0254-6124/2012/32(3)-348–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Huang Yong, Cheng Li, Zhang Fang. Research on artificial airglow during ionospheric modification by the release of SF_6 gas. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(3): 348-353

释放 SF_6 气体扰动电离层时的人工气辉研究 *

黄 勇[1,2] 程 立[1] 张 方[2]

1(电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室 合肥 230037)

2(94782 部队 杭州 310021)

摘 要 在电离层高度释放 SF_6 气体能够显著扰动电离层. 根据 SF_6 分子在电离层中的扩散方程, 同时考虑其在电离层中主要的离子化学反应, 研究了 SF_6 气体释放后电离层各粒子浓度的时空变化, 计算了产生人工气辉的体发射系数和发射强度. 结果表明, SF_6 气体在电离层高度释放后, 电子和 O^+ 的密度均有大幅度下降, 主要的负离子成分由电子转变成 SF_5^-; 在释放过程中, 主要产生 777.4 nm 和 135.6 nm 两种气辉, 且前者的气辉强度远小于后者; 电离层温度对气辉的强度有很大的影响. 本文的数值计算与美国 IMS/SF_6 实验观测数据进行比较, 结果近似, 且通过数据比较还能准确推断出实验时当地的电离层温度.

关键词 电离层扰动, 人工气辉, 扩散, 体发射系数

中图法分类号 P 352

Research on Artificial Airglow During Ionospheric Modification by the Release of SF_6 Gas

HUANG Yong[1,2] CHENG Li[1] ZHANG Fang[2]

1(*Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology of State, Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei* 230037)

2(*94782 Unit of the PLA, Hangzhou* 310021)

Abstract Release of a chemically reactive gas such as SF_6 into the ionosphere region can disturb its plasma environment. In this paper, in terms of diffusion equation of SF_6 gas and mainly ion-chemistry reactions in ionosphere region, the density changes of ionospheric particles response to the release of SF_6 gas are investigated, and the airglow volume emission rates and intensity from the SF_6 gas released at ionospheric altitudes are calculated. The results show that the diffusion of released SF_6 gas in ionospheric is very quick, and these SF_6 gas molecules can cause a large scale depletion of ionospheric electron and O^+ density, and the dominate negative ion of ionospheric region is converted into SF_5^-. During the releasing, the 777.4 nm and 135.6 nm airglows will be excited, the intensity of 777.4 nm is much weaker, and the ionospheric temperature may play an important role in the airglow intensity. Comparing the results of our calculations with American IMS/SF_6 experimental data, it shows good agreement, and the temperature of experiment local ionosphere can be exactly estimated

* 武器装备预研基金资助 (9140A31030310JB39)

2011-02-28 收到原稿, 2011-11-09 收到修定稿

E-mail: huangyonghefei@163.com

through this comparison.

Key words Ionospheric modification, Artificial airglow, Diffusion, Volume emission rate

0 引言

地球电离层是太阳电磁辐射与粒子辐射及地球上层大气原子与分子相互作用从而使大气电离而形成的, 通常定义其为自由电子和离子足以影响电波传播的层区. 因此, 电离层暴等自然因素所引起的空间环境扰动将会对无线电通信产生显著影响. 电离层暴的主要特征是电离层各区电子密度发生较大变化, 其产生的根本原因是电离层中电离率和复合率的变化, 而中性成分的变化是其中的主要因素. 此外, 一些人为因素也可以影响电离层, 例如, 大型火箭升空时, 发动机排放的尾气可以局部耗空电离层电子密度, 进而使得局部地区短波通信中断 [1−2]. 除火箭排气这类非人为电离层扰动之外, 还可以通过火箭、卫星等搭载化学物质来开展有意识的电离层人工扰动实验 [3−4]. 在实验中需要解决的一个重要环节是对实验结果的诊断, 光学检测是最直接、最重要的手段之一, 实验中所激发的气辉很容易被地面或空间的仪器检测到. 例如, 美国在 1989 年 4 月和 1991 年 12 月进行的两次 REDAIR 实验中, 探测到了来自于化学物质释放产生的波长为 630 nm 的人工气辉 [5].

在释放化学物质人工扰动电离层的实验中, 释放物质大都选择扩散慢且化学反应快的气体, 前期研究表明, SF_6 气体对电离层的扰动效果极佳. 本文研究的目的是根据 SF_6 分子在电离层中的扩散方程, 同时考虑其在电离层中主要的离子化学反应, 考察 SF_6 气体释放后电离层各粒子浓度的时空变化, 重点研究产生人工气辉的体发射系数和发射强度.

1 基本原理及计算方法

在电离层的 F 区, 占绝对多数的 O^+ 与电子的复合系数约为 $10^{-12}cm^3{\cdot}s^{-1}$, 在 F 层高度人工释放中性气体分子后, 很容易通过离子化学反应生成分子性的正负离子, 而分子性的离子与电子或 O^+ 的复合系数一般可以达到 $10^{-9}cm^3{\cdot}s^{-1}$ 甚至更大 [6], 因此 F 层的电子–离子复合速度至少有三个数量级的提高, 最终导致电子密度大幅减少, 局部区域形成人工电离层电子空洞.

当中性分子气体被释放后, 将与电离层背景等离子体充分混合, 从而向空间扩散. 扩散过程随着气体的不同, 经历的时间也不尽相同, 离子化学反应也主要发生在这一阶段. 若不计电离层中的中性风及传热引起的扩散, 扩散方程可以表达为

$$\frac{\partial n_{\rm i}(h,r,t)}{\partial t} = \nabla[D_{\rm i}\nabla n_{\rm i} + G_{\rm i}(h,t)n_{\rm i}] - L_{\rm i}(h,r,t). \tag{1}$$

其中, $n_{\rm i}(h,r,t)$ 为气体分子的密度, 是时间和空间的函数 (h 和 r 分别为电离层高度及离释放点的径向距离); $D_{\rm i}$ 为粒子 i 的扩散系数; $G_{\rm i}(h,t)$ 为粒子在重力场作用下的漂移速度; $L_{\rm i}(h,r,t)$ 为损失项.

在电离层 F 区中释放 SF_6 气体后, 电离层发生离子化学反应. 表 1 列出了当电离层温度与电子温度近似相等或相差不大时相关化学反应的情况 [7]. SF_6 释放后首先与电离层等离子体中的电子发生反应, 生成的 SF_6^- 和 SF_5^- 比例由反应系数决定. 以 SF_6^- 为例, 假设电离层中电子温度 $T_{\rm e} = 800\,{\rm K}$, 那么生成 SF_6^- 的比例为 $k_1/(k_1+k_2) = 0.38$, 生成的 SF_6^- 继续与 O^+ 反应生成不同激发态的氧原子 O^{**}, 进而辐射辉光. 另外 O^{**} 还可以通过表 1 中反应 5 和 6 来生成, 从这四个反应方程式中可以认为, SF_6 气体起着类似于催化剂的作用. O^{**} 主要有 O ($3p^5P$), O ($3p^3P$) 和 O ($4p^3P$) 三个激发态, 表 2 给出了其占整个 O^{**} 的比例系数以及向基态跃迁产生的辉光波长 [8−9].

从化学反应中可以得出, 激发态氧原子的密度 $[O^{**}]$ 随时间的变化为

$$\frac{{\rm d}[O^{**}]}{{\rm d}t} = \beta_1 k_2[SF_6^-][O^+] + \beta_2 k_6[O^-][O^+] - A^{**}[O^{**}]. \tag{2}$$

式中, $[SF_6^-]$, $[O^+]$ 和 [e] 分别表示通过化学反应生成的 SF_6^- 以及电离层等离子体背景中 O^+ 和电子的密度, A^{**} 表示激发态氧原子的跃迁系数. 一般情况下, 激发态氧原子寿命为 $(A^{**})^{-1} = 10^{-8}\,{\rm s}$, 这与粒子扩

表 1 释放 SF_6 气体后电离层中的化学反应

Table 1 Ionospheric reaction stimulated by SF_6 releases

number	reaction	rate
1	$SF_6 + e^- \rightarrow SF_6^-$	$k_1 = (2.2\times10^{-7} - k_3)\times10^{-1}\,\mathrm{cm^3\cdot s^{-1}}$
2	$SF_6^- + O^+ \rightarrow SF_6 + O^{**}$	$k_2 = 5\times10^{-8}\,\mathrm{cm^3\cdot s^{-1}}$
3	$SF_6 + e^- \rightarrow SF_5^- + F$	$k_3 = \dfrac{2.2\times10^{-7}}{1+0.0016\exp(4770/T_e)}\,\mathrm{cm^3\cdot s^{-1}}$
4	$SF_5^- + O^+ \rightarrow SF_5 + O^*$	$k_4 = 5\times10^{-8}\,\mathrm{cm^3\cdot s^{-1}}$
5	$SF_6^- + O \rightarrow SF_6 + O^-$	$k_5 = 5\times10^{-11}\,\mathrm{cm^3\cdot s^{-1}}$
6	$O^- + O^+ \rightarrow O^{**}$	$k_6 = 2.7\times10^{-7}\,\mathrm{cm^3\cdot s^{-1}}$
7	$O^{**} \rightarrow O + h\nu^{**}$	$A^{**} = 10^8\,\mathrm{s^{-1}}$
8	$O^* \rightarrow O + h\nu^*$	$A^* = 5.3\times10^{13}\,\mathrm{s^{-1}}$

注 T_e 为电子温度, * 和 ** 号表示不同激发态.

表 2 不同激发态的比例系数

Table 2 Fraction of the excited state

state	airglow wavelength	$\beta_1[SF_6^-]+[O^+]$	$\beta_2[O^-]+[O^+]$
$O(3p^5P)$	777.4 nm	0.3442	0.42
$O(3p^3P)$	844.6 nm	0.1543	0.46
$O(4p^3P)$	436.8 nm	0.0047	0.00

散及化学反应的时间相比是非常短的, 因此生成的 O^{**} 将会很快地自发辐射而消失, 可以近似认为 $\mathrm{d}[O^{**}]/\mathrm{d}t = 0$, 则辉光辐射的体发射系数为

$$\varepsilon^{**} = A^{**}[O^{**}] = \beta_1 k_2[SF_6^-][O^+] + \beta_2 k_6[O^-][O^+]. \quad (3)$$

在 SF_5^- 与 O^+ 反应中大约有 $\beta_3 = 0.48$ 的反应生成低激发态 $O(^5S_2^0)$[9], 发射波长为 135.6 nm 的辉光, 同样 $O(^5S_2^0)$ 态原子的寿命也很短, 135.6 nm 辉光的体发射系数为

$$\varepsilon^* = A^*[O^*] = \beta_3 k_4[SF_5^-][O^+]. \quad (4)$$

通过以上分析, 根据式 (1), 利用有限元方法 [10] 可以计算得到释放气体 SF_6 的密度分布, 根据表 1 所示的各化学反应方程可以得到生成的负离子密度分布以及电子密度的变化, 进而根据式 (3) 和式 (4) 可以计算得到不同波长气辉的体发射系数. 计算时需要用到的 $[O^+]$ 和 [e] 分别由经验模式 MSIS90[11] 和 IRI 95[12] 得到, 本文的计算认为电离层温度与电子温度相等.

2 计算结果与讨论

在模拟计算中, 选择在中国北京地区 (39.8°N, 116.3°E) 上空释放 SF_6 气体, 释放高度选择在电离层 F 区的电子密度峰值高度 (本文取 265 km), 释放物质的总数为 120 mol (美国在 1983 年的 IMS 实验中, 大约有 18 kg 的 SF_6 气体注入到 F 区 [13]). 气体释放后电离层的扰动情况如图 1 和图 2 所示.

图 1 表示 SF_6 气体释放 20 s 后 $r = 0$ km 处电离层中主要粒子的密度分布. 其计算结果显示, 在 250~300 km 高度上, 电子和 O^+ 的密度均有大幅度下降, 电离层中电中性条件基本保持不变, 主要的负离子成分由电子转变成 SF_5^-, 而 SF_6^- 分量很少 (图 1 中未标出). 为了更形象地说明释放 SF_6 气体后对电离层的扰动, 图 2 给出了在 SF_6 气体释放 20 s 后电离层电子密度的分布, 从图 2 中可以看出, 电子密度在中心 ($r = 0$ km) 减少到 12%, 在 $r = 18$ km 处约减少到 50%, 影响大约 30 km×50 km 的范围, 可以直观地看到电离层电子空洞.

气辉的体发射系数与处于激发态的原子和分子密度有关, 为了更形象地看出辉光辐射的强弱关系, 将不同高度的体发射系数沿视线方向积分即可得到气辉的激发强度, 计算结果如图 3 和图 4 所示.

图 3 给出了在 SF_6 释放 30 s 后不同波段气辉体发射系数的空间分布情况, 释放 30 s 后气辉径向半径约为 30 km. 生成气辉的种类以及气辉体发射系数的大小由离子反应种类以及反应系数所决定, 从计算结果来看, 777.4 nm 的气辉最大体发射系数约为 20 Ra, 与 135.6 nm 气辉有两个数量级的差别, 产生如此大

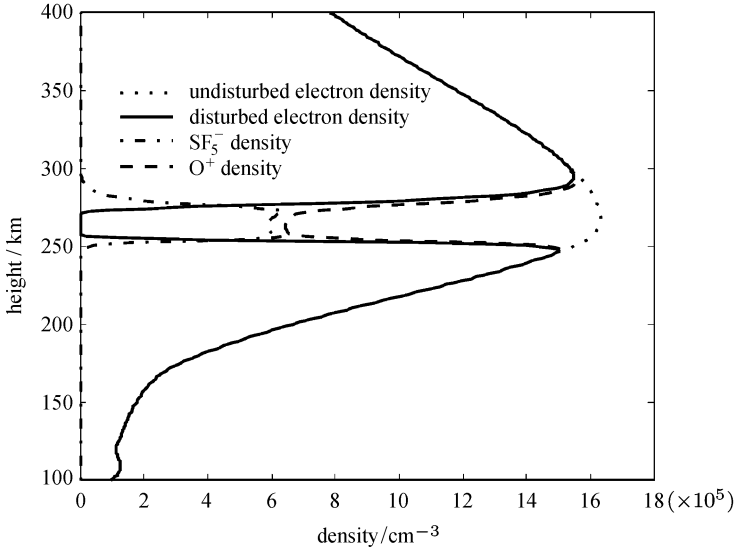

图 1　SF_6 释放 20 s 后电离层 ($r = 0$ km) 的电子和负离子浓度

Fig. 1　Electron and negative ion density in ionosphere 20 s after SF_6 molecules are released

差异的原因如前所述, 即在电离层高度释放 SF_6 气体, 其化学反应主要生成的中间产物为 SF_5^-. 另外, 从表 2 可以看出, $O(3p^3P)$ 和 $O(4p^3P)$ 两种激发态的氧原子比 $O(3p^5P)$ 的数量更少, 因此 844.6 nm 和 436.8 nm 的气辉体发射系数将会更小, 本文不再给出计算结果. 图 4 给出的是气辉辐射强度随时间的变化关系, 图 4 中显示, 释放 SF_6 分子激发的 777.4 nm 和 135.6 nm 气辉强度分别在 11 s 和 17 s 达到最大值, 这是由于 $O(3p^5P)$ 的寿命比 $O(^5S_2^0)$ 短, 前者是 10^{-8} s, 后者为 190 μs.

电离层温度对化学反应的种类、反应速率以及释放气体分子的扩散都有很大影响, 进而最终影响电离层各粒子的种类和粒子浓度的时空分布, 因此, 电离层温度对气辉辐射有很大的影响. 图 5 计算得出

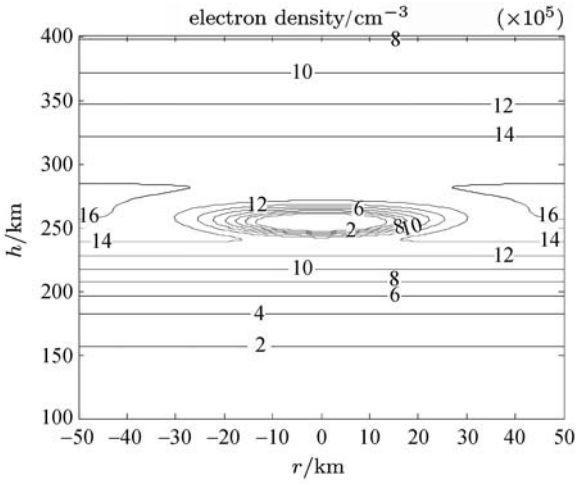

图 2　SF_6 释放 20 s 后电离层电子密度分布

Fig. 2　Distribution of electron density 20 s after SF_6 molecules are released

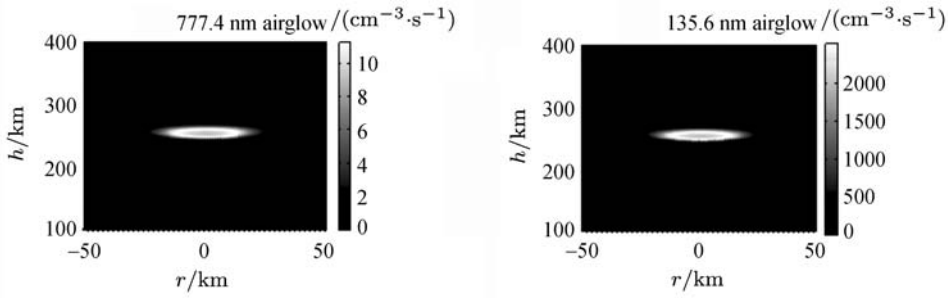

图 3　SF_6 释放 30 s 后不同波段的气辉体发射系数

Fig. 3　Computed volume emission rate 30 s after the SF_6 release

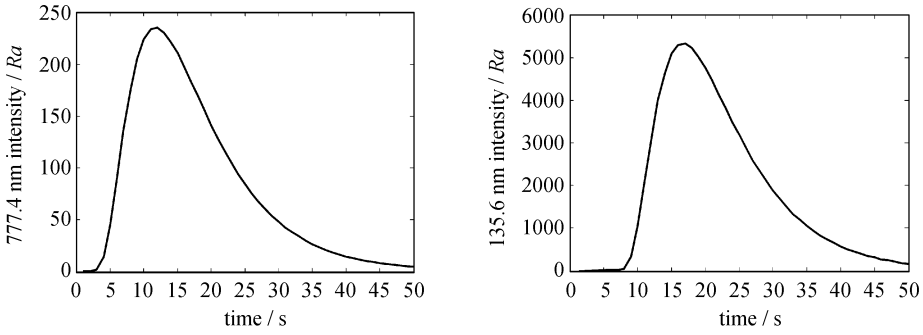

图 4 气辉辐射强度随时间的变化

Fig. 4 Time evolution of the airglow intensity following the SF_6 release

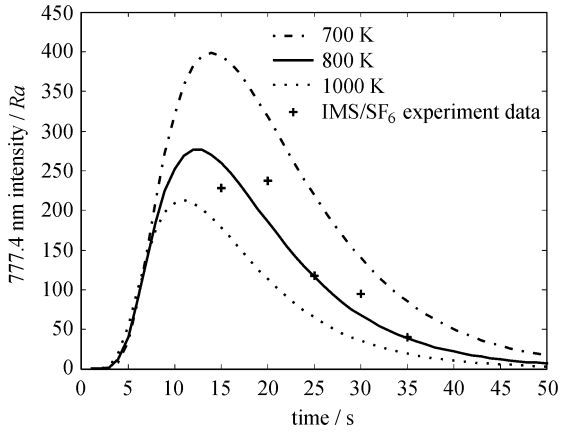

图 5 电离层温度对气辉辐射的影响

Fig. 5 Airglow intensity with different ionosphere temperatures

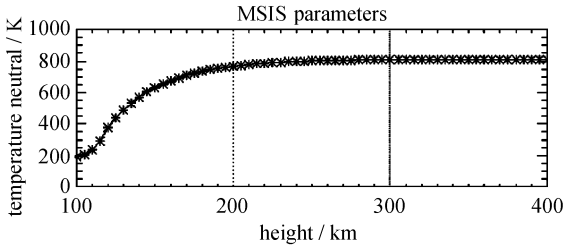

图 6 电离层温度分布

Fig. 6 Temperature of model ionosphere

了不同电离层温度下 (分别设定为 700 K, 800 K 和 1000 K) 释放 SF_6 气体后产生的 777.4 nm 的气辉辐射强度, 图 5 同时还给出了美国 IMS 实验时测量得到的实验数据 [13]. 为了能够与实验测量数据进行比较, 计算时各参数与实验条件一致, 即释放点选择在美国弗吉尼亚州沃洛普斯岛屿 (36.7°N, 71°W) 上空 248 km 高度, 时间为 1983 年 11 月 9 日 01:00 LT, 释放 SF_6 重量为 18 kg[13]. 从图 5 显示的结果可以看出, 随着电离层温度的改变, 气辉辐射强度有很大的改变, 从计算和测量数据的比较来看, 可以认为实验时电离层温度约为 800 K, 图 6 给出的是由 MSIS90 模型计算得到的电离层温度, 从图 6 可知, 在电离层受到扰动的 200~300 km 高度范围内, 电离层温度的确约为 800 K. 以上计算不但说明了本文研究模型和计算方法的正确性, 而且通过气辉辐射计算和实验测量数据的比较, 能够准确推断电离层温度, 这是一种新的间接探测电离层等离子体温度的方法.

3 结论

利用中性气体在电离层背景中的扩散方程, 结合电离层中主要的离子化学反应, 研究了中国北京地区上空释放 SF_6 气体后, 电离层中主要离子成分的变化, 通过化学反应方程得出了 SF_6 气体释放后能够产生的气辉种类, 并计算了波长为 777.4 nm 和 135.6 nm 的气辉体发射系数和发射强度. 同时, 结合美国 IMS/SF_6 实验时的释放条件, 考察了电离层温度对气辉辐射强度的影响, 通过与实验测量数据的比较, 能够推断出实验时的电离层温度.

电离层释放化学物质产生人工气辉的研究不仅有明确的科学意义, 例如估算电离层温度等, 且具有现实应用价值, 例如在电离层中人工产生气辉可以明显地影响到空间光学探测, 因为当辐射足够强时, 会使空间光学传感器失明. 上述应用的前提是能够根据需要产生足够强的遍及可见光、红外和紫外各种

不同波段的人工气辉, 因此对释放物质, 释放量以及释放高度等的选择研究有待进一步深入.

参考文献

[1] Mendillo M. A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab [J]. *J. Geophys. Res.*, 1975, **50**(16):2217-2228

[2] Mendillo M, Hawkins G S, Klobuchar J A. A large scale hole in the ionosphere caused by the launch of Skylab [J]. *Science*, 1975, **187**(4174):343-346

[3] Choueiri E Y, Oraevsky V N, Dokukin V S, *et al.* Observations and modeling of neutral gas releases from the APEX satellite [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A10):25 673-25 681

[4] Mendillo M, Bernhardt P A. The space shuttle as an ionospheric modification experiment [R]//20th Aerospace Sciences meeting. Orlando: AIAA, 1982

[5] Semeter J, Mendillo M, Baumgardner J, *et al.* A study of oxygen 6300Å airglow production through chemical modification of the nighttime ionosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(9):19 683-19 699

[6] Ferguson E E. Rate constants of thermal energy binary ion-molecular reactions of aeronomic interest [J]. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1979, **2**(2):159-178

[7] Bernhardt P A. Chemistry and dynamics of SF_6 injections into the F region [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(A6):3929-3937

[8] Olsen R E, Petersen J R and Moseley J. Oxygen ion-ion neutralization reaction as related to tropical ultraviolet nightglow [J]. *J. Geophys. Res.*, 1971, **76**:2516-2519

[9] Tinsley B A, Christensen A B, Bittencourt J, *et al.* Excitation of oxygen permitted line emissions in the tropical nightglow [J]. *J. Geophys. Res.*, 1973, **78**:1174-1186

[10] Mendillo M, Semeter J, Noto J. Finite element simulation (FES): a computer modeling technique for studies of chemical modification of the ionosphere [J]. *Adv. Space Res.*, 1993, **13**(10):55-64

[11] Hedin A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A2):1159-1172

[12] Bilitza D. International reference ionosphere-status 1995/1996 [J]. *Adv. Space Res.*, 1997, **20**:1751-1754

[13] Bernhardt P A, Weber E J, Moore J G, *et al.* Excitation of oxygen permitted line emissions by SF_6 injection into the F region [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**(A8):8937-8946