

文章编号: 2095-4980(2025)08-0844-05

雷电双波段光学观测系统研制及实验研究

罗小军, 张 琪*, 石立华

(陆军工程大学 电磁环境效应与光电工程国家级重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘 要: 为获取闪电通道内部的微观特征, 本文研制了一套双波段雷电光学观测系统。该系统主要由信号捕捉模块、信号接收调理模块、信号采集模块和供电模块组成, 并通过标准光源对系统的传输系数进行校准。系统可直接测量不同波长光信号的时域全波形, 并可以通过相对谱线强度分析通道的温度和电导率等信息。基于间隙放电与雷电放电的相似性, 采用研制的系统对间隙放电通道进行观测, 计算间隙放电通道的温度和电导率。实验结果表明, 间隙放电通道温度变化范围为 5 400~5 980 K, 电导率变化范围为 10.93~28.53 S/m。

关键词: 雷电; 光学观测; 间隙放电; 温度

中图分类号: P427.32

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2023351

Development and experimental study of lightning dual band optical observation system

LUO Xiaojun, ZHANG Qi*, SHI Lihua

(National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-Optical Engineering,
Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: In order to obtain the microscopic characteristics inside the lightning channel, a lightning dual band optical observation system is designed. The system mainly consists of a signal capture module, a signal reception and conditioning module, a signal acquisition module, and a power supply module. The transmission coefficient of the system can be calibrated by using a standard light source. The system can directly observe the time-domain full wave waveforms of different wavelength optical signals, and can analyze the temperature and conductivity information of channels through relative spectral line intensity. Based on the similarity between gap discharge and lightning, the designed system is employed to observe the gap discharge channel, and the temperature and conductivity of the gap discharge channel are calculated. The results indicate that the temperature variation range of the gap discharge channel in this experiment is 5 400~5 980 K, and the conductivity variation range is 10.93~28.53 S/m.

Keywords: lightning; optical observation; gap discharge; temperature

光学观测是雷电发展过程最直接的观测方法之一。当前比较常见的光学观测方法主要有雷电连接过程观测系统^[1]、高速摄像机^[2-3]和雷电发展过程高速光学观测系统^[4]。现有的光学观测方法在时间分辨率和空间分辨率上都有了较大突破, 但无论是高速摄像机还是光学观测系统等, 均是在宏观尺度上对雷电发展过程进行研究, 而针对雷电发展通道内部微观特征的分析则相对较少。目前主要可行的方法是光谱观测, 通过对雷电光谱的研究分析, 可获得雷电通道的温度、电子密度、电导率等相关特征参数, 对于研究雷电的物理机制具有重要的意义^[5]。

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977219)

*通信作者: 张 琪 email:emczhq@163.com

引用格式: 罗小军, 张琪, 石立华. 雷电双波段光学观测系统研制及实验研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(8): 844-848. DOI: 10.11805/TKYDA2023351.

Citation format: LUO Xiaojun, ZHANG Qi, SHI Lihua. Development and experimental study of lightning dual band optical observation system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(8): 844-848. DOI: 10.11805/TKYDA2023351.

袁萍课题组^[6-8]通过高速摄像机和无狭缝光栅摄谱仪对不同地区的雷电光谱信息进行了分析, 并讨论了不同雷电过程的微观物理特征参数, 如闪电通道电导率、通道半径、通道温度等。但高速摄像机和摄谱仪仍不能同时兼顾时间分辨率和空间分辨率, 且只能获取雷电发展过程的图像资料, 缺乏对应的光学发展时域波形信息。

为直接获取不同波段的单色光信号, 本文在前人研究的基础上, 研制了一套可用于捕捉不同波长光信号的观测系统, 并对间隙放电通道进行观测, 计算通道的温度和电导率。

1 系统设计

双波段光学观测系统(Dual band Optical Observation System, DbOS)的主要设计思路为: 首先由信号捕捉单元在平行于阵列平面的维度捕捉雷电放电通道或间隙放电通道辐射的不同波段光信号; 然后由信号调理单元实现不同波段光信号的光电转换、非线性校正及放大; 最后由信号数字化存储单元完成信号的数字化采集存储。

基于以上设计思路, 最终研制的双波段光学观测系统主要由 4 部分组成: 信号捕捉模块、信号接收调理模块、信号采集模块、供电模块。双波段光学观测系统原理结构示意图如图 1 所示。

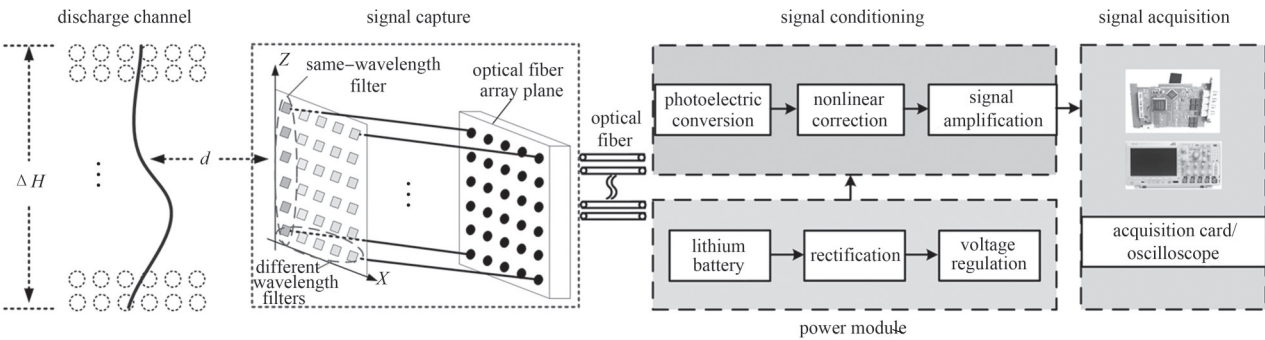


Fig.1 Overall schematic diagram of the observation system
图1 观测系统整体示意图

根据实验需求, 经过调研及实验测试, 选择中心波长分别为 650 nm 和 655 nm 的滤光片, 图 2 为制作完成的 655 nm 信号捕捉探头实物图。

信号调理模块采用光接收机作为信号的接收处理装置, 并由稳压电源单元进行供电, 制作的微型光接收机内部结构如图 3 所示。

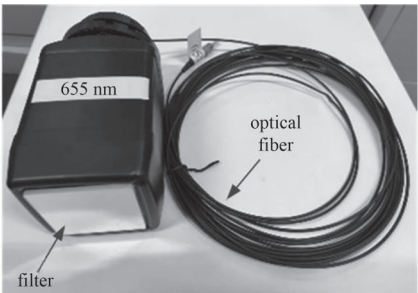


Fig.2 Physical image of signal capture probe
图2 信号捕捉探头实物图

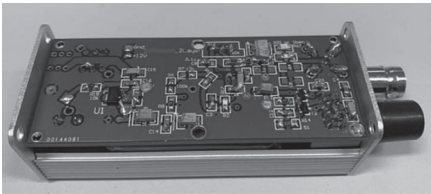


Fig.3 Internal structure of optical receiver
图3 光接收机内部结构

2 系统标定与实测结果分析

2.1 系统标定

在完成双波段光学观测系统的组装之后, 本文采用多通道发光二极管光源对整个系统进行标定, 型号为 MLED4-4。光源通过和白光照头组合可输出稳定的白光信号, 涵盖了本文选用的 650 nm 和 655 nm 两个波长的光信号。系统标定示意图如图 4 所示。

标定结果如表 1 所示。由于光源输出的白光信号

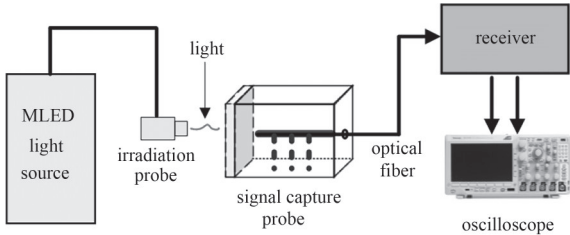


Fig.4 System calibration diagram
图4 系统标定示意图

中不同波长信号占比不同,因此将不同波长信号转化至同一标准下进行对比,表1中 h_{11} 为650 nm波长转化系数, h_{22} 为655 nm波长转化系数。同时,为减小光接收机不同通道之间的误差,对不同通道记录结果也转化至同一条件下进行分析, q_{11} 为通道一转化系数, q_{21} 为通道二转化系数。

2.2 间隙放电实验观测

基于长间隙放电和雷电放电过程的相似性,采用研制的DbOS开展棒-板空气间隙放电实验观测。

如图5所示,空气间隙放电实验主要由直流高压发生器、限流电阻、金属铝板电极(直径3 m)、棒电极、电流传感器、双波段光学观测系统和示波器等组成。为防止实验中电压过大造成设备损坏,在直流高压发生器与金属铝板电极之间加入了约120 M Ω 的限流电阻。棒电极采用避雷针作为接闪电极,高度约80 cm,电流传感器主要用于测量金属铝板电极与棒电极之间间隙击穿时的放电电流,系数为0.01 V/A。

通过调节直流高压发生器给金属铝板电极逐渐增压,直至棒-板间隙产生放电击穿通道。信号捕捉探头分别置于距离电极间隙约80 cm处的位置,观测信号均通过光纤传输至屏蔽柜内的光接收机,再经由同轴线连接至示波器进行采集。实验现场部分设置如图6所示。

间隙击穿时不同波长探头同步记录的一组信号归一化波形如图7所示。可以看出,不同波长观测到的信号波形一致性较好。此时击穿电流波形如图8所示,击穿电流峰值约为434 A。此外,从图7中还可以看出,650 nm、655 nm信号的上升时间分别为0.033 6 μ s、0.036 4 μ s。

闪电或间隙击穿产生的等离子体通道温度可由光谱的谱线强度计算。当采用2种谱线时,通道温度 $T^{[8]}$ 为:

$$T = \frac{1}{k} \times \frac{E_2 - E_1}{\ln\left(\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}}\right) - \ln\left(\frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1}\right)} \quad (1)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数, $k=1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K; λ_1 、 λ_2 分别为2条谱线对应的波长; I_{λ_1} 、 I_{λ_2} 分别为2条光谱线的谱线强度; A_1 、 A_2 分别为2条光谱线的跃迁几率; g_1 、 g_2 分别为2条光谱线的统计权重; E_1 、 E_2 分别为2条光谱线的激发能。本文选用的2个波长的相关参数如表2所示。

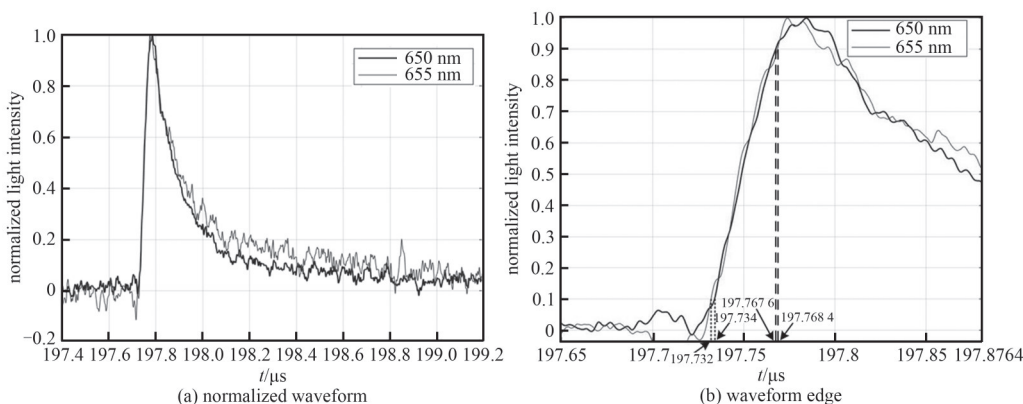


Fig.7 Normalized waveforms of signals with different wavelengths

图7 不同波长信号归一化波形

表1 标定结果

Table1 Calibration results

conversion coefficient	number	amplitude
wavelength conversion coefficient	h_{11}	6.23
	h_{22}	3.56
channel conversion coefficient	q_{11}	1.00
	q_{21}	1.03

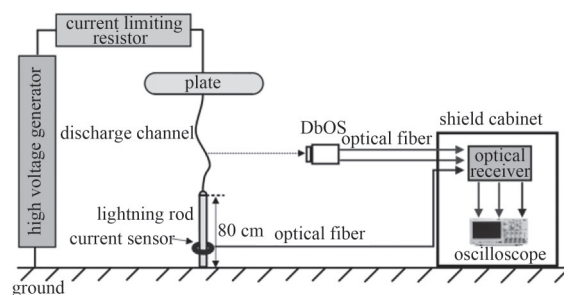


Fig.5 Schematic diagram of air gap discharge experiment

图5 空气间隙放电实验示意图

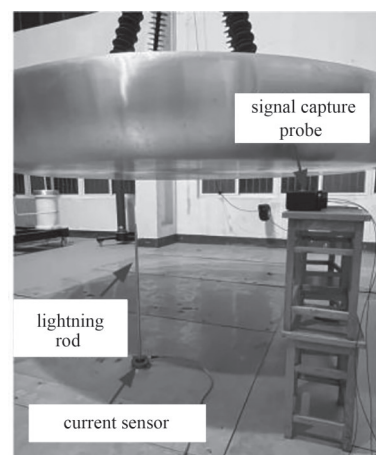


Fig.6 Partial setup diagram of the experiment

图6 实验现场部分设置图

表2 波长参数
Table2 Wavelength parameters

wavelength/nm	transition probability/($\times 10^8 \text{ s}^{-1}$)	statistical weight	excitation energy/eV
650	0.042	8	13.676
655	0.441	6	12.088

结合等离子体输运理论和粒子的碰撞积分，可由通道温度进一步计算出通道的电导率，但电导率的计算用到了大量的函数。为使电导率的计算更为方便，Borovsky^[9]在1995年提出了电导率与温度的拟合公式。当通道温度 $\geq 2\,500\text{ K}$ 时，通道电导率 σ 的拟合经验公式为：

$$\left\{\begin{aligned} \sigma &= 1.03 \times 10^{-52} T^{14.25}, & 2\,500\text{ K} \leq T \leq 5\,000\text{ K} \\ \sigma &= 9 \times 10^{-35} T^{9.4}, & 5\,000\text{ K} \leq T \leq 9\,350\text{ K} \\ \sigma &= 3.7 \times 10^{-10} T^{3.2}, & 9\,350\text{ K} \leq T \leq 15\,000\text{ K} \\ \sigma &= 8.4 \times 10^{-2} T^{1.2}, & T \geq 15\,000\text{ K} \end{aligned}\right. \quad (2)$$

将实验观测的谱线强度代入式(1)，得到本次实验中间隙放电通道温度大约为 $5\,400\sim 5\,980\text{ K}$ 。根据温度与电导率的关系，得到该放电条件下对应的通道电导率为 $10.93\sim 28.53\text{ S/m}$ 。结果如表3所示。

表3 观测结果
Table3 Observation results

number	wavelength/nm	spectral line intensity/(a.u)	temperature/K	conductivity /(S·m ⁻¹)
1	650	0.130	5 432	11.56
	655	0.101		
2	650	0.131	5 400	10.93
	655	0.087		
3	650	0.115	5 980	28.53
	655	0.090		

文献[10]通过采用纹影法对1 m棒-板空气间隙进行实验观测，结果表明，在正极性操作冲击电压条件下，流注-先导-击穿温度大约从 350 K 增加至 $6\,000\text{ K}$ 。文献[11]通过对1 m棒-板间隙分别施加正、负极性的雷电冲击电压，观测间隙放电通道的温度。结果表明，正、负击穿时通道平均温度范围大约为 $1\,035\sim 9\,683\text{ K}$ 。本文计算的结果与文献报道的间隙放电温度范围比较相近，表明本文研制的双波段光学观测系统的观测结果是合理的，同时也验证了系统的可靠性。

3 结论

本文研制了一套可用于观测放电通道不同波长辐射光的双波段光学观测系统，该系统可直接记录闪电回击通道光辐射信号的时域全波波形的，通过获取的时域波形既可由相对谱线强度分析放电通道的温度及电导率，也可用于分析不同波长波形的上升时间、相对强度等信息。采用研制的双波段光学观测系统对实验室条件下的空气间隙放电实验进行了观测，并对观测结果进行了分析，计算结果与文献结果相近，验证了系统的有效性，为进一步提升雷电光学观测能力提供了参考。

参考文献：

[1] HUANG Liyang,ZHANG Qi,DUAN Yantao,et al. Current impulse velocity after the air gap breakdown at atmospheric pressure[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020,62(2):635–638. DOI:10.1109/TEMC.2019. 2900670.

[2] QIE Xiushu,JIANG Rubin,WANG Caixia,et al. Simultaneously measured current, luminosity, and electric field pulses in a rocket-triggered lightning flash[J]. Journal of Geophysical Research, 2011,116(D10):D10102. DOI:10.1029/2010JD015331.

[3] HUANG Shengxin,CHEN Weijiang,FU Zhong,et al. Separate luminous structures leading positive leader steps[J]. Nature Communications, 2022(13):3655. DOI:10.1038/s41467-022-31409-x.

[4] HUANG Liyang,ZHANG Qi,QIU Shi,et al. Development of a high-speed optical system for lightning flash observation[J]. Measurement, 2019(131):85–91. DOI:10.1016/j.measurement.2018.08.047.

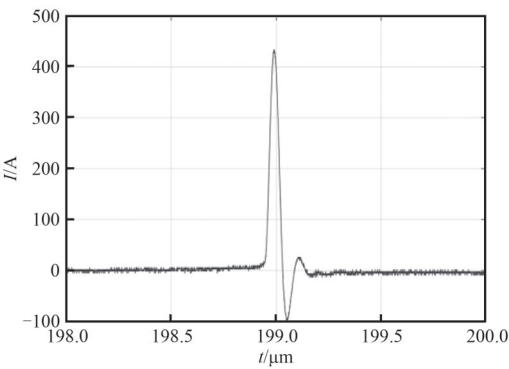


Fig.8 Breakdown current waveform
图8 击穿电流波形

- [5] 刘琳,王彩霞,田杨萌,等. 多普勒效应对雷电源辐射定位的影响[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(9):1135–1143. (LIU Lin,WANG Caixia,TIAN Yangmeng,et al. Influence of Doppler effect on the radiation positioning of the thunder source[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(9):1135–1143.) DOI:10.11805/TKYDA2021257.
- [6] 瞿海燕,袁萍,张华明,等. 闪电放电过程的近红外光谱及温度沿放电通道的演化特征[J]. 地球物理学报, 2012,55(8):2508–2513. (QU Haiyan,YUAN Ping,ZHANG Huaming,et al. Evolution characteristic of near-infrared spectra and temperature along stroke channel of lightning discharge process[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012,55(8):2508–2513.) DOI:10.6038/j.issn.0001-5733.
- [7] 王雪娟,袁萍,岑建勇,等. 光谱法研究闪电通道的导电特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2013,33(12):3192–3196. (WANG Xuejuan,YUAN Ping,CEN Jianyong,et al. Study on the conductivity properties of lightning channel by spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013,33(12):3192–3196.) DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2013)12-3192-05.
- [8] AN Tingting, YUAN Ping, CHEN Rongrong, et al. Evolution of discharge characteristics along the positive cloud-to-ground lightning channel[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 2021,126(5):e2020JD33478. DOI:10.1029/2020JD033478.
- [9] BOROVSKY J E. An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders:guided wave propagation along conducting cylindrical channels[J]. Journal of Geophysical Research, 1995,100(D2):2697–2726. DOI:10.1029/94JD00407.
- [10] 程晨,贺恒鑫,胡锦洋,等. 正极性冲击流注-先导转化放电通道温度测量研究[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(4):1359–1368. (CHENG Chen,HE Hengxin,HU Jinyang,et al. Study on temperature measurement of discharge channel in streamer to leader transition process under positive impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(4):1359–1368.) DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.191330.
- [11] 张垚琦. 基于放电光强及光谱时空分布的 1 m 间隙雷电冲击放电机理及应用研究[D]. 广州:华南理工大学, 2020. (ZHANG Yaqi. Study on the mechanism and application of 1 m air gap discharge under the lightning impulse based on the spatiotemporal distribution of discharge intensity and spectrum[D]. Guangzhou,China:South China University of Technology, 2020.)

作者简介:

罗小军(1991–), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为雷电探测, email:15605172912@163.com.

石立华(1969–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为雷电及电磁脉冲防护.

张 琪(1987–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为雷电探测与信号处理.