

# 一次强云对地闪电首次回击过程的光谱分析

袁萍<sup>1,2</sup>, 郟秀书<sup>2</sup>, 吕世华<sup>2</sup>, 陈冠英<sup>1</sup>, 张广庶<sup>2</sup>

1 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070

2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000

**摘要** 利用无狭缝光栅摄谱仪, 获得了一次强云对地闪电首次回击过程 400~600 nm 范围的光谱, 将原子结构的理论应用于闪电光谱的研究, 用多组态 Dirac-Fock 方法, 计算了有关光谱线的波长、振子强度以及相应的激发态能量等参数, 并重新辨认了波长为 419.0 和 425.3 nm 的谱线。结合相应的光谱跃迁参数和电学观测资料对试验光谱进行了分析, 并发现, 回击通道的光谱结构及特性与闪电放电的强度密切相关, 在强闪电回击过程中, 激发能量较高的 O<sup>+</sup> 离子谱线增强。根据光谱特征推断, 强闪电回击通道的峰值温度应高于过去的估算值。

**关键词** 闪电光谱; 等离子体; MCDF 方法

**中图分类号**: P427.3

**文献标识码**: A

**文章编号**: 1000-0593(2006)04-0733-05

## 引言

雷电过程产生的强大回击电流, 使闪电通道中聚集大量的等离子体, 它们的特性参数及变化与闪电形成和发展的物理过程密切相关, 因此, 通道等离子体诊断一直是雷电物理的研究领域所关心的课题。由于自然闪电的发生在时间和空间尺度上的随机性, 加上闪电过程的高速瞬间变化特性, 使等离子体诊断的其他探测手段难以实现, 而光谱观测可以在一定的距离内获取通道内部的信息, 所以, 特别引起人们的兴趣<sup>[1-9]</sup>。早期, 利用常规的摄谱仪对闪电光谱的研究仅限于谱线的识别<sup>[1-3]</sup>, 由此了解通道等离子体的成份。尽管在这方面已有大量的工作, 由于过去缺少准确的原子能级和跃迁参数的数据, 对个别谱线的指认仍然有疑问<sup>[3]</sup>, 也有一些尚未辨认的未知谱线。无狭缝摄谱仪的问世, 使人们的注意力逐渐转移到光谱所反映的物理信息, Orville 曾报道了利用光谱观测数据推算出的闪电通道内的平均温度、电子密度等参数<sup>[4]</sup>。由于不同的闪电放电过程, 其光谱结构和特性有一定的差别, 以往的工作基本上都是单纯地研究了光谱结构和通道温度、电子密度等参数的变化, 由于没有同步的电学观测资料, 将光谱与闪电放电特征结合起来的分析非常少。因此, 现有的关于闪电光谱分析的数据远远不能满足雷电物理研究的需要。

闪电形成和发展过程的物理机制是雷电物理的研究领域

中一个非常重要的基本依据, 由于闪电放电的复杂多变性, 迄今, 这方面的工作还不够成熟。光谱特性与闪电放电的相关性是揭示闪电物理过程的重要途径之一。给出与光谱有关的基本参数, 了解通道等离子体的密度、温度等特性, 寻找光谱特征与通道电流、电磁场变化的对应关系, 对探讨雷电激发和发展过程的微观物理机制, 做好雷电预警和防护的研究工作有重要的意义。特别是强闪电放电过程, 其大电流和强电磁辐射效应是造成对人身体的伤害, 导致森林火灾、电力和通讯系统中断的主要根源。强闪电放电过程的特征参数, 也一直是雷电防护的研究中最为关注的问题。本工作根据这一领域研究工作的需要, 用无狭缝摄谱仪, 获得了一次强云对地闪电首次回击过程 400~600 nm 范围的光谱。用多组态 Dirac-Fock(MCDF) 方法, 且系统考虑了相对论效应、电子关联、弛豫效应等重要贡献, 计算了与光谱线有关的跃迁波长、振子强度和相应的激发态能量等参数, 并结合理论计算结果, 分析了强闪电首次回击放电过程的光谱特征, 为进一步研究闪电形成和发展过程中的光电相关特性和物理机制提供了参考数据。

## 1 试验方法与理论计算

光谱观测采用无狭缝摄谱仪, 其记录系统是 SONY 数码相机, 它采用专业蔡司镜头, 12 倍光学变焦,  $f = 4.3 \sim 51.6$  mm, 视角 =  $5^\circ$ ; 为了得到整个可见光范围的闪电光

收稿日期: 2004-11-15, 修订日期: 2005-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(40475007)和国家自然科学基金“十五”重点项目(40135010)资助

作者简介: 袁萍, 女, 1963年生, 西北师范大学物理与电子工程学院教授, 博士

©1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

谱, 分光装置采用每毫米 600 条的透射光栅。光栅置于摄像机的物镜前, 其平面与物镜面成  $23^\circ$  左右的夹角。拍得闪电光谱后, 以高压汞灯为标准光源进行谱线波长观测值的标定。

激发态能量和跃迁参数的计算分别采用程序 GRASP92<sup>[10]</sup> 和 REOS99<sup>[11]</sup>, 它们基于完全相对论时的多组态 Dirac-Fock 方法<sup>[12]</sup>, 且系统地考虑了电子关联和弛豫效应的贡献。在 MCDF 方法中, 原子态  $\alpha$  的波函数可近似表示为具有相同宇称和总角动量的组态波函数 (CSF) 的线性组合, 即

$$|\Psi(PJM)\rangle = \sum_{r=1}^{n_c} C_r(\alpha) |\Gamma_r(PJM)\rangle \quad (1)$$

其中  $C_r(\alpha)$  是组态混合系数,  $n_c$  是 CSF 的数目, 它反映了计算中考虑电子关联效应的程度。为了有效地考虑关联效应, 我们采用了最早用于量子化学的活动空间方法来产生组态状态列表, 然后通过逐渐扩大所考虑的 CSF 数目, 对跃迁初、末态波函数进行多步优化, 直到得到理想的能级和波函数数值。另外, 计算中还考虑了 Breit 相互作用、QED 修正以及核效应等因素对能级的重要贡献。

## 2 资料分析

2002—2004 年夏季, 分别在广东顺德郊区、青海大通山区、西藏那曲进行了自然闪电的光谱和同步的电学观测试验。试验期间, 共记录到 80 多次云对地闪电的回击光谱。文献<sup>[13]</sup>的工作中, 具体分析了高原地区弱闪电放电回击过程的光谱特征。结合理论计算<sup>[14]</sup>和相应的电学观测的资料分析发现, 不同强度的闪电放电过程, 其光谱特征有明显的差别, 图 1 是广东沿海地区一次典型的强云对地闪电首次回击过程的光谱照片, 闪电距离观测点 3 km 左右, 天气背景比较暗, 适合光谱观测。这是一幅云外全通道的光谱。图 2 给出了用谱线相对强度表示的通道一定高度处的光谱图。为了使谱线的辨认和光谱特性的分析更为可靠, 目前工作用多组态 Dirac-Fock 方法, 且系统地考虑了相对论效应、电子关联、弛豫效应等重要贡献, 计算了有关光谱线的精细结构, 并将相应的跃迁波长、振子强度以及上能级激发能量(上激发能)的值在表 1 中列出, 这些参数不但在光谱特征分析中必不可少, 也是通道温度等参量的计算中必需的<sup>[4]</sup>。表 1 中, 试验光谱线对应的典型跃迁是指相应的一组多重态跃迁谱线中振子强度最大的一条线。光谱资料分析发现, 波长为 463.0, 500.5 和 568.0 nm 的谱线是闪电回击光谱中的基本谱线, 在绝大多数闪电光谱中都可以记录到<sup>[3,6,13]</sup>。从计算结果来看, 它们均属于 N 离子的三重态跃迁, 并且都具有很大的振子强度、对应的上能级寿命比较长<sup>[15]</sup>、激发能量较低, 是最容易形成的强谱线。另外, 波长为 480.3 和 594.2 nm 的谱线在许多闪电的回击过程中也很容易观测到, 但它们的相对强度要小一些, 这 2 条谱线的跃迁对应同一个上能级, 虽然其激发能也比较低, 但它的能级寿命很短。从基本谱线的跃迁特性推断, 首次回击的通道等离子体中, N 离子的密度最大, 并且, 除基态外, 它们处于  $n=3$  的激发态的

机会最多, 相应的激发能量为 22 eV 左右。

云对地闪电回击光谱和电学观测资料的对比分析还发现, 除上述基本谱线外, 不同的闪电回击过程, 其光谱结构有一定的差别<sup>[13]</sup>, 特征谱线反映了每一次具体的闪电放电过程的特点。波长为 444.7 和 517.9 nm 的谱线在一些比较强的闪电回击中才能清楚地观测到, 其中, 444.7 nm 谱线在以前的工作中被认为是 N 离子的跃迁<sup>[3,5,7]</sup>(对应上激发能为 23 196 eV), 根据本文理论计算和不同强度闪电放电的特性, 在强闪电放电中, 对这条线有贡献的还有激发能量更高的 O 离子  $2p^2(^1D)3d^3F-2p^2(^1D)3p^2F^o$  的双重态跃迁。波长为 407.5, 419.0, 425.3 以及 436.9 nm 等激发能量比较高的谱线一般在很强的闪电回击中才能记录到, 以往的工作中, 只有 Salanave 等人曾观测到这几条线<sup>[1,3]</sup>。表 2 列出了以往对这四条谱线的辨认结果。文献<sup>[3]</sup>中, Salanave 将波长为 407.5 nm 的谱线归于 N 离子  $2p(^2P)4f^3F-2p(^2P)3d^3F^o$  的跃迁; 419.0 nm 归于 Ar  $5p^2[5/2]-4s^2[3/2]^o$  的跃迁, 但他对这两条谱线的指认都不敢肯定。Wallace 将 425.3 nm 指认为中性 N  $2p^23p^4D-2p^23s^4P$  的跃迁<sup>[1,2,6]</sup>; Salanave 和 Wallace 都认为 436.9 nm 是 O 原子  $2p^3(^4S^o)4p^3P-2p^3(^4S^o)3s^3S$  的跃迁谱线<sup>[1,3]</sup>。

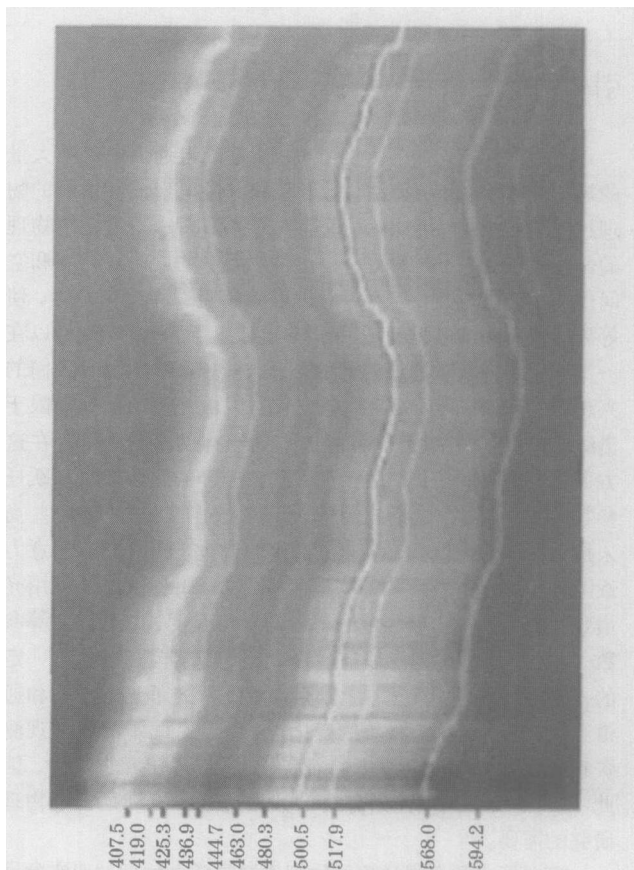


Fig 1 Photo of the lightning spectrum (nm)

由于无狭缝摄谱仪是直接对原始的闪电通道分光成像的, 对光谱的分辨率有一定的影响, 增加了光谱分析的难度。结合相应的电学观测资料和光谱特征分析发现, 上述四

条谱线的共同特点是: 在强闪电放电的光谱中明显增强, 而在比较弱的闪电放电过程中难以观测到。根据光谱跃迁参数和这四条谱线在闪电光谱中的特征判断, 它们应该主要是比较高的激发态跃迁的贡献。

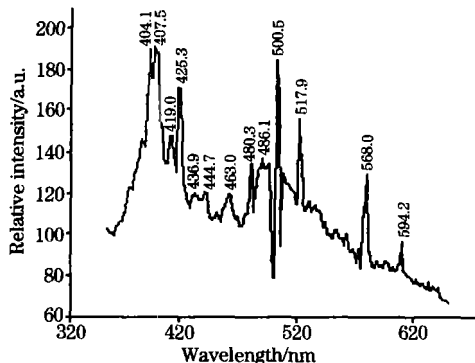


Fig 2 Spectrum of the return stroke channel at certain height

图 2 中的 407.5 nm 处是一组相对强度较大的跃迁谱线, 从表 1 给出的计算结果可以看出, 具有较高激发能量的 O 离子  $2p^2(^3P)3d^4F-2p^2(^3P)3p^4D^o$  四重态跃迁和 N 离子  $2p(^2P^o)4f^3F_3-2p(^2P)3d^3F_2$  三重态跃迁都在这个波长附近, 前者最强跃迁的振子强度约是后者的 6 倍。在闪电回击通道中, O 离子浓度一般远小于 N, 但在非常强的闪电放电中, 随着一次电离离子浓度的增加, 会使通道中 O 离子的密度足够大, 相应的辐射跃迁增强, 所以, 407.5 nm 应该还有 O 离子四重态跃迁的贡献。

在标准状况下, Ar 只占空气体积的 0.934%, 表 3 给出了 Ar 在 419.0 nm 附近的两组跃迁的波长、振子强度和激发能量的理论计算值, 可以看出, 这两组跃迁都非常弱, 不容易在大气等离子体中形成足够强的跃迁谱线。而闪电光谱的观测大多数是在白天进行的, 背景光比较强, 一般难以记眉到一些非常弱的谱线。如果 419.0 nm 是 Ar 的跃迁谱线, 它对应的激发能量都比较低, 应该很容易在弱闪电回击中出现, 但沿海和高原两地的试验光谱均没有在弱闪电放电的光谱中记录到这两条线; 另外, 根据理论计算, Ar 415.9 nm 跃迁的振子强度和激发能量的数值与 Ar 420.1 nm 跃迁的非常接近, 它们的波长相差也不大, 它们应该能同时在试验光谱中出现, 但在闪电光谱中没有记录到过 415.9 nm 的

这条线。因此, 根据 419.0 nm 这条谱线在强闪电放电中增强的特征, 它应该是 O  $2p^2(^1D)3d^2G-2p^2(^1D)3p^2F^o$  的跃迁谱线。

比较不同强度闪电的光谱发现, 强闪电过程中, 观测到的中性 N 和 O 原子的谱线相对比较少。425.3 nm 是在典型的强闪电回击中记录到的一条比较强的谱线, Wallace 将它指认为中性 N  $2p^23p^4D-2p^23s^4P$  的跃迁, 根据理论计算, 这组跃迁的波长在近红外区域, 不可能在我们的试验光谱中观测到。425.3 nm 附近有另一组中性 N 原子的跃迁  $2p^2(^1D)3d^2P-2p^2(^3P)3p^2D^o$ , 但它的振子强度非常小, 同时考虑到激发能量和光谱线强度, 强闪电放电通道中, 对 425.3 nm 有贡献的应该主要是激发能量更高的 O 离子  $2p^2(^1D)4f^2H-2p^2(^1D)3d^2G$  的双重态跃迁。

O 原子在 436.9 nm 附近的跃迁振子强度比较小, 在相应的原子密度不是很大的情况下, 难以形成足够强的跃迁谱线, 因此, 在强闪电中出现的 436.9 nm 的谱线应该主要是激发能量更高的 O 离子  $2p^2(^3P)3d^2D-2p^2(^3P)3p^2D^o$  的双重态跃迁的贡献, 由于通道中 O 离子浓度远远小于 N, 只有在闪电放电非常强, 通道中 O 离子的密度比较大时, 才能比较清楚地观测到它们的跃迁谱线。

激发能量是表示光谱跃迁特性的一个基本参数, 它和通道等离子的密度、温度、通道电流以及电磁场变化等参量直接相关。根据快电场变化和广东电力试验研究所雷电定位系统的观测资料, 这是一次典型的强云对地闪电放电过程, 共有 8 个回击, 首次回击与继后回击的时间间隔为 82.7 ms, 通道峰值电流的估算值为 57.4 kA。闪电回击过程的光谱中, 基本谱线对应的上激发能一般在 22 eV 左右, 由表 1 可以看出, 在这一次回击中, 观测到的特征谱线对应的上激发能最高达 34.233 eV。闪电放电的强度不同时, 其光谱结构和特性有明显的差别, 这次强闪电回击的光谱中, 上激发能在 28 eV 以上的谱线比一般的闪电回击过程多。以往关于通道温度的估算都是以 NII 离子谱线的强度、振子强度以及激发能量等参数为依据进行的<sup>[4, 16]</sup>。根据闪电首次回击的光谱特征, 强闪电过程中, 激发能量较高的 O 离子跃迁增强, 由此推断, 它的回击通道的峰值温度应高于过去的估算值。本工作记录的波长为 407.5, 419.0, 425.3 nm 以及 436.9 nm 的谱线可作为强闪电放电的标志。

Table 1 Observed lightning spectra compared with calculated wavelength, oscillator strengths and upper excited energies

波长/nm		跃迁	gf 值	上激发能/eV
$\lambda_{obs}$	$\lambda_{cal}$			
404.1	404.042	N $2p(^2P^o)4f^3G_5-2p(^2P^o)3d^3F_4$	1.261 48	26.209
407.5	407.584	O $2p^2(^3P)3d^4F_{9/2}-2p^2(^3P)3p^4D^o_{\gamma_2}$	4.928 64	28.706
	407.420	N $2p(^2P^o)4f^3F_3-2p(^2P^o)3d^3F_2$	0.864 34	26.168
419.0	418.979	O $2p^2(^1D)3d^2G_{9/2}-2p^2(^1D)3p^2F^o_{\gamma_2}$	5.210 95	31.319
425.3	425.395	O $2p^2(^1D)4f^2H_{1V2}-2p^2(^1D)3d^2G_{9/2}$	8.101 92	34.233
	425.012	N $2p^2(^1D)3d^2P_{1/2}-2p^2(^3P)3p^2D^o_{\gamma_2}$	0.014 52	14.916
436.9	436.924	O $2p^2(^3P)3d^2D_{3/2}-2p^2(^3P)3p^2D^o_{\gamma_2}$	0.408 76	29.062
	436.826	OI $2p^3(^4S^o)4p^3P_1-2p^3(^4S^o)3s^3S_1$	0.006 55	12.359
444.7	444.716	N $2p(^2P^o)3d^1D_2-2p(^2P^o)3p^1P_1$	1.604 76	23.196

续表 1

	444 818	O	$2p^2(^1D)3d^2F_{7/2} - 2p^2(^1D)3p^2F_{7/2}^{\circ}$	1 209 13	31 148
463 0	463 077	N	$2p(^2P)3p^3P_2 - 2p(^2P)3s^3P_2$	1 190 82	21 160
480 3	480 469	N	$2p(^2P)3d^3D_3 - 2p(^2P)3p^3D_3$	0 814 33	23 246
486 1	486 132	H $_{\beta}$	$4d^2D_{5/2} - 2p^2P_{3/2}$	0 438 64	12 748
500 5	500 669	N	$2p(^2P)3d^3F_4 - 2p(^2P)3p^3D_3$	3 873 50	23 142
	500 876	N	$2p(^2P)3d^3P_2 - 2p(^2P)3p^3S_1$	1 346 07	23 415
	501 203	N	$2p(^2P)3p^3S_1 - 2p(^2P)3s^3P_1$	0 230 24	20 940
517 9	517 952	N	$2s2p^2(^4P)3d^5F_5 - 2s2p^2(^4P)3p^5D_4^{\circ}$	4 726 51	30 139
	517 931	N	$2s2p^2(^4P)3d^5D_4 - 2s2p^2(^4P)3p^5P_3^{\circ}$	3 139 84	30 373
	520 650	O	$2p^2(^3P)3d^2P_{3/2} - 2p^2(^3P)3p^2P_{3/2}^{\circ}$	0 540 19	28 942
568 0	568 117	N	$2p(^2P)3p^3D_3 - 2p(^2P)3s^3P_2$	1 683 68	20 665
594 2	594 318	N	$2p(^2P)3d^3D_3 - 2p(^2P)3p^3P_2$	2 028 81	23 246

Table 2 Identification for some lines in previous works

波长/nm		跃迁	
407.3	? N	$2p(^2P)4f^3F - 2p(^2P)3d^3F$	Reference[3]
420.1	? Ar	$3s^23p^5(^2P_{3/2})5p^2[5/2] - 3s^23p^5(^2P_{3/2})4s^2[3/2]^{\circ}$	Reference[3]
425.4	N	$2p^23p^4D - 2p^23s^4P$	Reference[1, 2, 6]
436.8	O	$2p^3(^4S^{\circ})4p^3P - 2p^3(^4S^{\circ})3s^3S$	Reference[1, 3]

Table 3 Calculated transition properties of ArI lines

波长/nm		跃迁	gf 值	上激发能/eV
419.037	Ar	$3s^23p^5(^2P_{3/2})5p^2[1/2] - 3s^23p^5(^2P_{3/2})4s^2[3/2]^{\circ}$	0 003 56	14 506
420.064	Ar	$3s^23p^5(^2P_{3/2})5p^2[5/2] - 3s^23p^5(^2P_{3/2})4s^2[3/2]^{\circ}$	0 016 82	14 499

### 3 结 论

本工作结合理论计算和相应的电学观测资料, 分析了一次典型的强云对地闪电首次回击过程 400~ 600 nm 范围的光谱特性, 并对波长为 419.0 和 425.3 nm 等光谱线重新进行了辨认。通过资料分析发现, 回击通道等离子体的特性与闪

电放电的强度密切相关, 强闪电过程中, 激发能量较高的 O 离子跃迁谱线增强, 根据首次回击的光谱结构和跃迁特性推断, 强闪电放电过程中, 回击通道的峰值温度应高于过去的估算值。

致谢: 本工作得到美国 Texas A & M University Orville R E 教授的帮助, 试验工作得到广东电力试验研究所的支持与帮助。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Wallace L. *Astrophys. J.*, 1964, 139: 994.
- [ 2 ] Wallace L. *J. Geophys. Res.*, 1960, 65(4): 1211.
- [ 3 ] Salanave L E, Orville R E, Richards C N. *J. Geophys. Res.*, 1962, 67(5): 1877.
- [ 4 ] Orville R E. *J. Atmos. Sci.*, 1968, 25: 839.
- [ 5 ] Orville R E. *J. Atmos. Sci.*, 1968, 25: 827.
- [ 6 ] Orville R E. *J. Appl. Meteor.*, 1980, 19: 470.
- [ 7 ] Orville R E. *J. Atmos. Sci.*, 1984, 41(21): 3180.
- [ 8 ] Weidman C, Boye A, Crowell L. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(D11): 13249.
- [ 9 ] Barasch G E. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75: 1049.
- [ 10 ] Parpia F A, Fischer C F, Grant I P. *Compt. Phys. Commun.*, 1996, 94: 249.
- [ 11 ] Fritzsche S, Fischer C F, Dong C Z. *Compt. Phys. Commun.*, 2000, 124: 340.
- [ 12 ] Grant I P, Mckenzie B J, Norrington P H. *Compt. Phys. Commun.*, 1980, 21: 207.
- [ 13 ] YUAN Ping, LIU Xin-sheng, ZHANG Yi-jun, et al(袁萍, 刘欣生, 张义军, 等). *Acta Geophysica Sinica(地球物理学报)*, 2004, 47(1): 42.
- [ 14 ] YUAN Ping, LIU Xin-sheng, ZHANG Yi-jun(袁萍, 刘欣生, 张义军). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2004, 24(3): 288.
- [ 15 ] Bell K L, Hibbert A, Stafford R P. *Phys. Scr.*, 1995, 52: 240.
- [ 16 ] Uman M A. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1964, 26: 123.

## The Spectral Properties of an Intense Lightning Return Stroke

YUAN Ping<sup>1, 2</sup>, QIE Xiu-shu<sup>2</sup>, LÜ Shí-hua<sup>2</sup>, CHEN Guan-ying<sup>1</sup>, ZHANG Guang-shu<sup>2</sup>

1. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

**Abstract** The spectrum in the range of 400-600 nm from the first return stroke of an intense cloud-to-ground lightning flash was obtained by a slit-free spectrograph. Applying the atomic structure theory to the research work on lightning spectra, the wavelengths, oscillator strengths and excitation energies of upper levels were calculated for the transitions of related lightning spectrum. Multi-configuration Dirac-Fock method was employed in the calculation. From the results, re-identifications were carried out for the lines of 419.0 and 425.3 nm. It was found by spectral analysis combined with corresponding electrical information finds that the spectrum characteristic is closely related to the intensity of lightning discharge, as during an intense lightning return stroke the lines of O with high excitation energies are enhanced.

**Keywords** Lightning spectra; Plasma; MCDF method

(Received Nov. 15, 2004; accepted Feb. 28, 2005)