

闪电等离子体连续辐射谱特征分析

董向成¹, 陈建宏^{2*}, 刘广桥¹

1. 兰州城市学院培黎石油工程学院, 甘肃 兰州 730070

2. 兰州城市学院电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 闪电等离子体光谱特征是在强连续辐射背景上叠加丰富的N II, N I, O I, H I线状谱, 闪电回击通道温度可达万开以上, 通道内氮分子和氧分子接近完全离解, 分析连续谱时, 不考虑各组分分子带状谱对连续谱的影响。使用摄谱范围在400~1 000 nm的无狭缝光栅摄谱仪记录云对地闪电放电光谱, 在光谱可见区低频段观测到大量一价氮离子谱线, 未观测到明显的其他离子谱, 认为连续辐射机制主要由氮离子与自由电子相互作用产生, 包括韧致辐射和复合辐射。等离子体温度在 1×10^4 K以下时韧致辐射连续谱呈现出平谱特征, 辐射强度较弱, 随着等离子体温度升高在紫外段辐射强度增加, 对可见段连续谱轮廓特征没有明显影响。对于复合辐射, 设闪电等离子体符合局域热力学平衡和光学薄条件, 以类氢离子经典辐射理论为基础, 以冈特因子作量子力学修正, 考虑到复合过程中自由电子被离子俘获, 大概率出现在高激发状态, 引入非类氢的复杂离子近似计算方法分析氮离子复合辐射过程, 导出连续谱复合辐射系数与波长的函数关系, 获得特定参数条件下氮等离子体连续辐射谱特征曲线, 与闪电连续谱轮廓观测结果比较, 发现等离子体电子温度与连续辐射谱峰位置密切相关, 认为通过对闪电连续谱轮廓拟合, 能够可靠诊断闪电放电通道表面电子温度。研究认为氮离子实有效核电荷数 Z^* 取值对连续谱特征也有显著影响, Z^* 取值小, 连续谱跃变特征增强; Z^* 取值大, 连续谱展宽特征增强, 从而与实测谱轮廓底部背离增大。通过多次对比发现 Z^* 取为2~4时, 理论曲线与连续谱观测轮廓具有较好的一致性, Z^* 的取值范围由离子种类决定, 引入离子有效核电荷数 Z^* , 能够很好地解释闪电等离子体连续谱在特定波长出现跃变的特征。

关键词 闪电光谱; 连续辐射; 谱轮廓; 电子温度

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)05-1612-05

引言

等离子体光谱学研究是重要的前沿方向, 对空间物理、高压击穿和材料处理等研究有广阔的应用前景, 闪电是自然界常见的大气压气体放电等离子体, 由于闪电过程发生的随机性, 光谱学分析是其最重要的研究方法。闪电通道内部的活性基团主要包括: 自由电子、重离子、激发态粒子、自由基等, 这些活性基团的稳定性及能量传递机制受到电磁场的作用, 并以电磁波的方式将其内部特征表现出来。开放的环境及流动性使闪电等离子体研究涉及物理学、化学反应动力学、流体力学和高压技术等^[1], 研究成果广泛应用于大气电磁场测量、大气污染控制、等离子喷涂、电磁防护、植物育

种等领域。

闪电放电等离子体内粒子种类多、碰撞频繁, 放电过程演化剧烈, 等离子体参数直接测量困难, 光谱法成为间接测量和研究等离子体特性的重要手段。闪电等离子体具有强连续谱上叠加线状谱的特征, 连续谱带有等离子体活动过程中的重要信息, 也对线状谱的精确测量产生影响。目前已开展大量针对线状谱的研究, 受连续谱形成机制复杂性的影响, 针对等离子体连续辐射谱的研究还比较少, 开展相关研究对于了解低温热等离子体的发展、消散及能量输运过程有重要的意义。

云层对地表放电时, 底层大气变化过程更具研究价值, 底层大气主要包括干洁大气、水汽及污染物等组分, 其中干洁空气是大气的主要成分, 为简化分析过程, 闪电过程中对

收稿日期: 2020-04-20, **修订日期:** 2020-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(12064023, 51865025), 甘肃省自然科学基金(20JR5RA209, 18JR3RA218), 甘肃省高等学校科研项目(2020A-125)资助

作者简介: 董向成, 1975年生, 兰州城市学院培黎石油工程学院副教授 e-mail: dongxiangc@tom.com

* 通讯作者 e-mail: chenyuwen1982@163.com

大气电离仅考虑对干洁空气的电离。干洁空气中氮的含量最多,按体积比约占 78.08%,氧气约占 20.95%,惰性气体约占 0.93%。目前闪电光谱中尚未报道惰性气体离子谱线,闪电等离子体生成主要考虑氮和氧的贡献。气体平衡温度约 5 000 K 时,氧分子基本全部离解为原子状态,同时氮分子也大量离解,到 10 000 K 时,氧和氮分子全部离解为原子态^[2],闪电放电回击通道中心温度通常高于 10 000 K,因此不考虑通道内的分子光谱^[3],滤去杂散光后,连续谱由韧致辐射和复合辐射过程确定。

1 理论方法

1.1 韧致辐射对连续谱的影响

等离子体内电子运动速度骤变产生韧致辐射,包括电子受原子核电场作用产生的电子-原子韧致辐射和电子受离子库仑场作用产生的电子-离子韧致辐射,闪电通道形成过程中所产生的雪崩电离使通道中心高度电离,内部原子密度非常低,可不考虑电子-原子韧致辐射对连续谱的影响。闪电回击通道内高温使等离子体处于热平衡态,电子速度具有麦克斯韦分布,各种初速度的电子对 $\lambda+d\lambda$ 范围内的单色辐射波有贡献,对温度为 T_{in} 的热平衡等离子体电子系集体谱辐射系数为^[4-7]

$$J_{ff}(T_{in}, \lambda) = 5.44 \times 10^{-52} \left(\frac{c}{\lambda^2}\right)^2 Z^2 \frac{N_e N_Z}{\sqrt{T_{in}}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k T_{in}}\right) \bar{g}_{ff}(T_{in}, \lambda) \quad (1)$$

式(1)中, N_e 和 N_Z 分别为电子密度和离子密度; Z 为离子电荷数, $\bar{g}_{ff}(T_{in}, \lambda)$ 为平均冈特因子。为方便与复合辐射谱辐射系数对比,将(1)式改写为

$$J_{ff}(T_{in}, \lambda) = C_1 \frac{1}{\lambda^2} \frac{1}{\sqrt{T_{in}}} \exp\left(-\frac{1.44 \times 10^{-2}}{\lambda T_{in}}\right) \quad (2)$$

其中 $C_1 = 5.44 \times 10^{-52} c Z^2 N_e N_Z \bar{g}_{ff}(T_{in}, \lambda)$, C_1 对韧致辐射

谱连续轮廓形状没有影响,谱强度会随着 C_1 的变化而整体升高或降低,影响 C_1 的主要因素为电子密度 N_e 和离子密度 N_Z ,在低温等离子体中,由于电子的平均速率较小,量子力学修正因数平均冈特因子 $g_{ff}(T_{in}, \lambda)$ 和离子电荷数 Z 对 C_1 的影响很小^[8]。

1.2 复合辐射对连续谱的影响

等离子体内自由运动电子被离子俘获产生复合辐射,电子从自由状态变为束缚状态,等离子体温度越高电子平均运动动能越大,产生的连续辐射频率越高。电子被离子俘获后,可能处在高激发状态,向低能级跃迁时产生原子谱称为复合-级联辐射,复合辐射过程对 $\lambda+d\lambda$ 范围内的单色辐射波有贡献,温度为 T_{ex} 的局域热平衡氢等离子体,通道内复合辐射系数为^[4-7]

$$J_{fb}(T_{ex}, \lambda) = 5.44 \times 10^{-52} \frac{c Z^2 N_e N_Z}{\lambda^2} \left(\frac{1}{T_{ex}}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(1 - \frac{hc}{\lambda k T_{ex}}\right) \frac{g_{i,1}}{U_i} g_{fb}(T_{ex}, \lambda) \quad (3)$$

式(3)中, $g_{i,1}$ 为基态离子的统计权重, U_i 为配分函数,处于激发态的氢等离子体有 $g_{i,1} \approx U_i$, $g_{fb}(T_{ex}, \lambda)$ 是复合辐射平均冈特因子。

如图 1 所示,由于闪电等离子体中的阳离子主要成份是 N II,式(3)不完全适用于分析闪电等离子体连续光谱。图 1 (a)和(b)是从两次不同闪电中获取的光谱,看出闪电光谱中存在丰富的原子谱,一部分是通道内电子与原子碰撞产生,另一部分是由复合-级联辐射产生。还可看出,闪电光谱中存在很强的连续谱,由韧致辐射和复合辐射产生。与焊接电弧等离子体相似,闪电放电通道中心处的温度最高^[9],核心电流通道很细,电荷密度较大,沿通道径向产生电场,推动电荷向外运动形成电晕鞘层,温度逐渐降低。由此将闪电通道视为由内向外温度降低的等离子体柱,核心电流通道温度较高,连续辐射以韧致辐射为主,通道外侧鞘层温度较低,连续辐射以复合辐射为主。

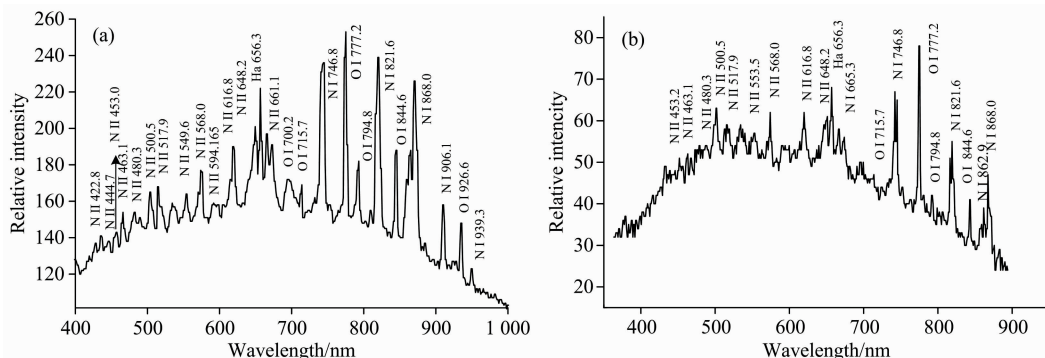


图 1 两次不同闪电回击光谱

Fig. 1 Two different spectrum of lightning return stroke

图 1 中短波段存在大量 N II 谱线,没有明显观测到其他离子谱,可认为连续谱的产生主要受一价氮离子影响,据此需要对式(3)进行修正。由于电子被离子俘获时,大概率落在高激发能量状态,可以近似认为氮离子实和电子构成类氢

系统,电子在复合过程中辐射光子能量为

$$h\nu = \frac{1}{2} m_e V_e^2 + (E_l - E_n) \quad (4)$$

式(4)中, E_l 为氮原子第一电离能,取实验值 14.534 eV, E_n

为氮原子的第 n 激发态能, 最小为 $E_\infty = 0$, 最大为 14.534 eV。由式(4)可知复合过程中辐射的连续谱并不光滑, 在 E_n 处存在跃变峰, 复合到所有第 n 能级的电离能 $(E_l - E_n) \leq h\nu$ 都对连续辐射总发射系数有影响, 第 n 能级电离能 $(E_l - E_n)$ 可近似表示为氢原子电离能

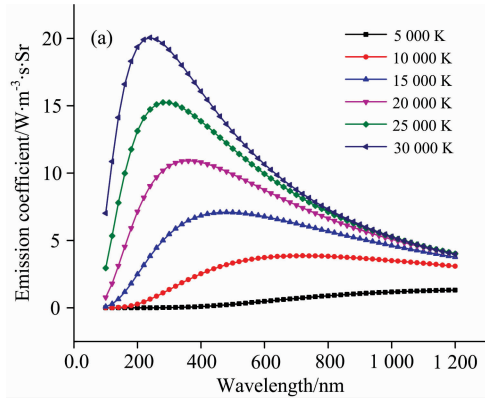
$$h\nu \geq E_l - E_n \approx \frac{(Z^*)^2 R_y}{n^2} \quad (5)$$

其中 R_y 为里德伯能量, Z^* 为氮离子实有效电荷数, 由此 $n(\lambda)$ 的取值为

$$n(\lambda) = Z^* \sqrt{\frac{R_y \lambda}{hc}} \quad (6)$$

对氮离子 Z^* 的取值应介于 2~7 之间, 由此将式(3)修正为

$$J_{fb}(T_{ex}, \lambda) = \frac{C_2}{\lambda^2} \left(\frac{1}{T_{ex}}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{E_{l,n}}{kT_{ex}} - \frac{hc}{\lambda kT_{ex}}\right) \cdot \sum G_n(\lambda) n^{-3} \exp\left(-\frac{E_n}{kT_{ex}}\right) \quad (7)$$



其中 $C_2 = 5.44 \times 10^{-52} c Z^2 N_e N_Z$ 。与韧致辐射相似, C_2 对复合辐射谱连续形状没有影响, $E_{l,n}$ 为电子被俘获到第 n 激发能级时释放的能量, 低温热等离子体 $G_n(\lambda)$ 可取为近似于 1~5 之间的定值^[9-10]。上述参数不会对发射系数关于波长的曲线形状产生影响, 即不对韧致辐射和复合辐射连续谱的谱形状产生影响。

2 连续谱理论曲线与实验谱轮廓比较

2.1 连续谱理论曲线特征

取波长 100~1200 nm, 核心通道温度 T_{in} 取 $0.5 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ K 范围, 等离子体柱表面温度 T_{ex} 取 $6 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^4$ K, $E_{l,n} = 0$, $E_n = 13.6$ eV, $Z^* = 2$, 利用式(2)和式(5)绘制发射系数关于波长的函数曲线, 如图 2(a)为韧致辐射连续谱轮廓, 图 2(b)为复合辐射连续谱轮廓。

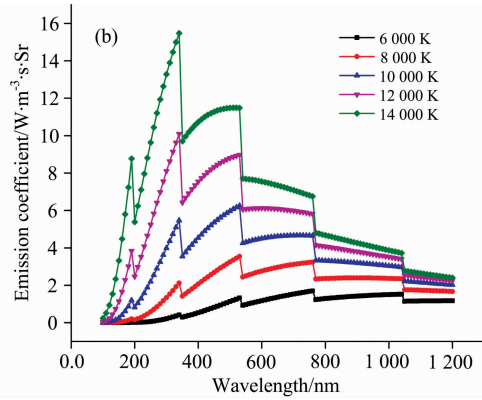


图 2 连续谱轮廓与等离子体温度的关系

Fig. 2 Relationship between continuous spectrum profile and plasma temperature

将闪电等离子体视为光学薄的, 则光谱强度与光谱辐射系数正相关^[11-12], 比较谱辐射系数函数曲线与闪电连续辐射光谱轮廓, 从图 2 中看出, 随着等离子体温度的升高, 韧致辐射和复合辐射峰值都向短波方向移动, 温度降低时韧致辐射和复合辐射谱呈现出平谱特征。提取图 1(a)和(b)连续谱

形成的包络, 与图 2 对比, 发现包络形成的轮廓与复合辐射机制对应的曲线有较高的一致性, 与韧致辐射没有明显的相关, 如图 3 所示, 图 3(a)是 T_{ex} 取 8000 K 时复合辐射连续谱轮廓与图 1(a)连续谱包络的对比线, 图 3(b)是 T_{ex} 取 10000 K 时复合辐射连续谱轮廓与图 1(b)连续谱包络的对比线。

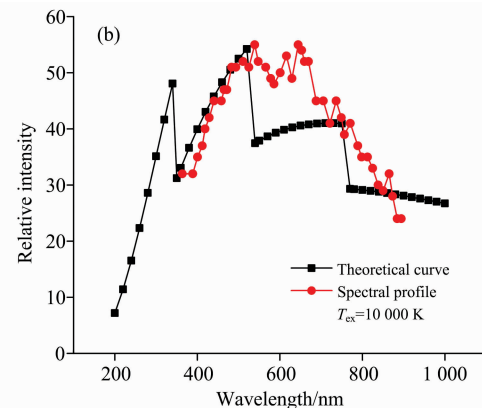
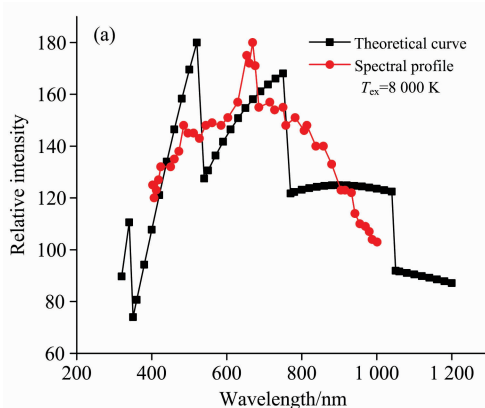


图 3 连续谱轮廓实验值与理论值对比 ($Z^* = 2$)

Fig. 3 Comparison of experimental and theoretical values of continuous spectral profiles ($Z^* = 2$)

由于闪电光谱实验测量波长主要在 300~900 nm 范围内,连续谱轮廓相对平滑,调整复合电子与一价氮离子构成

的类氢系统的有效核电荷数 $Z^* = 4$,对比连续谱轮廓与理论曲线,如图 4 所示。

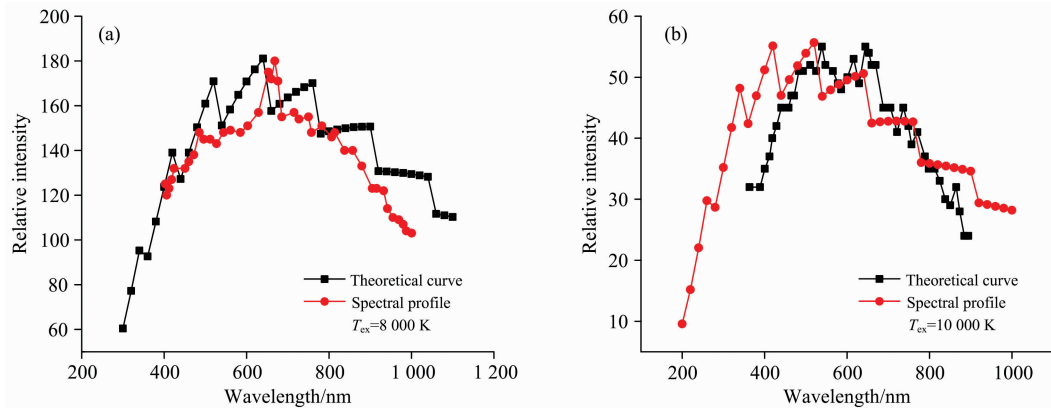


图 4 连续谱轮廓实验值与理论值对比 ($Z^* = 4$)

Fig. 4 Comparison of experimental and theoretical values of continuous spectral profiles ($Z^* = 4$)

看出随着的 Z^* 增大,理论曲线所形成的连续谱线型光滑程度增加,同时也使其平谱特征更加明显,长波侧理论值与实验值背离较为明显。

2.2 理论曲线与实验谱轮廓比较分析

通过连续辐射光谱线型理论曲线与闪电光谱连续谱轮廓的对比,发现在闪电等离子体可见光谱频率范围,韧致辐射对连续谱的贡献较小,只在短波有一定的影响,在中波及长波段对连续光谱形状没有明显影响。建立在经典物理基础上的连续辐射理论量子力学修正,是通过冈特因子 $G_n(\lambda)$ 来实现的,闪电等离子体状态下冈特因子与波长的函数关系尚不明确,将其视为常数会对理论结果带来误差。由理论曲线与实验谱轮廓对比发现,将一价氮离子与复合电子构成的系统视为类氢系统时,氮离子的有效核电荷数 Z^* 取为 2~4 较为合理,随着 Z^* 取值的增加,理论谱型的平谱特征更加明显,与实验值偏离程度增大。温度对谱型的影响最为明显,随着等

离子体电子温度增加,连续谱谱峰向短波方向偏移,其中图 1(b) 谱轮廓与 10 000 K 时理论曲线一致性最好,这与文献 [13] 用连续谱斜率法诊断结果 9 800 K 相近。

3 结 论

以类氢离子经典理论为基础,利用冈特因子进行量子力学修正,考虑到复合过程中自由电子大概率复合到原子高激发态,通过修正离子实有效核电荷数、基态电离能等方式将一价氮离子做类氢离子近似,获得氮等离子体连续谱辐射系数理论公式。比较理论曲线与闪电等离子体连续谱轮廓一致性,发现等离子体温度对连续谱轮廓的影响最为显著,对谱峰关于波长出现的位置起主要作用;其次是氮离子做类氢离子近似后的有效核电荷数,对连续谱跃变峰的出现起主要作用,同时对连续谱的宽度有一定的影响。

References

- [1] LI He-ping, YU Da-ren, SUN Wen-ting, et al(李和平, 于达仁, 孙文廷, 等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2016, 42(12): 3697.
- [2] CHEN Hao, LI Lin-ying, ZHANG Bin, et al(陈浩, 李林颖, 张斌, 等). Acta Aerodynamica Sinica(空气动力学学报), 2018, 36(1): 17.
- [3] ZHONG Lin-lin, WANG Xiao-hua, RONG Ming-zhe(仲林林, 王小华, 荣命哲). Transactions of China Electrotechnical Society(电工技术学报), 2018, 33(23): 5600.
- [4] Cressault Y, Gleizes A. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(41): 415206.
- [5] Iordanova E, de Vries N, Guillemier M, et al. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(1): 015208.
- [6] Park S, Choe W, Youn Moon S, et al. Applied Physics Letters, 2014, 104(8): 084103.
- [7] Kunze H J. Introduction to Plasma Spectroscopy. Heidelberg Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [8] Van Hoof P A M, Ferland G J, Williams R J R, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 449(2): 2112.
- [9] ZHANG Hu, HE Jian-ping, LINGYANG Sheng-lan(张虎, 何建萍, 林杨胜蓝). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(1): 48.
- [10] LIU Yu-feng, DING Yan-jun, PENG Zhi-min, et al(刘玉峰, 丁艳军, 彭志敏, 等). Acta Phys. Sin. (物理学报), 2014, 63(20): 205205.
- [11] Zhang Meng, Yuan Ping, Liu Guorong, et al. Atmospheric Research, 2019, 225(Sep.): 121.
- [12] WANG Fei, LI Huan, YANG Ke, et al(王飞, 李桓, 杨珂, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2018, 38(7): 0726001.

[13] Dong Xiangcheng, Chen Jianhong, Wei Xiufang, et al. Plasma Science and Technology, 2017, 19(12): 125304.

Characteristic Analysis of Continuous Radiation Spectrum of Lightning Plasma

DONG Xiang-cheng¹, CHEN Jian-hong^{2*}, LIU Guang-qiao¹

1. BaiLie School of Petroleum Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China

2. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China

Abstract The spectrum of lightning plasma is characterized as a rich linear spectrum of N II, N I, O I and H I superimposed on strong continuous radiation background, of which the temperature of the lightning return channel can be higher than 10 000 Kelvin and in the channel nitrogen and oxygen molecules are nearly completely dissociated. When the continuum spectrum is analyzed, the influence of each component's molecular band spectrum on the continuum spectrum is not taken into account. The cloud-to-ground lightning discharge spectrum was recorded by a slit-free grating spectrograph with a spectral range of 400 ~ 1 000 nm, and a large number of univalent nitrogen ion spectra were observed in the low-frequency range of visible region of the spectrum, and no other evident ion spectra were observed. It is believed that the continuous radiation is mainly produced by the interaction between nitrogen ions and free electrons, including bremsstrahlung radiation and recombination radiation. In terms of bremsstrahlung radiation, when the plasma temperature is below 1×10^4 K, the continuous spectrum is characterized as a flat spectrum, the radiation intensity is weak, and the intensity increases in the ultraviolet section with the increase of the plasma temperature, which has no significant effect on the profile feature of a continuous spectrum of lightning plasma invisible sections. In terms of recombination radiation, assuming that the lightning plasma features the local thermodynamic equilibrium and is optically thin, and based on the classical radiation theory of hydrogen-like ions, the Gaunt Factor is introduced for quantum mechanical modification. Besides, considering that the continuous spectrum may occur in a highly excited state with large probability as ions bind free electrons during recombination, the approximate calculation method for non-hydrogen-like complexions is employed to analyze the recombination radiation of nitrogen ions, and then the functional relation between the recombination radiation coefficient and the wavelength of the continuous spectrum is derived to obtain the characteristic curve of continuous radiation spectrum of nitrogen plasma under specific parameter and to compare with profile observations of continuous lightning spectrum. Thus, it is found that the plasma electron temperature is closely related to the position of continuous radiation spectrum peak, therefore concluding that the surface electron temperature of lightning discharge channel can be reliably diagnosed by the profile fitting of the continuous lightning spectrum. Furthermore, the Z^* value of the real effective nuclear charge number of nitrogen ions also has a significant effect on the continuous spectrum characteristic. In other words, if the Z^* value is small, the jumping feature of the continuous spectrum will be enhanced, and if the Z^* value is large, the broadening feature of the continuous spectrum will be enhanced, and the deviation from the bottom of the measured spectrum profile will be increased. By comparison, it is found that, when the Z^* value is taken from 2 to 4, the theoretical curve is in good consistency with the measured spectrum profile. The range of Z^* value is determined by the ion species, and the introduction of effective nuclear charge number of ions, the Z^* value, may fully explain the jumping feature of the continuous spectrum of lightning plasma at a particular wavelength.

Keywords Lightning spectrum; Continuous radiation; Spectral profile; Electron temperature

(Received Apr. 20, 2020; accepted Aug. 15, 2020)

* Corresponding author