

物理学报
Acta Physica Sinica
ISSN 1000-3290, CN 11-1958/O4

《物理学报》网络首发论文

题目：依据不同波段光谱诊断闪电回击通道温度
作者：刘国荣，朱维君，褚润通，王伟，袁萍，安婷婷，万瑞斌，孙对兄，马云云，郭志艳
网络首发日期：2022-02-26
引用格式：刘国荣，朱维君，褚润通，王伟，袁萍，安婷婷，万瑞斌，孙对兄，马云云，郭志艳. 依据不同波段光谱诊断闪电回击通道温度[J/OL]. 物理学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1958.O4.20220224.1857.010.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

依据不同波段光谱诊断闪电回击通道温度*

刘国荣^{1†} 朱维君¹ 褚润通¹ 王伟¹ 袁萍² 安婷婷² 万瑞斌² 孙对兄²

马云云³ 郭志艳²

1. 兰州理工大学理学院物理系,甘肃 兰州 730050
2. 西北师范大学物理与电子工程学院,甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室,甘肃 兰州 730070
3. 兰州城市学院电子与信息工程学院,甘肃 兰州 730070

利用高速无狭缝光栅摄谱仪捕获到的一次闪电光谱资料,结合等离子体光谱理论,选用不同波段的光谱信息估算了闪电回击通道温度。结果表明:用不同波段的谱线组-单电离氮原子(NII)、中性氧原子(OI)和中性氮原子(NI),基于玻尔兹曼图法估算的闪电回击通道平均温度分别为43270K、17660K和17730K;同时用NII和NI两个谱线组,基于萨哈-玻尔兹曼图法估算得到的闪电回击通道平均温度为24770K。依据闪电通道电晕鞘模型和光谱辐射理论推断,单独选用NII谱线组获得的温度应该是闪电回击通道核心的温度,单独选用NI或OI谱线组获得的温度应该是围绕在闪电回击通道核心周围电晕鞘的温度;同时选用NII和NI谱线组,获得的温度应该是在曝光时间内整个通道截面(包括通道核心和电晕鞘)的平均温度。

关键词: 光谱诊断, 闪电回击通道温度, 玻尔兹曼图法, 萨哈-玻尔兹曼图法

PACS: 92.60.Pw, 52.80.Mg, 92.60.-e **DOI:**10.7498/aps.71.20211673

1 引言

温度是反映闪电回击通道物理特性最基本的参数之一。由于自然闪电发生的随机性和瞬时性,闪电通道的温度不可能直接测量。截止目前,光谱诊断是估算闪电通道温度的唯一方法。

Prueitt^[1]、Orville^[2]、Uman^[3]和 Walker等^[4]课题组利用两条NII谱线的光谱信息(二谱线法)估算了闪电回击通道温度。Walker^[4]基于一次人工触发闪电五个回击的光谱资料和通道底部电流分析了通道的温度、粒子数密度、亮度和内部压力等

* 国家自然科学基金(批准号: 62065011)和甘肃省自然科学基金(批准号: 20JR10RA157)资助的课题。

† 通讯作者 E-mail: 879579530@qq.com

物理参数。欧阳等人^[5]选用多条NII谱线,基于玻尔兹曼图法(Boltzmann plot method)估算了闪电回击通道的温度,并与二谱线法做了比较。发现玻尔兹曼图法可以消除二谱线法因选用不同的谱线组合所引起的不确定因素。Wan等人^[6]考虑大气衰减、光栅效率和相机响应对观测光谱的影响作了光谱校正,在恢复光谱的基础上,基于玻尔兹曼图法分别用氮离子谱线和氧原子谱线计算了闪电回击通道的温度。

用玻尔兹曼图法诊断等离子体温度时所选谱线数量越多,谱线之间的上激发能之差越大,计算结果越可靠^[7]。但在闪电通道温度诊断中,玻尔兹曼图法不能同时满足上述两个条件。这是因为在闪电光谱观测中能够清楚记录并准确识别的谱线数量非常有限,加上玻尔兹曼图法又只能同时选用同种元素同一电离阶段的谱线,使得能被选上的谱线数量更少,且所选谱线之间的上激发能之差相对较小。萨哈-玻尔兹曼图法^[8](Saha-Boltzmann plot method)可以同时选用同种元素不同电离阶段的谱线,这样不仅增大了所选谱线之间的上激发能之差,也增加了可选用谱线的数量,从而可进一步减小温度估算中的不确定因素。

在本工作中,利用高速无狭缝光栅摄谱仪捕获到的一次闪电回击的光谱资料,结合等离子体光谱理论,选用不同波段的光谱信息估算了闪电回击通道的温度。用不同波段的谱线组-单电离氮原子(NII)、中性氧原子(OI)和中性氮原子(NI),基于玻尔兹曼图法估算了闪电回击通道的平均温度;同时用NII和NI的谱线组,基于萨哈-玻尔兹曼图法估算了闪电回击通道的平均温度。然后分析了两种估算方法所得结果不同的原因,并讨论了闪电通道温度的变化可能引起的不同跃迁谱线强度的变化。相关结果可为探究闪电回击通道的形成机制提供一定参考。

2 理论方法

2.1 玻尔兹曼图法

在局部热力学平衡的假设下^[1,2]，依据光谱信息和相应的跃迁参数，由以下方程线性拟合所得直线的斜率可以估算闪电通道温度：

$$\ln\left(\frac{I^z \lambda}{A^z g^z}\right) = -\frac{1}{kT} E^z + \ln\left(\frac{hcN^z}{Q^z(T)}\right), \quad (1)$$

其中，上标 z 表示电离阶段($z=0$ 和 $z=1$ 分别表示中性原子和单电离离子)， I^z 是谱线强度， λ 是波长， A^z 是跃迁几率， g^z 是统计权重， E^z 是上激发能， k 是玻尔兹曼常数， T 是电子温度， h 是普朗克常量， c 是光速， N^z 是粒子数密度， $Q^z(T)$ 是配分函数。在实际应用中，同种元素同一电离阶段的多条谱线被同时选用。根据方程(1)，以 E^z 为横坐标，以 $\ln(I^z \lambda / A^z g^z)$ 为纵坐标拟合直线将获得玻尔兹曼图，等离子体温度可以从玻尔兹曼图中直线的斜率推导出来。

2.2 萨哈-玻尔兹曼图法

同种元素两个连续电离阶段的粒子数比率可以由萨哈方程给出^[9,10]：

$$\frac{N^z}{N^{z-1}} = \frac{2Q^z(T)}{N_e Q^{z-1}(T)} \left(\frac{m k T}{2\pi \hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_\infty^{z-1} - \Delta E_\infty^{z-1}}{kT}}, \quad (2)$$

其中， N_e 是电子密度， m 是电子质量， E_∞^{z-1} 是处于孤立系统的中性原子的电离能， ΔE_∞^{z-1} 是等离子体内部相互作用的修正量。

结合玻尔兹曼方程和萨哈方程，可获得能够同时使用同种元素两个连续电离阶段的多条谱线的方法—萨哈-玻尔兹曼图法，Yalcin 等人^[11]对方程的推导过程有更详细的描述，

$$\ln\left(\frac{I^z \lambda}{A^z g^z}\right)^* = -\frac{1}{kT} E^{z*} + \ln\left(\frac{hcN^0}{Q^0(T)}\right). \quad (3)$$

方程(3)中的上标 * 表示对于离子线, 表达式必须根据以下方程进行修正:

$$\ln\left(\frac{I^z \lambda}{A^z g^z}\right)^* = \ln\left(\frac{I^z \lambda}{A^z g^z}\right) - B^z(T, N_e), \quad (4)$$

这里,

$$B^z(T, N_e) = z \ln \left[2 \left(\frac{mk}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \frac{T^{3/2}}{N_e} \right]. \quad (5)$$

而且, 方程(3)中的上激发能已经通过增加中性原子的电离能做了修正, 修正项如下:

$$E^{z*} = E^z + \sum_{k=0}^{z-1} (E_{\infty}^k - \Delta E_{\infty}^k). \quad (6)$$

方程(3)中的修正项对于中性原子没有影响, 此时方程(3)和方程(1)是相同的。对于单电离离子来说, 对横坐标和纵坐标的修正允许在萨哈-玻尔兹曼图中包含不同离子跃迁的参数。

3 结果与讨论

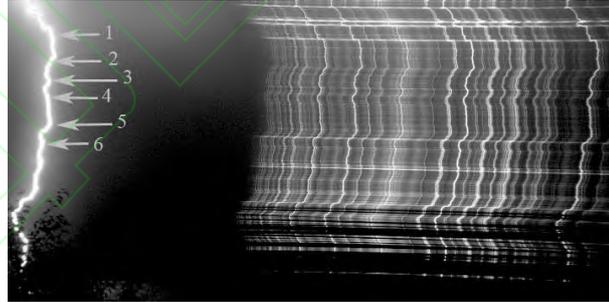


图1 闪电原始光谱图

Fig.1. Original spectrum of lightning.

本文选用的闪电原始光谱图片如图1所示。图片由以高速摄像机(Phantom M310)作为记录系统的无狭缝光栅摄谱仪捕获^[12-15], 高速相机的运行速度为每秒8000帧, 相应的曝光时间是125 μ s。光栅刻线为每毫米600条, 图像分辨率为

1024×432，相机的光谱响应范围为400-1000nm。图片左侧对应的是零级光谱，即闪电回击的原始通道；右侧对应的是一级光谱，特征谱线清晰可见。

为了定量研究，在图1所示的谱线质量好的位置选定了六个样品点，将数字图像转换为由谱线相对强度分布表示的光谱图。以波长为横坐标，单位为nm；纵坐标为任意单位下谱线的相对强度，如图2所示。图2中的(a)、(b)、(c)、(d)、(e)和(f)分别对应图1中的样品点1、2、3、4、5和6。从图2可以看到，不同样品点的光谱结构基本相同，只是个别特征谱线在相对强度上稍有变化。本工作选取了12条特征谱线用于温度计算，其中来自激发能较高的5条NII谱线，来自激发能较低的3条NI谱线和4条OI谱线。计算中使用的谱线跃迁参数都来自NIST (National Institute of Standards and Technology)数据库。

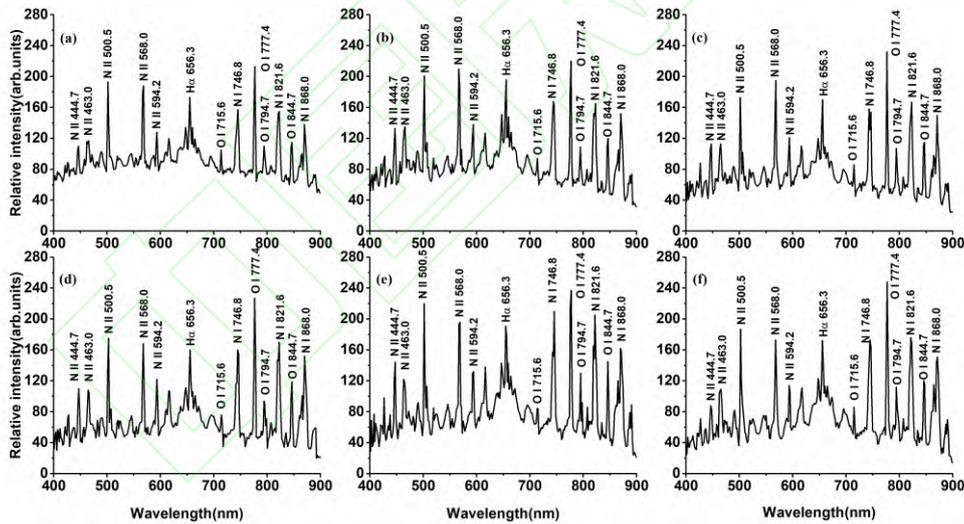


图2 六个采样点的谱线图

Fig.2. Spectral diagram of six sampling points.

根据方程(1)，以 E^z 为横坐标，以 $\ln(I^z \lambda / A^z g^z)$ 为纵坐标，由相应谱线的强度和跃迁参数得到玻尔兹曼图，温度由拟合直线的斜率得到。分别选择5条NII、3条NI和4条OI谱线用于玻耳兹曼图计算了六个采样点的温度如表1所示。从表1中可

以看到，选用NII谱线，用玻耳兹曼图计算得到的平均温度高达43270K；选用NI谱线计算得到的平均温度为17660K；选用OI谱线，计算得到的平均温度为17730K。用NI和OI谱线得到的温度非常接近，用NII谱线计算得到温度却明显比用NI或OI谱线得到的高，约为2.5倍。

表1 不同谱线组估算所得的六个采样点的温度(单位:K)

Table 1. Temperature of six sampling points estimated by different spectral line groups (unit: K).

谱线组	1	2	3	4	5	6	平均值
NII	43680	42850	43250	44410	42980	42440	43270
NI	18600	17640	17170	16710	17300	18990	17660
OI	17520	17130	18190	17690	17200	18220	17730
NII和NI	24800	25110	24780	24710	24530	24670	24770

根据方程(3)，同时选用5条NII和3条NI谱线，以 E^* 为横坐标，以 $\ln(I^z \lambda / A^z g^z)^*$ 为纵坐标，由相应谱线的强度和跃迁参数得到萨哈-玻尔兹曼图，温度由拟合直线的斜率得到。方程(5)中的电子数密度可以通过谱线的加宽得到^[9,10]。在闪电放电等离子体中，总线宽以Stark展宽为主，其余的可以忽略^[16]。则电子数密度的表达式可简化为： $N_e = \frac{\Delta\lambda_{1/2}}{2\omega(T)} \times 10^{16}$ ，其中 $\Delta\lambda_{1/2}$ 为谱线轮廓的半高全宽(FWHM)， $\omega(T)$ 为与温度有关的碰撞展宽系数^[9,10]。我们选取NII 444.703nm的谱线轮廓进行洛伦兹拟合，得到其轮廓的半高全宽。计算得到的闪电回击等离子体通道的电子密度在 $2.70 \times 10^{18} - 3.34 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的范围内，其将用于计算方程(4)中的修正项。同时选用5条NII和3条NI谱线计算得到的平均温度为24770K，其大小介于上述结果的二者之间，如表1所示。

从闪电通道电晕鞘模型^[17-20]可知，先导储存在狭窄的通道核心上的电荷产生一个超过空气击穿电场的径向电场，该电场推动电荷远离通道核心，最后导致先

导通道由一个狭窄的通道核心和围绕在其周围的电晕鞘组成。当回击发生时，回击携带的电荷与先导通道内储存的电荷异号，所以放电很强，从而温度高，主要辐射激发能较高的离子谱线。电晕鞘中的放电较弱，温度较低，主要辐射激发能较低的原子谱线。在wang等人^[21-23]的工作中已经分析证实：具有较高激发能的离子谱线主要来自于通道核心的辐射，具有较低激发能的原子谱线主要来自于外围通道(电晕鞘)的辐射。因此，可以推断单独选用NII谱线组获得的温度应该是闪电回击通道核心的温度，单独选用NI或OI谱线组获得的温度应该是围绕在闪电回击通道核心周围电晕鞘的温度；同时选用NII和NI谱线组，获得的温度应该是在曝光时间内整个通道截面(包括通道核心和电晕鞘)的平均温度。

另外，根据光谱辐射理论，当激发态的粒子密度迅速增加时，其辐射的谱线强度也会迅速增强。对于闪电放电通道，在极短时间内可看作是一个封闭的系统，粒子数是确定的。当达到一定温度时，中性原子会迅速电离并被激发，处于激发态的离子会辐射离子谱线。如果电离的中性原子越多，处于激发态的离子就越多，辐射产生的离子谱线就越强。系统中的中性原子越少，处于激发态的中性原子就越少，辐射产生的原子谱线就越弱。当温度下降时，离子谱线减少，原子谱线增加。同样的结论可以通过理论方法中的方程(3)、(4)和(5)结合得到。当离子谱线增强，原子谱线减弱时，萨哈-玻尔兹曼图中拟合直线的斜率减小，温度升高。当离子谱线减弱，原子谱线增强时，萨哈-玻尔兹曼图中拟合直线的斜率增大，温度降低。据此可以推测，离子谱线在整个闪电回击过程中先增强后减弱，原子谱线随离子谱线的增强而衰减，随离子谱线的衰减而增强，然后随着通道温度的降低而

逐渐消失。希望随着摄谱仪的时间分辨率的不断提高，在未来的闪电光谱观测试验中能够观察到这个现象。

4 结论

在本工作中，利用高速无狭缝光栅摄谱仪捕获到的一次闪电回击的光谱资料，结合等离子体光谱理论，依据不同波段的光谱信息估算了闪电回击通道的温度。结果表明：选用不同波段的谱线组-单电离氮原子(NII)、中性氧原子(OI)和中性氮原子(NI)，基于玻尔兹曼图法估算的闪电回击通道的平均温度分别为43270K、17660K和17730K；同时选用NII和NI的谱线组，基于萨哈-玻尔兹曼图法估算得到的闪电回击通道的平均温度为24770K。基于闪电通道电晕鞘模型和光谱辐射理论推断，单独选用NII谱线组获得的温度应该是闪电回击通道核心的温度，单独选用NI或OI谱线组获得的温度应该是围绕在闪电回击通道核心周围电晕鞘的温度；同时选用NII和NI谱线组，获得的温度应该是在曝光时间内整个通道截面(包括通道核心和电晕鞘)的平均温度。最后讨论了闪电通道温度的变化可能引起的不同跃迁谱线强度的变化。

参考文献

- [1] Prueitt M L 1963 *J. Geophys. Res.* **68** 803
- [2] Orville R E 1968 *J. Atmos. Sci.* **25** 839
- [3] Uman M A 1969 *J. Geophys. Res.* **74** 4
- [4] Walker T D, Christian H J 2019 *J. Geophys. Res.* **124** 3930
- [5] Ouyang Y h, Yuan P, Jia X D 2006, *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)* **42** 49 (in Chinese) [欧阳玉花, 袁萍, 贾向东 2006 西北师范大学学报(自然科学版) **42** 49]
- [6] Wan R, Yuan P, An T, Liu G, Wang X, Wang W, Huang X, Deng H 2021 *J. Geophys. Res.* **126** e2021JD035387
- [7] Kunze H J 2009 *Introduction to Plasma Spectroscopy*(Springer) pp187-192

- [8] Aguilera J A, Aragón C 2004 *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **59** 1861
- [9] Griem H R 1964 *Plasma Spectroscopy* (McGraw-Hill, New York) pp267-295
- [10] Griem H R 1974 *Principles of Plasma Spectroscopy* (New York and London) pp279-287
- [11] Yalcin X, Crosley D R, Smith G P, Faris G W 1998 *Appl. Phys. B* **68** 121
- [12] Cen J Y, Yuan P, Xue S M 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 035001
- [13] Cen J Y, Yuan P, Xue S M, Wang X J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 054104
- [14] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, Zhang T L, Xue S M, Zhao J C, Xu H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 109201 (in Chinese) [王雪娟, 袁萍, 岑建勇, 张廷龙, 薛思敏, 赵金翠, 许鹤 2013 物理学报 **62** 109201]
- [15] Wang X J, Xu W Q, Wang H T, Yang J, Yuan P, Zhang Q L, Hua L Y, Zhang Y K 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 099202 (in Chinese) [王雪娟 许伟群 王海通 杨静 袁萍 张其林 化乐彦 张袁瞰 2021 物理学报 **70** 099202]
- [16] Dong C X, Yuan P, Cen J Y, Wang X J, Mu Y L 2016 *Atmos. Res.* **178-179** 1
- [17] Maslowski G, Rakov V A 2006 *J. Geophys. Res.* **111**, D14110
- [18] Cvetic J, Heidler F, Markovic S, Radosavljevic R, Osmokrovic P 2012 *Atmos. Res.* **117**, 122
- [19] Maslowski G, Rakov V A 2013 *Atmos. Res.* **129-130** 117
- [20] Ignjatovic M, Cvetic J, Heidler F, Markovic S, Djuric R 2014 *Atmos. Res.* **149** 333
- [21] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, Liu G R 2016 *J. Geophys. Res. Atmos.* **121** 8615
- [22] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, Liu G R 2017 *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 4993
- [23] Liu G R, Yuan P, An T T, Cen J Y, Wang X J 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 064103

Diagnose the lightning return stroke channel temperature according to different band spectrum*

Liu Guo-Rong^{1†} Zhu Wei-Jun¹ Chu Run-Tong¹ Wang Wei¹ Yuan Ping² An Ting-Ting²
Wan Rui-Bin² Sun Dui-Xiong² Ma Yun-Yun³ Guo Zhi-Yan²

1. Department of Physics, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China
2. Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics and Functional Materials of Gansu Province, College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China
3. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract

The spectral data of a lightning discharge process were captured by a high-speed slit-less grating spectrograph. Based on the plasma spectrum theory, the lightning return stroke channel temperature is estimated according to the spectral information of the different bands. The results show that the average temperatures of the lightning return stroke channel estimated by the Boltzmann plot method are 43270K, 17660K and 17730K, respectively, when the spectral line group of the single ionized nitrogen atom (NII), neutral oxygen atom (OI) and neutral nitrogen atom (NI) are selected respectively. The average temperature of the lightning return stroke channel is 24770K, which is estimated based on the Saha-Boltzmann

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62065011) and the Natural Science Foundation of Gansu Province, China (Grant No. 20JR10RA157).

† Corresponding author. E-mail: 879579530@qq.com

plot method by using NII and NI spectral line groups. Based on the lightning channel corona sheath model and the spectral radiation theory, it can be inferred that the temperature obtained by using only NII spectral line group should be the temperature of the lightning return stroke channel core, and the temperature obtained by using only NI or OI spectral line group should be the temperature of the corona sheath around the lightning return stroke channel core. Using both NII and NI spectral line groups, the temperature obtained should be the average temperature of the entire channel section (including the channel core and corona sheath) during the exposure time.

Keywords: spectral diagnosis; lightning return stroke channel temperature; Boltzmann plot method; Saha-Boltzmann plot method

PACS: 92.60.Pw, 52.80.Mg, 92.60.-e