

程木松, 徐彬, 吴振森等. 2014. 电离层加热实验中超强电子密度增强特征. 地球物理学报, 57(11):3633-3641, doi:10.6038/cjg20141117.

Cheng M S, Xu B, Wu Z S, et al. 2014. A large increase of electron density in ionospheric heating experiment. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11):3633-3641, doi:10.6038/cjg20141117.

电离层加热实验中超强电子密度增强特征

程木松¹, 徐彬², 吴振森¹, 李海英¹, 许正文², 吴军², 吴健²

1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071

2 中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107

摘要 2011 年 11 月利用欧洲非相干散射雷达协会(EISCAT)的大功率加热设备和诊断设施开展了挪威高纬度地区电离层加热实验. 在此次加热实验中, UHF 雷达探测到了十分明显的电子密度增强现象, 反射高度附近电子密度最大增幅可达 269.3%, 而在远离谐振区的 300~500 km 及以上高度的增幅也可达 30%~50%. 通过对加热前后离子线谱和数据残差的对比分析, 表明 300~500 km 的电子密度增强是真实可信的, 在如此大的空间范围出现增幅如此大的电子密度增强特征实属罕见. 另外通过对等离子体线谱的分析, 得到了等离子体线双谐振峰结构, 本文利用电子的速度分布函数和等离子体线谱之间的关系, 对加热实验中观测到的等离子体线谱进行了仿真, 提出了超热电子是引起本次电子密度增强的可能机制. 并利用仿真中所使用的超热电子速度参数对超热电子的电离能力、横向和纵向自由程进行了计算, 最终验证了所提出的物理机制的合理性.

关键词 电离层加热; 电子密度; 等离子体线; 超热电子

doi:10.6038/cjg20141117

中图分类号 P352

收稿日期 2014-08-03, 2014-10-09 收修定稿

A large increase of electron density in ionospheric heating experiment

CHENG Mu-Song¹, XU Bin², WU Zhen-Sen¹, LI Hai-Ying¹, XU Zheng-Wen², WU Jun², WU Jian²

1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

2 National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation (CRIRP), Qingdao 266107, China

Abstract The high latitude ionospheric heating experiment was carried out with the EISCAT high power heating and diagnosing facilities in November 2011 in Norway. An obviously increased electron density was observed by UHF radar. The increase is up to 269.3% above the background level around the reflection height, and it could reach 30%~50% at the altitude range of 300~500 km far away from the heater interaction region. The increased electron density observed at 300~500 km is verified by the analysis of ion lines and residual error in this experiment. To the authors' knowledge, the large increase of electron density in such a large range of space is extremely rare. In addition, a double-peaked spectrum is observed in plasma lines. The plasma lines are simulated based on the relationship between the electron velocity distribution function and the plasma line spectrum, and the large increase of electron density in this experiment may be caused by suprathermal electrons. The ionization ability, horizontal and

基金项目 国家自然科学基金项目(40831062, 41004065, 41104108); 中央高校基本科研基金项目(K5051207003); 空间天气学国家重点实验室(08262DAA4S)和电波环境特性及模化技术国防重点实验室基金资助.

作者简介 程木松, 男, 1986 年生, 2012 年毕业于西安电子科技大学理学院, 博士研究生, 主要从事电离层加热异常扰动谱的研究.

E-mail: chengmusong@163.com

vertical free path of suprathermal electrons are calculated using the velocity parameters used in the plasma lines simulation, and the hypothesis is proved to be reliable.

Keywords Ionospheric heating; Electron density; Plasma lines; Suprathermal electrons

1 引言

电离层是近地空间的重要组成部分, 由于电离层可对在其中传播的电磁波发生散射和吸收等效应, 使得电波信号衰减或剧烈抖动, 这对无线电广播、通讯及卫星定位导航等将产生严重的影响, 因此研究电离层具有很重要的实际意义. 随着科学技术的进步, 人工扰动电离层的研究方法得以实现, 利用地基大功率高频电波加热扰动电离层的方法越来越受到人们的关注(黄文耿等, 2004; 王占阁等, 2012).

在电离层加热实验中可以产生一系列显著的加热特征, 如大功率无线电波注入可以引起大范围的电子温度增强(Gordon et al., 1971; Xu B et al., 2008; Robinson et al., 1996), 2008 年我国在极区开展的加热实验中发现了 150~400 km 的大范围的电子温度增强, 增强幅度可达 60%~120%(徐彬等, 2009). 当加热电磁波入射到电离层中时, 电离层中的电子可以被加热电波引起的电子静电湍流效应加速, 电子在沿着地磁场方向运动的同时可与中性粒子碰撞产生光辐射. 光辐射的结构可受加热波束指向和电离层不规则体影响, 在加热波束指向磁天顶方向时具有最大值, 在加热频率等于 n 倍磁旋频率时具有最小值(Bernhardt et al., 1991; Mishin et al., 2003). 在上混杂谐振高度附近, 双流振荡不稳定性激发上混杂波, 可导致小尺度的场向不规则体的产生(Das and Fejer, 1979; Dysthe et al., 1983; Blagoveshchenskaya et al., 2007), 而热自聚焦不稳定性可以导致大尺度场向不规则体的产生(Grach et al., 1977; Guzdar et al., 1996), 不规则体又可对加热泵波进行散射, 产生异常吸收效应(Jones et al., 1984; Robinson, 1989; Gurevich et al., 1996), 利用高频调幅波调制电离层电流还可以引起 VLF/ELF 波的激发(Rietveld et al., 1984, 1987).

而作为宏观电离层参量以及加热效应分析的基础, 对电子密度与电子温度的加热扰动的研究一直被广泛关注. 加热实验中电子温度增幅可以相对较大, 如在 Arecibo 的夜间电离层加热实验中观测到

了 40% 的温度增强(~ 350 K)现象(Mantas et al., 1981). 在高纬度地区, 白天电离层状态比较稳定, 很多实验会在白天进行, 在实验中常会观测到 $\sim 50%$ 的电子温度增长(Stocker et al., 1992; Honary et al., 1993; Blagoveshchenskaya et al., 2011a), 但是相对白天来说夜间电子温度增强效应更明显, 温度增强甚至可以达到 300%(Rietveld et al., 2003). 早在 20 世纪 70 年代, Platteville 的电离层加热实验表明, 电离层对高频泵波的吸收显著增加了电离层电子温度并改变了电子密度的分布(Meltz and Perkins, 1974; Utlaut, 1975), 随后在 Arecibo 和 Tromso 的加热实验中也观测到了电子密度的扰动, 但扰动幅度通常只有百分之几的波动(Dubois et al., 1993; Fejer et al., 1991), 尽管在某些加热实验中观测到了反射高度附近 30% 电子密度的增强现象(Blagoveshchenskaya et al., 2011b), 但此类增强系由谐振区等离子体处于非平衡态, 基于平衡态非相干散射理论不再适用, 此时反演会产生严重的误差, 并非真正的电子密度增强, 2011 年我国利用 EISCAT 的加热设备和诊断设施开展的极区电离层加热实验中, 利用 UHF 雷达探测到了十分明显电子密度增强现象, 在远离谐振区的 300~500 km 及以上的高度增幅达 30%~50%. 依作者所知, 在如此大的空间范围内获得超过 30% 以上的电子密度增强现象实属首例.

2 实验描述

2011 年 11 月 23 日开展了极区电离层加热实验. 实验使用的加热设备位于挪威北部的 Tromso 附近, 69.59°N, 19.23°E. EISACT 加热设备有三个天线阵, 分别为阵列 1、阵列 2 和阵列 3, 加热频率覆盖范围分别为 5.4~8 MHz, 3.7~5.4 MHz 和 5.4~8 MHz. 为获取更优的加热效果同时与当地电离层临界相匹配, 加热天线采用阵列 1. 阵列 1 拥有 12 行 12 列的交叉偶极子, 增益可达 30 dB. 加热极化方式为 O 波加热, 加热波束指向地磁场方向(南向 12.5°), 加热循环采用 18 min 开, 12 min 关. 加热频率为 108 点的步进频率, 步进时间间隔为 10 s, 加热起止频率依据实时电离层状态进行调

整,具体设置如表 1. 诊断设备使用了 UHF 非相干散射雷达. 非相干散射雷达的观测模式为 beata 模式,该探测模式下空间探测范围为 76~670 km,空间分辨率为 3 km,时间分辨率为 5 s. 为配合加热实验, UHF 雷达的扫描模式使用了 CP1,即沿地磁场方向进行探测.

表 1 2011 年 11 月 23 日加热循环时间表

Table 1 Heating schedule on 23th November 2011

加热循环	加热开始时间	加热截止时间	加热频率(MHz)
循环 1	12:00	12:18	6.99722~6.70278
循环 2	12:30	12:48	6.70278~6.99722
循环 3	13:00	13:18	6.99722~6.70278
循环 4	13:30	13:48	6.70278~6.99722

3 GUISDAP 数据分析

EISCAT 官方给出了一个数据分析程序 GUISDAP (Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package)用于常规非相干散射数据的反演. 图 1 给出了当天加热实验中电子密度和电子温度随时间的变化特征. 从图中可以看到,在整个加热时段电子密度和电子温度的加热扰动特征均很明显,其中电子温度的增强基本局限在反射高度附近,属于小范围温度增强事件,这在以往的加热实验中亦经常出现,而电子密度却呈现出十分罕见的加热增强特

征,200 km 以上均出现了显著的增强效果. 一般地,电离层加热形成电子密度扰动的加热机制存在三种形式:一是加热引起电子温度增加(Rietveld et al., 2003; Stocker et al., 1992),进而导致电子的复合率下降(Gurevich, 1978),从而致使电子密度增强,然而这种密度增强幅度很小,最大增幅通常不足 10%;二是加热导致电子温度空间分布的不均匀和电波能量的空间分布不均匀,这使得电子从高温区向低温区,波密区向波疏区扩散,最终呈现为围绕反射点的峰谷结构,通常形成的密度谷小于 10% (Blagoveshchenskaya et al., 2011b);第三种密度扰动机制是泵波激发各种不稳定性过程,不稳定性过程生成超热电子,直接电离中性大气,这相当于改变了电子的生成率,从而导致电子密度大幅度增加.

在过去的加热实验中,尽管有时可以在反射高度附近观测到 30%的电子密度增强(Blagoveshchenskaya et al., 2011b),但事实上此类增强系由于反射高度附近是参量不稳定性发生的谐振区,该区域等离子体处于非平衡态,离子线谱的频谱结构发生了严重改变,基于平衡态非相干散射理论不再适用,此时利用离子线对电离层参量的反演会产生严重的误差,并非真正的电子密度增强,而本次实验中在如此广阔的高度范围发现电子密度增强实属罕见. 为进一步获取更为精细的加热特征,我们将加热时段的电子密度与未加热时段的电子密度进行了比较.

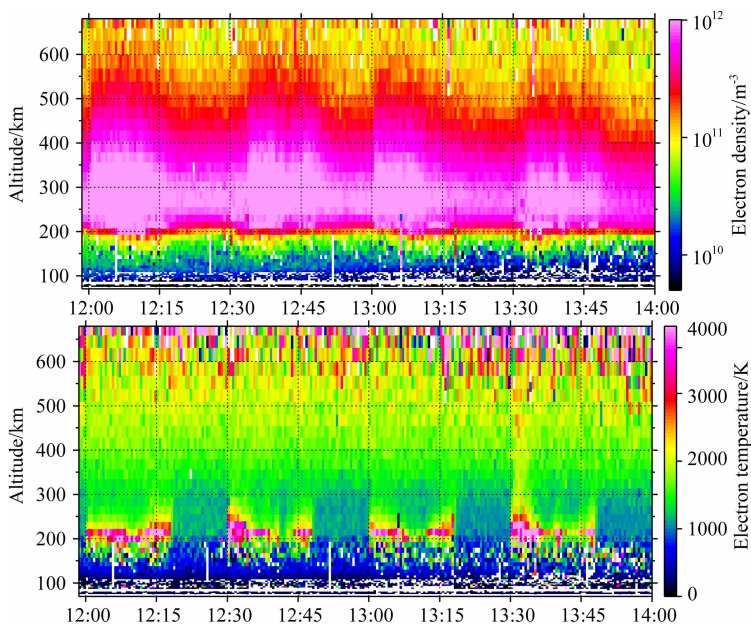


图 1 加热实验中电子温度与电子密度的时间演化

Fig. 1 The temporal evolution of electron temperature and electron density

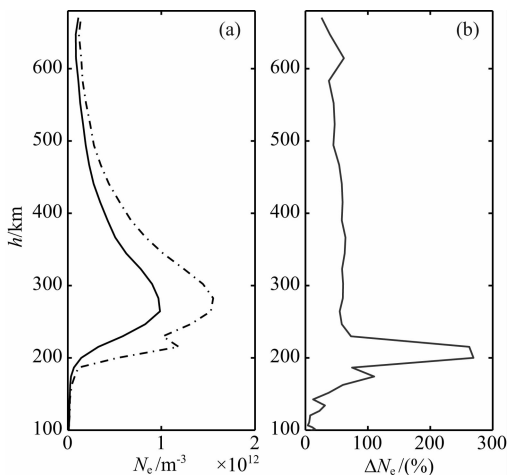


图2 加热引起的电子密度扰动

Fig. 2 Electron density disturbed by the HF-pump

如图2所示,其中图2a横坐标为电子密度,纵坐标为高度,实线为未加热时刻的电子密度,点划线为加热时段的电子密度,图2b为电子密度的增量百分比。

从图2中可以看到,200 km以上的高度范围均出现了电子密度的增强现象,210 km处的电子密度增强达到了269.3%。当然如上所述,这可能是由于平衡态非相干散射理论的本身缺陷引起的,即反射高度处的离子线谱在加热时段的谱型特征发生显著改变,此时再利用平衡态的反演模式将会有严重的误差,而在远离谐振区域的300 km以上的高度范围,电子密度的增强仍维持在30%~50%之间,这一密度增强特征是较为可信的。

4 离子线谱分析

为进一步确认加热引起的超强电子密度扰动特征的真实性和可靠性,我们对加热前后离子线谱进行了考察,如图3所示,其中图3a为未加热时刻的离子线谱,横轴为多普勒频率,纵轴为高度,不同的颜色代表功率幅度,单位为(K/kHz)。图3a使用12:18—12:22时段120 s的数据(最小积分时间为5 s,因此有24个数据文件)进行了累积,图3b为加热时段12:08—12:12,同样120 s的数据累积的离子线谱。从图中可以看到,在210 km附近存在一条很窄的亮线,其高度分布范围仅在1~2个距离门之内,频率分布范围约为±15 kHz,幅度较未加热时刻非相干散射离子线谱的幅度强,增幅近10倍。为获取更为清晰的加热前后谱特征的对比,我们给出了反射高度附近,以及更高的高度范围上的离子线

谱,如图4和图5所示,给出了200, 210, 221, 300, 400 km和500 km高度上的离子线频谱。其中横轴为多普勒频率,纵轴为功率,红实线为未加热离子线,蓝色虚线为加热时刻离子线。从图中可以看到,在反射高度(210 km),离子线回波功率幅度出现了很大的增强,从0.10 K/kHz增大到1.46 K/kHz,增幅近15倍,这一观测结果与我国近年来开展的极区加热实验观测到的结果有很好的 consistency (Cheng et al., 2013)。另外从谱型特征上看,频谱结构出现零频峰,一般我们认为这一谱型特征与纯增长模式相对应(Kohl et al., 1993),即此时加热泵波激发了等离子体的本征振荡,振荡过程的存在导致电子的密度分布函数不再遵循平衡态的麦克斯韦分布,因此此时使用基于平衡态理论的反演模型反演得到的电子密度、电子温度等电离层参量也是不可信的。平衡态下电离层中电子速度的方向是各向同性的,在非相干散射雷达的离子线谱中表现为较为平滑的双峰结构。电离层加热条件下,在谐振高度附近激发等离子体本征振荡,振荡方向沿地磁场方向。由于非相干散射雷达波束方向沿地磁场方向,因此从统计学上讲,沿雷达波束方向上的电子数目增多,表现为尖锐的离子线谱的双峰结构,如图4中给出的在加热前后200~221 km高度处的离子线谱。由于激发振荡过程引起的电子速度分布存在优势方向,导致的离子线谱面积增大、峰谷比增加,并不意味着,电子密度增加和电子温度升高。因此在谐振区附近,即图2中给出的210 km的电子密度269.3%的增强并不是真实的,是由于非相干散射理论模型的不适用引起的。同样在反射高度上下10 km处,加热前后离子线谱的谱型结构也发生了明显变化,反演所得的电子密度增强也是不真实的。而在更高的300, 400 km及500 km高度上,加热前后的谱型结构及回波功率幅度均没有发生明显改变,此时基于平衡态的非相干散射理论的反演模型是适用的,因此在这些高度上的分析得到的电子密度结果是真实的,即图2中显示的300 km以上的高度范围内电子密度出现30%~50%增强是真实可信的。

为了更进一步地确定该结果的正确性,我们对数据的残差进行了检验,来证明该电子密度的增强不是由于数据处理过程中的错误所导致的,残差的验证结果如图6所示。

图6中纵坐标表示高度,横坐标表示残差值,蓝实线表示加热时刻(12:12:00)不同高度的残差

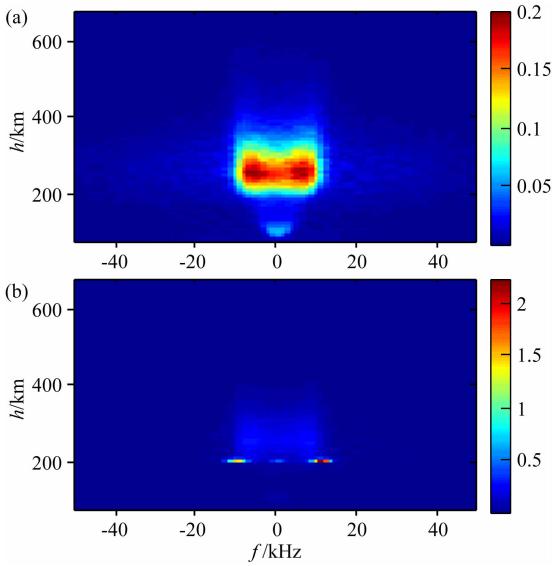


图 3 加热前后离子线伪彩色图

Fig. 3 Ion line with the HF-pump off or on

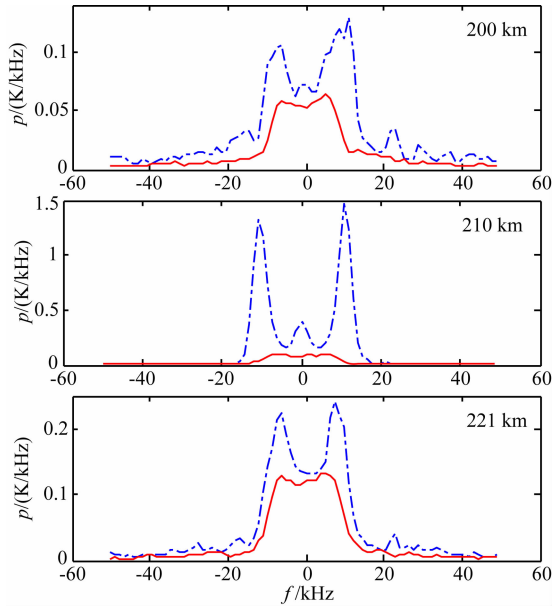


图 4 反射高度附近加热前后离子线谱

Fig. 4 Ion line spectrum around the reflection height with the HF-pump off or on

值,红实线表示未加热时刻(12:22:00)的残差值,结果表明,谐振区附近的残差很大.基于平衡态的非相干散射理论模型无法描述尖锐的离子线谱的双峰结构,拟合谱和实测谱的差距很大.因此,反射高度的反演理论是不成立的,即图 2 中给出的 210 km 的电子密度 269.3% 的增强并不是真实的,是由于非相干散射理论模型的不适用引起的.而图 5 中给出了 300~500 km 高度处加热前后的离子线谱,从图中可以看出,加热前后离子线谱的谱型特征没有发生明显改变,均为较为平滑的双峰结构,只是幅

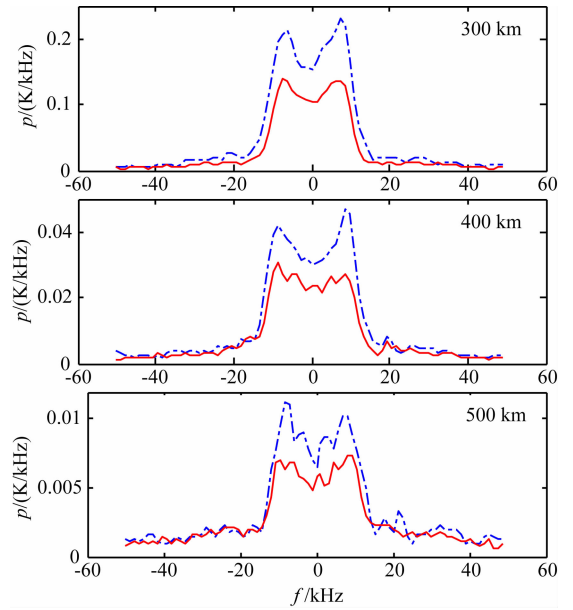


图 5 300~500 km 高度范围加热前后离子线谱

Fig. 5 Ion line spectrum at the altitude range of 300~500 km with the HF-pump off or on

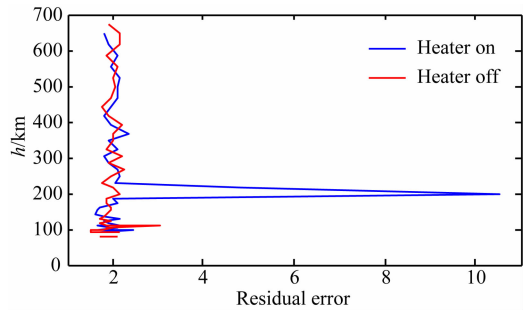


图 6 反演数据不同高度处的残差检验

Fig. 6 Residual error of data in different heights

度上略有增强.对比加热前后此高度范围内的残差没有明显的增加,拟合谱和实测谱符合得较好,此时非相干散射理论适用,即表明 300 km 以上的高度范围内电子密度出现 30%~50% 的增强是真实的.如前面所述,电离层加热形成电子密度扰动的加热机制存在三种形式,而前两种加热机制可产生的电子密度扰动较小,因此推断此次加热实验中电子密度的增加可能由于纯增长等不稳定性过程的激发对电离层中的电子加速,使之成为超热电子,超热电子能量足够大,足以电离中性大气,从而改变了电子的生成率,进一步导致了如此大范围内的电子密度增强现象,关于产生电子密度增强特征的物理机制的验证过程将在后面进行详细讨论.

综上所述,在如此广阔的空间范围,观测到 30%~50% 的电子密度增强现象尚属首例,这一实验结果对深入理解波与等离子体的相互作用的物理

机制具有十分重要的意义。

5 等离子体线谱分析

在加热实验中除观测到电子密度显著增强外, 等离子体线谱也出现了异常结构特征, 如图 7 所示, 横轴为多普勒频移, 纵轴为功率密度, 单位为 K/kHz, 在未加热时刻, 等离子体线的回波功率很小, 幅值在 0.025 K/kHz 以下, 如图 7a 所示; 当加热开启, 等离子体线回波功率会立即增强, 幅值可达 25 K/kHz 以上, 并且频谱结构出现了双等离子体线的增强结构, 如图 7b 所示. 一般地, 等离子体线的频谱结构与电子的速度分布函数有关, 在自然条件下, 电离层中的电子处于平衡状态, 其速度分布函数遵循麦克斯韦速度分布率:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/kT}, \quad (1)$$

式中 k 为玻耳兹曼常量, T 为温度. 其所对应的等离子体线谱如图 8 所示. 当加热实验开始时, 电离层中的部分电子会被加热产生的朗缪尔湍流加速, 由于电子的质量非常小, 在很短的时间内一部分的电子运动速度会迅速提高, 形成超热电子, 进而改变了电子的速度分布函数, 形成了平衡态电子与超热电子共存的状态. 加热时刻的电子速度分布函数及其等离子体线谱结构示意图如图 9a 所示, 黑实线

为平衡态电子速度分布函数, 蓝虚线为超热电子速度分布函数, 由于电子速度分布函数决定了等离子体线的频谱结构, 平衡态电子与超热电子共存的电子速度分布特性, 产生了双等离子体线增强的特征.

一般情况下, 电离层中电子热学能量的数量级为 0.1 eV 左右, 当电子的热学能量达到几电子伏特时, 便认为此电子为超热电子 (Carlson et al., 1982). 在电离层加热实验中, 电子在电磁波反射高度附近, 会由于某种不稳定性激发, 对电子产生很强的加速作用, 从而形成超热电子. 在以往的加热实验中也曾观测到超热电子的存在 (Carlson et al., 1982; Bernhardt et al., 1989), 我们利用电子的速度分布函数与等离子体线频谱的关系, 对加热中观测到的等离子体线双峰结构进行了仿真, 结果如图 10 所示. 图 10a 为电子的速度分布函数, 图 10b 为反演得到的等离子体线谱, 图 10c 为加热实验中实测的等离子体线谱, 从图中可以看出, 仿真得到的等离子体线谱与实测谱非常的相近. 仿真中, 为得到与实测结果相匹配的等离子体线的第二峰, 需要超热电子的最概然速度达到 $2.16 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而电子的热能量表达式为

$$E = \frac{m_e v_p^2}{2}, \quad (2)$$

此时最概然速率的电子热能量 E 为 13.28 eV,

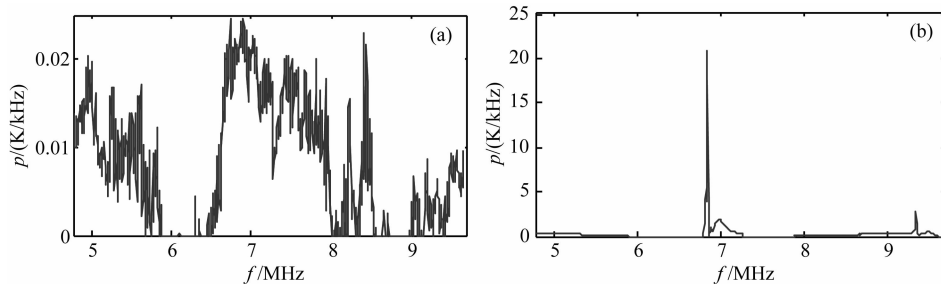


图 7 (a)未加热时和(b)加热时的等离子体线谱

Fig. 7 Plasma line spectrums with (a) the HF-pump off and (b) the HF-pump on

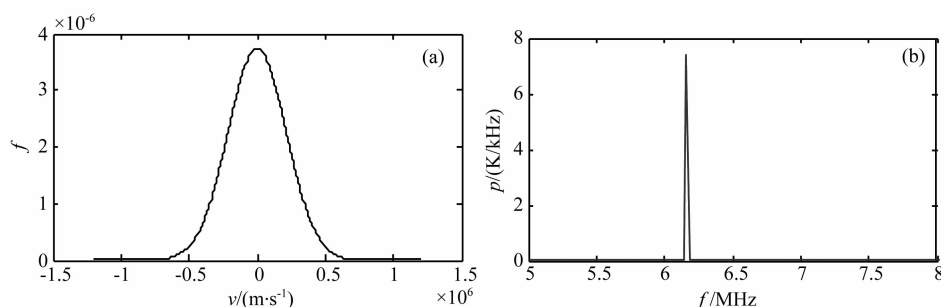


图 8 平衡态(a)电子速度分布示意图和(b)等离子体线谱示意图

Fig. 8 The schematic diagrams of (a) electron velocity distribution and (b) plasma line spectrum in an equilibrium state

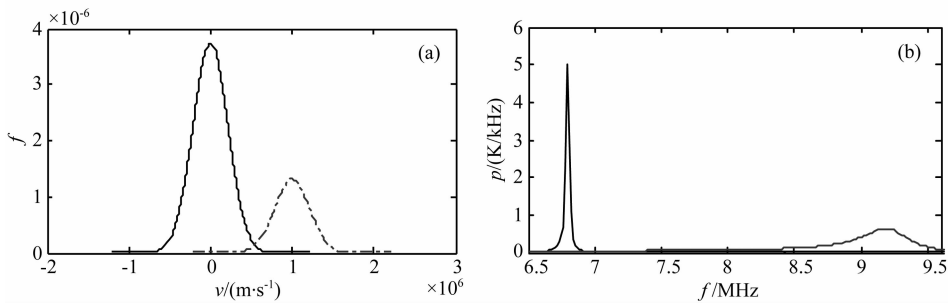


图9 加热时刻(a)电子速度分布函数示意图和(b)等离子体线谱结构示意图

Fig. 9 The schematic diagrams of (a) electron velocity distribution and (b) plasma line spectrum with the HF-pump on

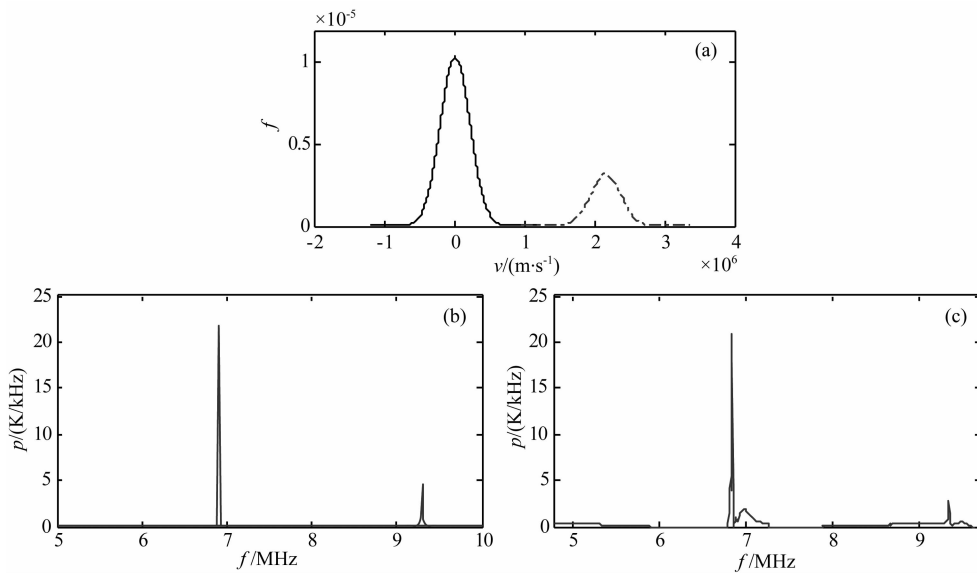


图10 (a)电子速度分布函数,(b)仿真的等离子体线谱,(c)等离子体线实测谱

Fig. 10 (a) Electron velocity distribution, (b) The simulated plasma line spectrum, (c) The observed plasma line spectrum in the experiment

Carlson 曾在他们的实验观测到了十几电子伏特到二十几电子伏特的超热电子(Carlson et al., 1982; Bernhardt et al., 1989), 表明仿真中使用的超热电子的能量在合理的范围内. 因此利用超热电子的速度分布函数对等离子体线谱进行仿真, 得到了比较满意的结果.

6 超热电子对电子密度的影响

下面来讨论超热电子对电子密度分布的影响, 电离层中的中性气体电离现象大致可分为两种, 第一种是光电离, 第二种是微粒电离. 光电离是指电离层中的中性粒子吸收了光子能量, 释放电子的现象. 而微粒电离通常是指高速运动的电子通过与中性粒子的碰撞, 使之电离. 对于不同种类的中性粒子, 超热电子将其电离需要不同的门槛能量, 而本

次实验中超热电子的能量达到了电离部分中性粒子的门槛能量(Straub et al., 1996), 即实验中产生的超热电子可以电离中性大气, 改变电子的生成率. 但在反射高度附近产生的超热电子是否可以到达 300 km 及以上高度, 改变那里的电子密度. 下面我们讨论超热电子的纵向自由程. 超热电子在纵向运动中, 沿着地磁场方向, 不会受到洛仑兹力发生偏转, 在这种情况下, 超热电子的自由程仅与超热电子的速度和碰撞频率相关. 我们对超热电子的自由程做了简单的估算, 超热电子的自由程与超热电子的速度、电子与中性粒子的碰撞频率相关, 即平均自由程

$$\lambda = \frac{v}{\nu_{en}}, \quad (3)$$

式中 v 表示超热电子速度, ν_{en} 表示电子与中性粒子的碰撞频率, 又由于电子的碰撞频率与离子的碰撞

频率有如下关系(Tanenbaum, 1968):

$$\nu_{en} = 0.357\nu_{in} \sqrt{\frac{m_i T_e}{m_e T_i}}, \quad (4)$$

式中 m_i 为离子质量、 m_e 为电子质量、 T_e 为电子温度、 T_i 为离子温度、 ν_{in} 为离子的碰撞频率. 根据 GUISDAP 对电离层加热实验数据的反演可以得到反射高度附近的离子碰撞频率为 $\nu_{in} = 0.244 \text{ s}^{-1}$, 由此可以推算出反射高度附近的 $\nu_{en} = 20.042 \text{ s}^{-1}$, 进而可以计算出最概然速率的超热电子的平均自由程为 $\lambda = 107.774 \text{ km}$, 因此纵向自由程为 $L = \lambda \sin I = 105.419 \text{ km}$ (I 为地磁场方向与地面的夹角). 表明超热电子可以达到 300 km 的高度, 由于此平均自由程为利用反射高度附近的碰撞频率计算, 实际情况中随着高度的上升大气中中性粒子的数密度下降, 因此离子与中性粒子的碰撞频率、电子与中性粒子的碰撞频率都会相应减小, 超热电子的平均自由程会相应地增加, 即超热电子纵向运动可以到达 300 km 以上的高度, 这就可以解释 300 km 以上高度的电子密度的增长现象. 由于相距 46.762 km 同步观测的 VHF 雷达观测不到电子密度的增长现象, 因此超热电子的横向自由程应小于 46.762 km, 而在横向方向上, 由于洛仑兹力的存在, 电子的磁旋半径为

$$r = \frac{m_e v}{eB}, \quad (5)$$

式中 m_e 为超热电子质量, e 为电子电量, v 为超热电子速度, B 为地磁场强度大小. 经过计算可以得到 $r = 0.25 \text{ m}$, 表明 VHF 雷达的确观测不到电子密度的大范围增长现象, 与实际情况相吻合.

经过以上分析, 表明 2011 年的加热实验中大范围的电子密度增强现象系由于超热电子电离中性大气, 改变了电子的生成率, 从而使电子密度显著增强.

7 结论

2011 年 11 月我国开展了极区电离层加热实验, 实验中利用 EISCAT 的 UHF 非相干散射雷达探测到了明显的电子密度和电子温度扰动特征, 其中在加热时段内电子温度明显增强, 但空间范围仅局限在反射高度附近, 属于空间小范围温度增强事件, 而电子密度在很大的空间范围内均出现了强烈的增强特征, 反射高度附近电子密度最大增幅可达 269.3%, 而在远离谐振区的 300 km 以上的高度增

幅也可达 30%~50%. 通过对加热前后不同高度离子线谱和残差的对比分析, 表明反射高度附近的 269.3% 电子密度增幅是不真实的, 系由于反射高度附近不稳定性等谐振过程发生, 使得离子线谱的频谱结构和幅度均发生了异常改变, 此时基于平衡态的电离层参量反演技术不适用, 因此导致反演结果存在严重的误差, 而在远离谐振区 300 km 以上的高度, 离子线谱从幅度到频谱结构均未发生明显异常改变, 因此在这一高度范围内产生的 30%~50% 的电子密度增长是真实的. 另外 UHF 雷达探测到了等离子体线谱的双谐振峰结构, 本文利用等离子体线频谱结构与电子速度分布函数的关系, 推测实验中观测到的电子密度增强特征系由于加热实验中产生了超热电子, 超热电子的能量足够大, 可以直接电离中性大气, 即改变了电子的生成率, 进而致使电子密度出现了大范围增强的特征. 同时本文对实验中观测到的等离子体线谱进行了仿真, 并利用仿真中使用的超热电子的能量对超热电子的电离能力、横向和纵向自由程进行了计算, 验证了该物理机制的合理性. 对超热电子电离高度剖面的计算及对超热电子产生的物理机制的研究, 建立相应数值仿真模型是我们下一步重点所要开展的工作.

致谢 作者特别感谢两位审稿专家对本文研究工作提出的建设性修改意见及建议.

References

- Bernhardt P A, Tepley C A, Duncan L M. 1989. Airglow enhancements associated with plasma cavities formed during Ionospheric heating experiments. *J. Geophys. Res.*, 94(A7): 9071-9092.
- Bernhardt P A, Scales W A, Grach S M, et al. 1991. Excitation of artificial airglow by high power radio waves from the "SURA" ionospheric heating facility. *Geophys. Res. Lett.*, 18(8): 1477-1480.
- Blagoveshchenskaya N F, Borisova T D, Kornienko V A, et al. 2007. Some distinctive features in the behavior of small-scale artificial ionospheric irregularities at mid-and high latitudes. *Radiophysics & Quantum Electronics*, 50(8): 619-632.
- Blagoveshchenskaya N F, Borisova T D, Rietveld, M T, et al. 2011a. Results of russian experiments dealing with the impact of powerful HF radiowaves on the high latitude-ionosphere using the EISCAT facilities. *Geomagnetism and Aeronomy*, 51(8): 1109-1120.
- Blagoveshchenskaya N F, Borisova T D, Yeoman T K, et al. 2011b. Artificial small-scale field-aligned irregularities in the high latitude f region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave. *Geophys. Res. Lett.*, 38(8), L08802, doi: 10.1029/2011GL046724.
- Carlson H C, Wickwar V B, Mantas G P. 1982. Observations of

- fluxes of suprathermal accelerated by HF excited instabilities. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 44(12): 1089-1100.
- Cheng M S, Xu B, Wu Z S, et al. 2013. Observation of VHF incoherent scatter spectra disturbed by HF heating. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105-106: 245-252.
- Das A C, Fejer J A. 1979. Resonance instability of small-scale field-aligned irregularities. *J. Geophys. Res.*, 84(A11): 6701-6704.
- Dubois D F, Hanssen A, Rose H A, et al. 1993. Space and time distribution of HF excited Langmuir turbulence in the ionosphere: comparison of theory and experiment. *J. Geophys. Res.*, 98(A10): 17543-17567.
- Dysthe K B, Mjølhus E, Pécseli H L, et al. 1983. A thermal oscillating two-stream instability. *Physics of Fluids*, 26(1): 146-157.
- Fejer J A, Sulzer M P, Djuth F T. 1991. Height dependence of the observed spectrum of radar backscatter from HF-induced ionospheric Langmuir turbulence. *J. Geophys. Res.*, 96(A9): 15986-16008.
- Gordon W E, Showen R, Carlson H C. 1971. Ionospheric heating at Arecibo: first tests. *J. Geophys. Res.*, 76(31): 7808-7813.
- Grach S M, Karashtin A N, Mityakov N A, et al. 1977. Parametric interaction between electromagnetic radiation and the ionospheric plasma. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 20(12): 1254-1258.
- Gurevich A V. 1978. *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere*. New York: Springer.
- Gurevich A V, Lukyanov A V, Zybin K P. 1996. Anomalous absorption of powerful radio waves on the striations developed during ionospheric modification. *Physics Letters A*, 221(6): 363-372.
- Guzdar P N, Chaturvedi P K, Papadopoulos K, et al. 1996. The self-focusing instability in the presence of density irregularities in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 101(A2): 2453-2460.
- Honary F, Stocker A J, Robinson T R, et al. 1993. EISCAT observations of electron temperature oscillations due to the action of high power HF radio waves. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 55(10): 1433-1435, 1437-1448.
- Huang W G, Gu S F, Gong J C. 2004. Ionospheric heating by powerful high-frequency radio waves. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 19(3): 296-301.
- Jones T B, Robinson T R, Stubbe P, et al. 1984. Frequency dependence of anomalous absorption caused by high power radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 46(2): 147-153.
- Kohl H, Kopka H, Stubbe P, et al. 1993. Introduction to ionospheric heating experiments at Tromsø—II. Scientific problems. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 55(4-5): 601-613.
- Mantas G P, Carlson H C, LaHoz C H. 1981. Thermal response of the F region ionosphere in artificial modification experiments by HF radio waves. *J. Geophys. Res.*, 86(A2): 561-574.
- Meltz G, Perkins F W. 1974. Ionospheric modification theory: past, present, and future. *Radio Science*, 9(11): 885-888.
- Mishin E, Burke W J, Pedersen T. 2003. On the onset of HF-induced airglow at HAARP. *J. Geophys. Res.*, 109(A2), doi: 10.1029/2003JA010205.
- Rietveld M T, Barr R, Kopka H, et al. 1984. Ionospheric heater beam scanning: a new technique for ELF studies of the auroral ionosphere. *Radio Science*, 19(4): 1069-1077.
- Rietveld M T, Mauelshagen H P, Stubbe P, et al. 1987. The characteristics of ionospheric heating-produced ELF/VLF waves over 32 hours. *J. Geophys. Res.*, 92(48): 8707-8722.
- Rietveld M T, Kosch M J, Blagoveshchenskaya N F, et al. 2003. Ionospheric electron heating, optical emissions and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: aspect angle dependence. *J. Geophys. Res.*, 108(A4), 1141, doi: 10.1029/2002JA009543.
- Robinson T R. 1989. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves. *Phys. Rep.*, 179(2-3): 79-209.
- Robinson T R, Honary F, Stocker A J, et al. 1996. First EISCAT observations of the modification of F-region electron temperatures during RF heating at harmonics of the electron gyro frequency. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58(1-4): 385-395.
- Stocker A J, Honary F, Robinson T R, et al. 1992. EISCAT observations of large scale electron temperature and electron density perturbations caused by high power HF radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 54(11-12): 1555-1572.
- Straub H C, Renault P, Lindsay B G, et al. 1996. Absolute partial cross sections for electron-impact ionization of H₂, N₂, and O₂ from threshold to 1000 eV. *Phys. Rev. A*, 54(3): 2146-2153.
- Tanenbaum B S. 1968. Continuum theory of Thomson scattering. *Phys. Rev.*, 171(1): 215-221.
- Utlaut W F. 1975. Ionospheric modification induced by high-power HF transmitters—a potential for extended range VHF-UHF communications and plasma physics research. *Proceedings of the IEEE*, 63(7): 1022-1043.
- Wang Z G, Xu B, Xu Z W, et al. 2012. A comparison of numerical simulation and measurements during ionospheric heating. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(3): 751-759, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.004.
- Xu B, Wu J, Wu Z S, et al. 2008. The temperature enhancement induced by ionosphere heating in low altitude region. *Progress in Natural Science*, 18(11): 1339-1343.
- Xu B, Wu J, Wu J, et al. 2009. Observations of the heating experiments in the polar winter ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(4): 859-877, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.002.

附中文参考文献

- 黄文耿, 古士芬, 龚建村. 2004. 大功率高频无线电波加热电离层. *电波科学学报*, 19(3): 296-301.
- 王占阁, 徐彬, 许正文等. 2012. 极区电离层加热的数值模拟与实验对比. *地球物理学报*, 55(3): 751-759, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.004.
- 徐彬, 吴军, 吴健等. 2009. 我国极区冬季电离层加热实验研究. 我国极区冬季电离层加热实验研究. *地球物理学报*, 52(4): 859-877, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.002.