第3卷 第3期 空间科学学报 Vol. 3, No. 3
1983 年 7 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 1983

电离层人工加热实验中等离子体线的涨落

王 龙
(中国科学院物理研究所)

摘 要

为研究高频电磁波在电离层等离子体中激发的等离子体线的涨落，一组电离层加热实验完成于波多黎各的 Arecibo 射电天文台. 激发的等离子体线的强度随时间的涨落与平均加热功率有关. 当等离子体受到充分激发时，随平均加热功率增加，涨落的重复频率增加，涨落减弱且变得无规则. 当峰值功率或脉冲长度改变时，涨落的改变表现为重复周期的汇合或分裂. 离子线的涨落与等离子体线的涨落相关，但重复频率较高. 对所观测的现象提出了一种解释.

一、引 言

电离层的人工加热实验[1]已有十余年的历史. 在这些实验中，观测到了各种不同的加热效应，但仍存在一些基本问题未能得到满意的解释. 在加热过程中激发的等离子体线的涨落就是其中之一.

关于等离子体线的涨落的观测结果，散见于一些文献[1-3]. 这一现象就是：高频加热电磁波所激发的等离子体线呈现从秒、分以至小时的不同时间尺度的涨落，谱线的功率可在几分钟内变化 2 到 3 个量级. 这一涨落现象几乎可在任何实验时间，不同的加热功率、频率时观察到. 前人曾测量过这个涨落的频谱[2]. 但迄今为止，尚缺乏对这一现象的系统研究，特别是对于这一现象的实质，尚无满意的解释.

本实验分别于 1981 年 4 月、8 月，以及 1982 年 3 月完成于波多黎各的 Arecibo 射电天文台. 在这些实验中，研究了等离子体线涨落与平均加热功率的关系，观察了当平均加热功率改变时，等离子体线涨落的变化，并在同一时间内记录了等离子体线，离子线，或者高频加热电磁波的回波信号的强度，以比较它们的涨落. 这些实验取得了一些有趣的结果.

以下各节分别描述了实验装置、条件，叙述了实验结果，并给出了解释，且作出了必要的讨论与结论.

二、实验装置与实验条件

本实验中所用的 Arecibo 高频加热装置的运行频率为 5.1MHz，7.3MHz，8.175MHz

本文于 1982 年 12 月 4 日收到.

和 8.179MHz. 采用连续发射或不同重复频率、脉冲长度的脉冲模式. 装置垂直向上发射O模电磁波. 所采用的天线为 32 个对数周期天线元的列阵，增益为 23db，所发射的电磁波束半功率宽度角与频率有关，大约为 10°.

实验都是在晚上(18:00—24:00)进行.此时，上述加热频率相当于电离层中 F 区的大约 150—250km 高度处的局部电子等离子体频率. 从非相干散射测量结果计算得出这样高度处的密度梯度标量高度 $L = n\Big/\left(\frac{dn}{dz}\right)$ 大约为 30—50km.

所用的非相干散射雷达运行于 430MHz，峰值功率为 2MW，束宽为 1/6 度. 304 米直径的反射面用于发射诊断脉冲和接收散射信号. 所接收到的等离子体线的频率为 $f_T \pm f_P$，中其 f_T 为非相干散射雷达的频率，f_P 为电子等离子体波的频率，由一些谱线组成，接近于高频加热频率；加减号相应于上、下边频，分别由诊断电磁波在向下和向上传播的电子等离子体波上的散射而产生. 此外，为了得到接近非相干散射雷达频率的离子线，使用了十三比特的巴克编码[4]，此时的高度分辨率为 600 米.

非相干散射雷达所发射脉冲的典型宽度为 1.5ms. 散射信号被接收后，经过与本地振荡混频、滤波、放大，通过一个计算机程序对 20—100 个脉冲平均，将所得信号的功率记录下来. 改变本地振荡频率，即可选择所记录的谱线. 每一记录的取样时间为 5—10 秒.

实验后，作出不同谱线功率的峰值随时间的变化以研究它们的涨落.

三、实 验 结 果

在这些实验中，观察到了电子等离子体波信号的准周期性的涨落.

图 1—3 表示了下边频等离子体线功率随时间的涨落，其加热频率为 5.1MHz，峰值加热功率为 200kW，运转模式分别为 10/50 (即脉冲长度 10ms，重复周期 50ms)，40/50，以及连续波. 从图上可得出如下结论:

(1) 脉冲长度越大，涨落的重复频率越高;

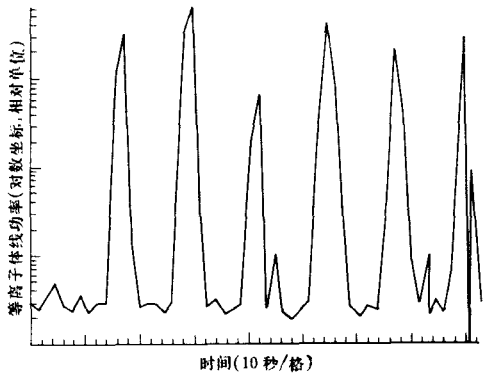

图 1 下边频等离子体线的功率随时间的变化
10/50 脉冲模式 200kW 峰值功率
1981 年 8 月 3 日 $20^h30^m21^s$—$20^h37^m13^s$
$f_{HF} = 5.1$MHz

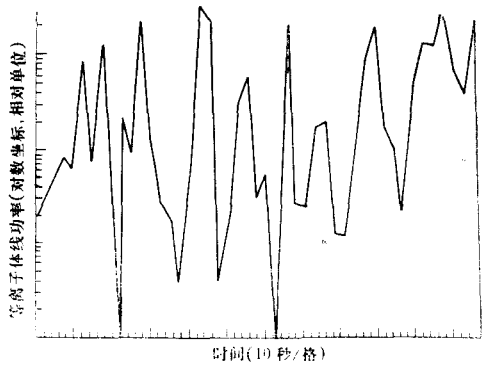

图 2 下边频等离子体线的功率随时间的变化
40/50 脉冲模式 200kW 峰值功率
1981 年 8 月 3 日 $21^h23^m19^s$—$21^h33^m05^s$
$f_{HF} = 5.1$MHz

(2) 脉冲长度越大，涨落越弱，越不规则，脉冲长度小时，涨落较强且规则.

图 1 所示的是一个典型的强而规则的等离子体线涨落. 等离子体线的功率在一分钟内变化了三个量级.

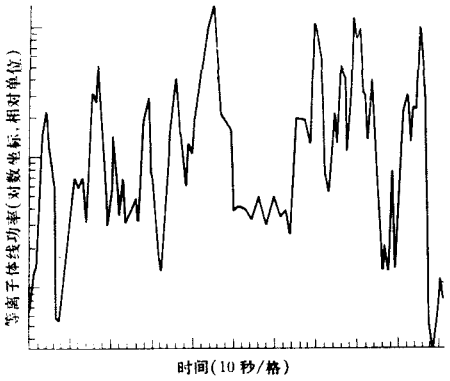

图 3　下边频等离子体线的功率随时间的变化
连续波 200kW 峰值功率
1981 年 8 月 6 日 $20^h13^m40^s$—$20^h22^m01^s$
$f_{HF}=5.1$MHz

图 4 的条件为 40/50 模式以及 300kW 的高频加热峰值功率. 与图 2 相比较，在同样的脉冲模式下，等离子体线的涨落与峰值功率有关. 对较高的加热功率 (图 4)，这一涨落的重复频率较高，振幅较低，变化较无规则.

总之，等离子体线的涨落取决于平均高频加热功率 (峰值功率×脉冲长度/重复周期). 涨落的重复周期可作为平均功率的函数，如图 5 所示. 一般来说，重复周期随平均功率增加而减少.

但是，从图 5 可明显看出，重复周期并不是平均功率的单值函数，而是有一定的分布，特别在平均加热功率很低时，更是如此. 相应于很低的激发功率，高重复频率的涨落的振幅很小且很不规则，如图 6 所示，可把这种形式的涨落解释为一种自然的涨落. 当高频电磁波

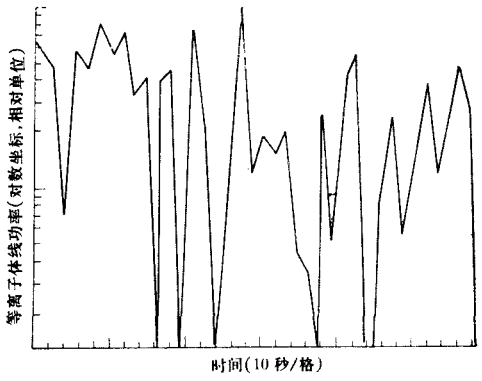

图 4　下边频等离子体线的功率随时间的变化
40/50 脉冲模式 300kW 峰值功率
时间:1981 年 8 月 4 日 $20^h59^m11^s$—$21^h04^m04^s$
$f_{HF}=5.1$MHz

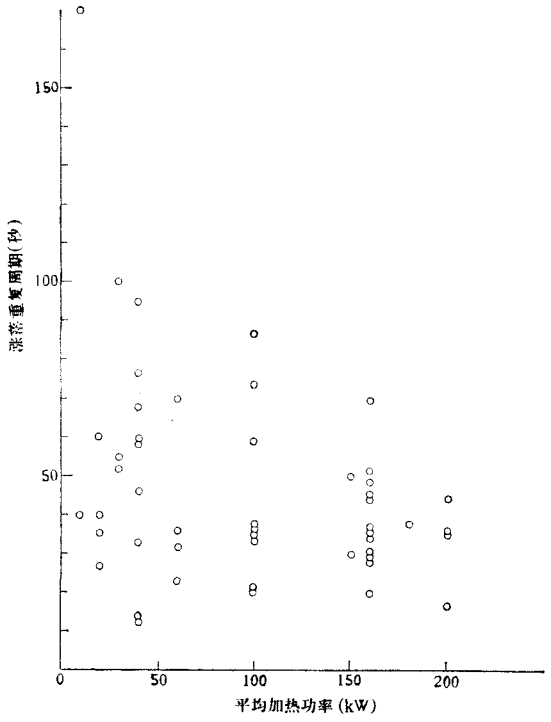

图 5　下边频等离子体线的涨落重复周期作为平均加热功率的函数

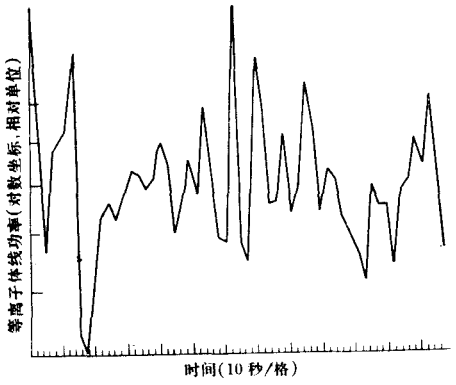

图 6 下边频等离子体线的功率随时间的变化
10/50 脉冲模式 100kW 峰值功率

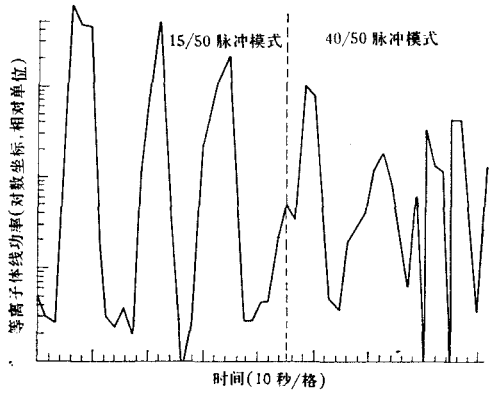

图 7 当平均加热功率增加时,等离子体线涨落的重复频率的变化
时间: 1981 年 8 月 3 日 $20^h38^m31^s$—$20^h45^m16^s$
$f_{HF}=5.1$MHz

的功率很低,电离层未受到充分激发时,自然涨落是涨落的主要成份.

也就是说,当平均的加热频率很低或很高时,等离子体线的涨落都很弱,无规则且重复频率高. 在二者之间,存在着一个最佳的平均加热功率值,这时可得到强的,规则的等离子体线的涨落. 这个值大约为 40—50kW.

如果改变高频加热脉冲的长度或其峰值功率, 则等离子体线的涨落以一种特殊的形式随之改变. 当平均加热功率改变一段时间以后,重复频率的改变并不表现为频率的逐渐漂移,而是当激发功率增加,一个重复周期分裂为两个或多个;当激发功率减少,多个重复周期合并为一,见图 7、图 8. 在图 7 中,当高频加热脉冲从 10/50 模式改变到 40/50 模

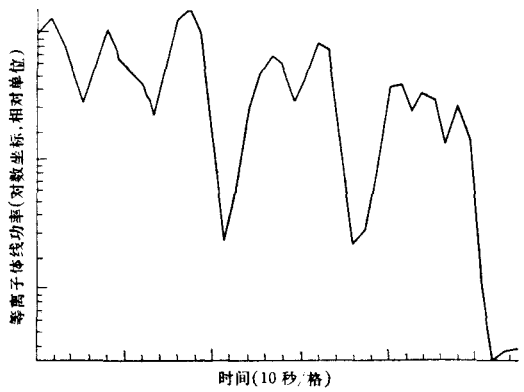

图 8 当平均加热功率减少时,等离子体线涨落的重复频率的变化
$18^h42^m00^s$ 从连续波改为 10/20 脉冲模式
峰值功率 200kW $f_{HF}=8.179$MHz
时间: 1981年 4 月 24 日 $18^h53^m30^s$—$18^h58^m04^s$

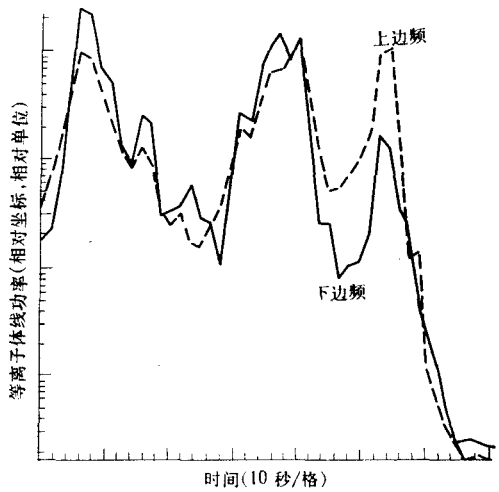

图 9 上边频与下边频等离子体线的功率随时间的变化
10/20 脉冲模式 200kW 峰值功率
时间: 1981 年 8 月 6 日 $18^h59^m21^s$—$19^h06^m41^s$
$f_{HF}=5.1$MHz

式以后，重复周期发生分裂，振幅减少．在图 8 中，高频加热电磁波在此图所示的开始时间前十一分钟从连续波改变为 10/20 模式的脉冲系列，在此图所示的时间内，两或三个重复周期合并为一个，且涨落振幅有所增加．

显然，等离子体线涨落的变化相对于高频加热电磁波的改变存在一个延迟．延迟时间从一分多钟到几十分钟不等．这一长时间的“条件效应”[5] 是等离子体线的涨落重复周期作为平均加热功率的函数(图 5) 呈一个分

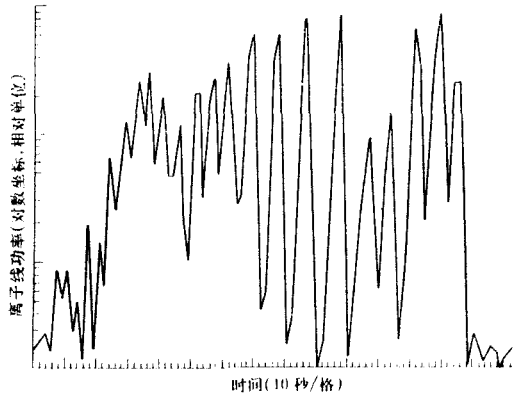

图 10　离子线功率随时间的变化
10/20 脉冲模式 150kW 峰值功率
时间：1981 年 4 月 24 日 $17^h49^m27^s$—$18^h02^m08^s$
$f_{HF}=8.175$MHz

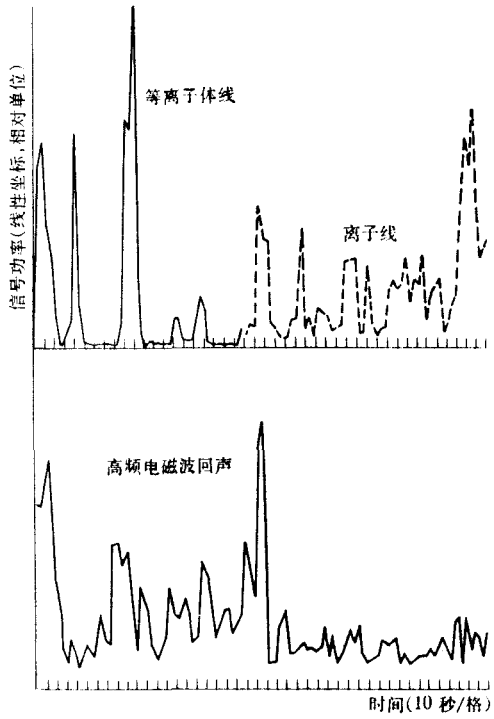

图 12　高频电磁波回波和等离子体线(实线)或离子线(虚线)功率随时间的变化
连续波 200kW 功率
时间：1982 年 3 月 19 日 $20^h03^m58^s$—$20^h11^m56^s$
$f_{HF}=8.179$MHz

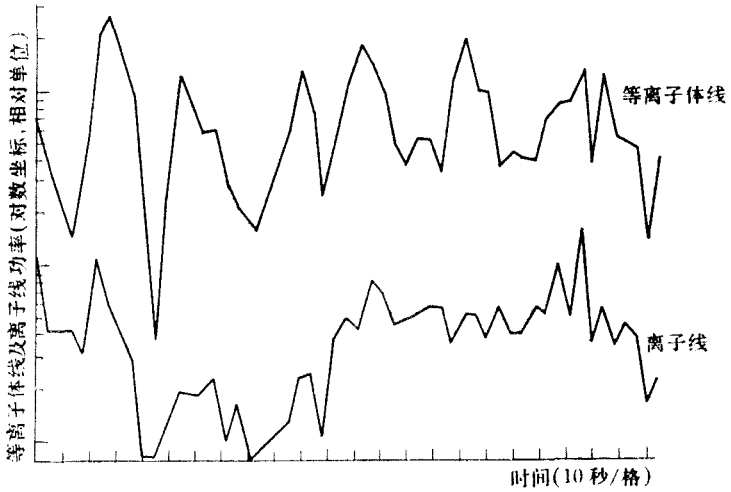

图 11　下边频等离子体线及离子线功率随时间的变化
10/50 脉冲模式 300kW 峰值功率
时间：1981 年 8 月 3 日 $19^h07^m57^s$—$19^h11^m56^s$
$f_{HF}=5.1$MHz

布的另一原因. 对于每一实验点来说,相应平均加热功率持续的时间可能并不一样,而涨落和这一历史有关,因而涨落的重复周期不简单地只是平均加热功率的单值函数.

从图 9 可以看出,在同一时间里上边频与下边频等离子体线的涨落大体上是一致,这同某些先前的结果相符合[2].

典型的离子线的涨落如图 10 所示. 与等离子体线一样,在平均加热功率增加时,离子线的涨落也同样地变得弱而无规则.

图 11 比较了等离子体线与离子线在同一时间的涨落. 二者基本上同步,只是在细节上有所差异,特别是,离子线的重复频率较高.

图 12 为同一时间记录的两种信号的涨落. 一个是高频加热电磁波的反射信号,另一个是等离子体线或离子线. 它们之间并不相关,但主要涨落重复频率约为同一量级.

四、解 释

高频电磁波所激发的等离子体线的准周期性时间变化是电离层加热实验中最引人注目的结果之一. 一些学者对这一现象提出了几种解释[2,3,6,7].

其中一种解释认为[6],这种涨落是由于所探测的等离子体波发生的高度相对于入射电磁波和反射电磁波在反射高度附近形成的 Airy 函数驻波结构的一系列极大值与极小值的移动而产生的. 而这种移动来源于高频电磁波加热改变了电子密度的高度分布或电离层参数的自然变化.

本实验结果很难用这种机制来解释. 这是因为

(1) 如果等离子体线的涨落决定于探测高度相对于 Airy 函数场结构的移动,高加热功率时的振荡振幅应比低加热功率时高. 但实际上,当加热功率增高时,涨落振幅减小.

(2) 当加热功率改变时,由上述移动引起的涨落重复频率的变化应该是连续的. 因此,这一机制不能解释如图 7、8 所示的重复周期的分裂与汇合.

而 L. M. Duncan 等人[7]把这种等离子体的涨落看作是由于自聚焦过程在电离层中产生的密度条纹结构水平漂移的结果. 他们把诊断雷达束很快地扫过相互作用区域探测到了这一条纹结构,得到的漂移速度约为 25m/s, 条纹线度在 500 米以上.

本实验结果也可用上述高频电磁波在电离层中产生的二维结构的漂移来解释.

正如文献 [7] 所指出,由于电磁波的自聚焦作用,在电离层加热中形成了大尺度的密度不均匀性条纹. 形成条纹的功率阈值正比于 $1/\lambda^2$, λ 为所激发条纹的宽度.

因此,如果漂移速度一定,较高的加热功率可产生窄的条纹宽度,相应于等离子体波涨落的高重复频率. 这一结论与我们的实验结果一致.

按照这一机制,当加热功率改变时,高频电磁波所产生的条纹应发生分裂和汇合,由此可解释等离子体线涨落重复周期的分裂和汇合.

在这些实验中,发现离子线的涨落基本上与等离子体线的涨落一致. 这是因为,等离子体线的主要频率成份是参量不稳定性产生的衰变线, 其频率与波数必须满足下列匹配条件:

$$\begin{cases} \omega_o = \omega_e + \omega_i, \\ k_o = k_e + k_i. \end{cases} \tag{1}$$

其中，下标 o，e，i 分别表示电磁波、电子等离子体波和离子声波．在电离层加热情况下，$k_o \ll k_e, k_i$，因此 $k_e \approx k_i$．但这仅在共振区域是正确的．当它们传播到共振区域以外时，由于一定频率的电子等离子体波的波数是高度的函数，则它与离子声波的波数不再相等．再则，若给定传播方向，在一定高度，仅有一组解满足匹配条件(1)和色散关系．因此，所观测的等离子体线和离子线（$k_e \approx k_i \approx 2k_T$，$T$ 表示非相干散射雷达）产生于同一高度，因而，以同一方式涨落．但是，由于离子声波的波数在向上下传播时几乎不变，离子声波可在由巴克编码所决定的 600 米的高度分辨率范围内的不同高度上探测到，因而受不同高度密度涨落的影响．等离子体线与离子线涨落的重复频率有所不同说明密度涨落的条纹结构在不同高度上有所变化．

至于高频电磁波的回波信号的涨落与等离子体线及离子线的涨落无关这一事实是因为它们来源于不同高度．高频电磁波回波来源于反射点附近，而波数与诊断非相干散射雷达波匹配的等离子体波及离子声波则来源于反射点以下约 1 公里处．此外，非相干散射雷达所探测的等离子体波及离子声波来源于水平方向非常窄（约 2km）的区域，而高频波回波可能来自一个很宽的区域．而且，由于密度涨落，所收到的高频波回波的反射点可能随时间在水平或垂直方向移动．再者，涨落引起反射面的变化可能产生聚焦或发散效应，引起接收到的回波信号强度的变化，类似闪烁效应．因此，高频波回波的涨落的起源很复杂，表现为与等离子波及离子声波不同的特征．

五、结　　论

本实验结果表明，高频电磁波所激发的等离子体线的涨落是加热所形成的电子密度条纹水平漂移的结果．因此，通过研究这一涨落现象，可以得到关于加热引起的电离层中密度扰动结构的信息．

当采用高功率高频电磁波照射电离层时，产生了条纹结构．若加热功率非常低，这一结构主要由自然密度涨落所决定．当加热功率达到一定值时，条纹变成宽的规则结构．但若平均加热功率进一步增加，条纹将分裂、变细且无规则．相反，若平均加热功率从很高的值减少，条纹互相汇合、变宽．

等离子体线与离子线的涨落相关，但频率有所不同，这是因为它们起源于同一高度但探测区域范围有所不同．

高频波回波信号的涨落与等离子体波及离子声波无关，因为它们的产生高度和机制不同．

本实验工作完成于美国国家科学基金会所属、康奈尔大学所管理的 Arecibo 天文台．在此对 G. J. Morales 教授、黄耀辉教授、R. A. Behnke 博士、L. Duncan 博士、J. Santoru、C. Darrow 在工作中给予的支持表示感谢．

参 考 文 献

[1] Calson, H. C. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. **77**, p. 1242, 1972.
[2] Kantor, I. J., *J. Geophys. Res.*, Vol. **79**, p. 199, 1974.
[3] Calson, H. C. & Duncan, L. M., *Radio Science*, Vol. **12**, p. 1001, 1977.
[4] Ioannidis, G. & Farley, D. T., *Radio Science*, Vol. **7**, p. 763, 1972.
[5] Morales, G. J. et al., *Radio Science*, Vol. **17**, p. 1313, 1982.
[6] Fejer, J. A., *J. Geophys. Res.*, Vol. **77**, p. 273, 1972.
[7] Duncan, L. M. & Behnke, R. A., *Phys. Rev. Letters*, Vol. **41**, p. 998, 1978.

FLUCTUATION OF PLASMA LINE IN THE IONOSPHERIC MODIFICATION EXPERIMENT AT ARECIBO

Wang Long
(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

Abstract

A series of ionospheric modification experiments were conducted at the Arecibo Observatory to research the fluctuation of the plasma lines enhanced by the high frequency electromagnetic waves. The temporal fluctuation of the power of enhanced plasma line depends on the average heating power. When the plasma is excited efficiently, the fluctuation repetition frequency increases and the fluctuation becomes erratic and weak with the increase in the average heating power. When the peak power or the pulse length is changed, the fluctuation changes by merging or spliting of the repetition cycles. The fluctuation of ion lines is correlated with that of plasma lines, but has higher repetition frequency than plasma line. An explanation has been suggested for the observed phenomena.