分子吸收和分子散射效果可以忽略, 气溶胶的吸收效果也比较小, 只需考虑气溶胶的散射效果^[1]。当激光能量密度足够强时将引发大气电离产生等离子体, 等离子体反过来对激光又有散射作用。

1 实验装置与测量方法

实验系统由 Nd:YAG 脉冲激光器、正透镜、带有刻

度的转动圆盘、HR4000 光谱仪、计算机等组成, 如图 1 所示。测试环境为实验室内大气环境。Nd:YAG 脉冲激光器输出波长为 1.06 μm , 单脉冲激光能量约为 500 mJ, 脉冲宽度约 10 ns, 峰值功率 5×10^7 W, 透镜焦距为 300 mm。激光束经聚焦后光斑大小约为 3 mm, 激光功率密度达到 10^{11} W/cm², 略高于击穿阈值^[2], 使焦点处引发大气电离, 产生明亮的火花, 如图 2。将转动圆盘固定于火花正下方, 使火花与转动圆盘的中心垂直。将光谱仪探头固定于转动圆盘的支架

上,使探头与火花的距离保持恒定(约 3 cm),并与火花处于同一水平面上。测量间隔为 10°,测量一周。

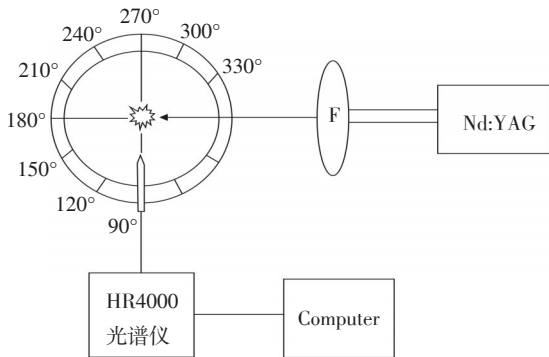


图1 等离子体散射系统示意图



图2 等离子体实物图

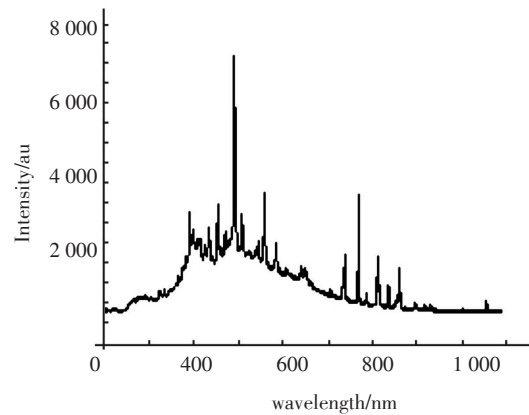
2 理论解释与结果分析

2.1 光谱特征及分析

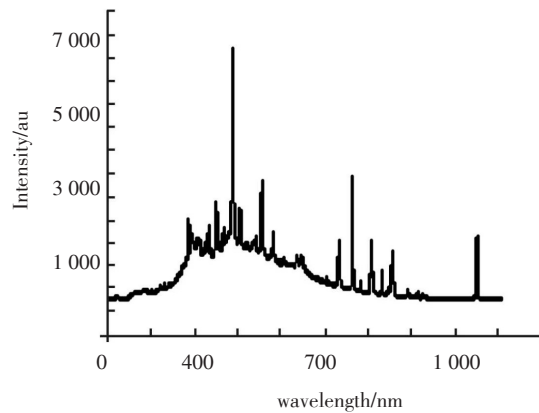
在实验室环境下,对 1.06 μm 脉冲激光大气等离子体散射情况进行分析研究。1.06 μm 脉冲激光束经过透镜汇聚以后,当聚焦区域的电场强度足够大,激光功率密度超过空气击穿阈值时,进而发生击穿,产生等离子体,激光等离子体表现为一个水滴状的明亮发光体,伴随着哨叫声,激光能量增大,响声也随之增大,并形成爆轰波从聚焦区向四周传播。图 3 为实验室 1 个大气压环境下,光谱仪分别在水平方向 30°、60°、90°、100°、120°、150°时采集的光谱图样。

分析这 6 组空间分辨光谱图样,可以清楚地看出,图 3 中在 500、780 和 1 064 nm 附近谱线强度最为明显。 $3d(3p^0) \rightarrow 3p(3s)$ 和 $3d(3s^0) \rightarrow 3s(3p^0)$ 是 N^+ 在激光诱导下发生电离产生 500 nm 处线状谱的离子跃迁

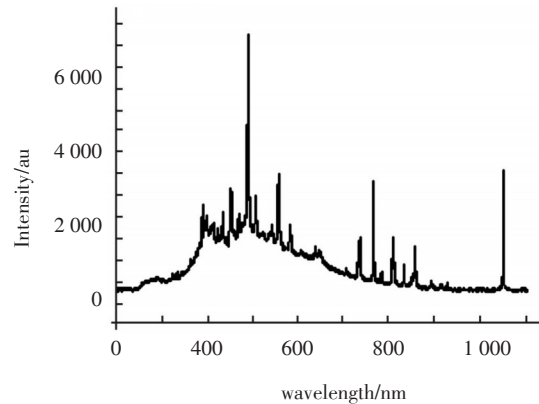
能级, $3p(5p) \rightarrow 3s(5s^0)$ 和 $3d(5F^0) \rightarrow 3s(3D^0)$ 是氧原子在激光诱导下产生 780 nm 处的线状谱的原子跃迁能级^[3]。根据相关数据和实验可知^[4,5],通过合适的激励条件,空气中 N_2 、Ne 和 CO_2 等成分可产生 1.06 μm 谱线,但相比其主要谱线强度较弱。从图 3 的光谱曲线可知,只有在波长为 1.06 μm 附近的谱线呈递增趋势,其他谱线都没有明显变化。所以在实验中测量到波长为 1.06 μm 的谱线主要是激光器本身发出的。



(a) 30°



(b) 60°



(c) 90°

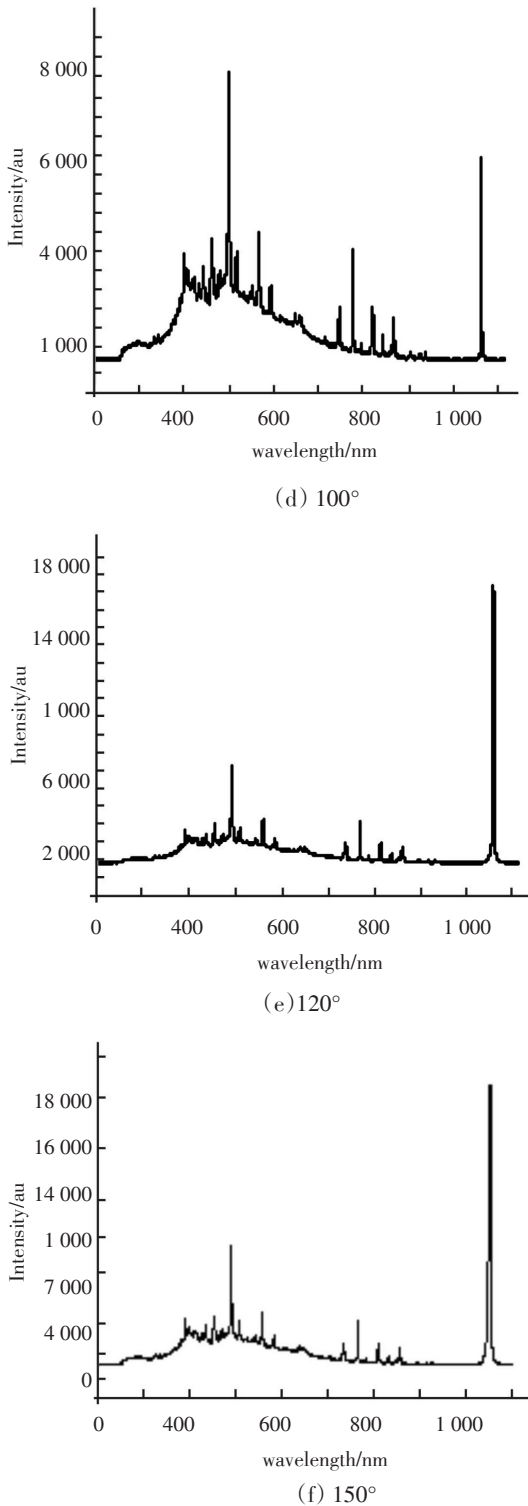


图3 大气击穿等离子体光谱分布图

2.2 Mie 散射理论

1908年,G.Mie给出了均匀球状粒子散射问题的精确解,也就是Mie散射理论。当激光束在低空大气中传播的时候,大气分子对激光束的散射作用是微

弱的,应主要考虑灰尘、气溶胶粒子的散射,大气中的灰尘、气溶胶粒子形态各异,尺度不一,它们主要分布在0.1~10 μm之间,也就是说此时Mie散射起主要作用。通常以尺度数 $x=2\pi r/\lambda$ 作为判别粒子大小的标准, r 为粒子粒径, λ 为入射光波长,当 $x<0.1$ 时是瑞利散射, $x>0.1$ 时是Mie散射, $x>50$ 时是几何光学散射。如图4所示,图4a是一个粒径远小于波长的小粒子的散射方向图,它的散射光在前后方向基本对称,具有瑞利散射特性。图4b是一个粒径稍大的粒子($x=2.0$)的散射方向图,前向散射超过了后向散射,对于更大的粒子如图4c, $x>8.0$,散射光主要集中在前向,甚至在某些地方还呈现极值点,图4b和图4c都属于Mie散射^[6]。

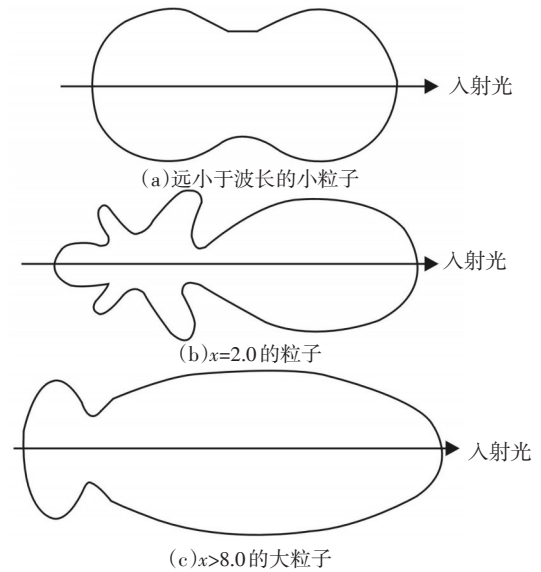


图4 不同尺度粒子的散射方向图

由Mie散射理论,当入射光为非偏振光,可以得到气溶胶粒子的散射光强和衰减因素^[7-10]

$$I_{sca} = \lambda^2 I_0 (|s_1(\theta)|^2 + |s_2(\theta)|^2) / 2k^2 L^2 \quad (1)$$

$$Q_{ext} = 2 / x^2 \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (2)$$

式(1)中, L 为观测点到散射粒子球心的距离; λ 为入射光光波长; θ 为散射角。辅值函数 $s_1(\theta)$ 、 $s_2(\theta)$,Mie系数 a_n 、 b_n ,散射角函数 $\pi_n(\cos \theta)$ 、 $\tau_n(\cos \theta)$ 分别为

$$s_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)) \quad (3)$$

$$s_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)) \quad (4)$$

$$a_n = \frac{\Psi_n(x)\Psi_n'(mx) - m\Psi_n'(x)\Psi_n(mx)}{\xi_n(x)\Psi_n'(mx) - m\xi_n'(x)\Psi_n(mx)} \quad (5)$$

$$b_n = \frac{m\Psi_n(x)\Psi_n'(mx) - \Psi_n'(x)\Psi_n(mx)}{m\xi_n(x)\Psi_n'(mx) - \xi_n'(x)\Psi_n(mx)} \quad (6)$$

$$\pi_n(\cos \theta) = P_1^{(1)}(\cos \theta) / \sin \theta \quad (7)$$

$$\tau_n(\cos \theta) = \frac{d}{d\theta} P_1^{(1)}(\cos \theta) \quad (8)$$

式中, $\Psi_n(x)$ 、 $\xi_n(x)$ 为 Riccati-Bessel 函数; m 为球与介质之间的相对折射率; $P_1^{(1)}$ 为一阶缔合勒让德函数。

利用式(1)~式(8), 选取有关参数, 编写相应的程序进行计算机模拟, 改变入射波长, 模拟出散射角与散射强度的关系, 如图5所示, 从中可以看出, 随着入射波长的增大, 同一散射角的散射强度也在相应增大, 入射波长较小时, 散射强度集中在较小的散射角范围内。

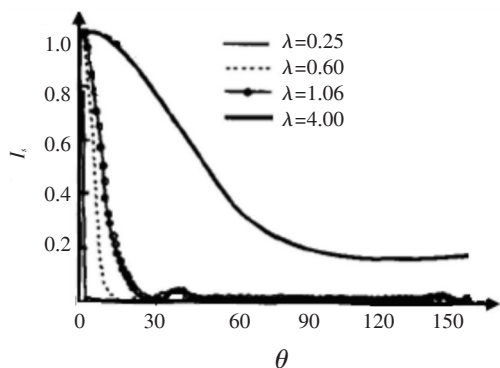


图5 散射强度与散射角的关系 ($m=1.33, r=1 \mu\text{m}$)

2.3 散射方向图

通过实验数据, 仿真计算给出了波长为 1.06 μm 脉冲激光散射角与散射强度的方向图, 如图6所示。

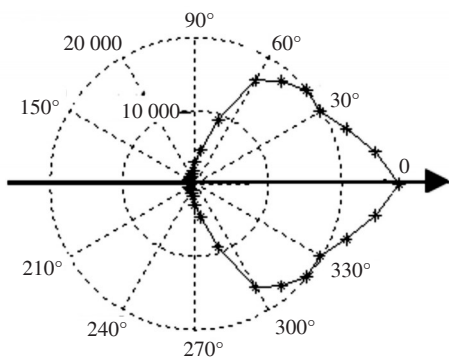


图6 1.06 μm 脉冲激光散射方向图

根据激光散射特性, 在实验室环境下, 本实验取 $x=5$, 得出前向散射强度为 10^4 , 后向散射强度 10^2 , 相差 2 个数量级。散射光强在与入射光垂直的平面内呈对称分布, 随着散射角度的增加趋于平缓, 并且分布在较小的散射角范围之内。只有散射光分布集中, 才能保证在实验中采集到的信号强烈, 结果更精确, 使用波长较小的光时, 本实验中使用 1.06 μm 的激光作为入射光, 故采集信号时相对较弱。由于实时环境和激光器输出功率不稳定产生的等离子体位置前后稍有移动, 使光谱仪探头在同一角度测量时, 测量角度存在误差导致测量结果与理论稍有偏差。

3 结 论

通过实验测量并分析了 1.06 μm 脉冲激光等离子体散射特性, 基于 Mie 理论, 根据实验得出了 1.06 μm 脉冲激光散射角与散射强度的关系。分析表明, 在小于 60° 角范围内散射光较强, 随着角度的增大, 散射能量趋于平缓稳定, 前向散射能量比后向散射能量大 2 个数量级, 这与理论解释基本一致。

参考文献

- [1] SASANO Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba[J]. Applied Optics, 1996, 35(24): 4941-4952.
- [3] 吴金泉, 林兆祥, 宋述燕, 等. 激光大气等离子体的空间分布特征[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(5): 759-762.
- [4] 李小银, 林兆祥, 刘煜炎, 等. 激光大气等离子体光谱特性实验研究[J]. 光学学报, 2004, 24(8), 1051-1056.
- [5] SUTTON D G. New laser oscillations in the N atom quartet manifold[J]. IEEE Quant Electron, 1976, 12: 315-316.
- [6] R 贝克. 气体和蒸汽激光光谱线表[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [7] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [8] M 波恩, E 沃尔夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [9] 刘建斌, 吴建. 大气中球形粒子的散射特性研究[J]. 应用光学, 2005, 26(2): 31-33.
- [10] 李亦军. 单分散系微粒的 Mie 散射计算[J]. 应用光学, 2005, 26(1): 9-11.
- [11] GRASSO V, NERI F, FUCILE E. Simple angle-resolved light scattering photometer using a photodiode array[J]. SPIE, 1995, 2506: 763-772.