

# 等离子体低目标特征技术原理( I )\*

王 龙<sup>1 †</sup> 张海峰<sup>2</sup> 邵福球<sup>2</sup>

(1 中国科学院物理研究所 北京 100080)

(2 国防科学技术大学 长沙 410073)

**摘 要** 介绍了等离子体低目标特征技术原理和主要研究课题,包括从地面到高空的大气环境,在大气环境下的等离子体产生方法,等离子体的维持和演化,2—18GHz 的电磁波和等离子体的相互作用.所涉及的主要技术问题是—定密度和体积的等离子体的产生方法,主要物理问题是等离子体和束流的相互作用.

**关键词** 等离子体,低目标特征技术,飞行器

## Principle of plasma low target feature technique ( I )

WANG Long<sup>1 †</sup> ZHANG Hai-Feng<sup>2</sup> SHAO Fu-Qiu<sup>2</sup>

(1 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2 National University of Defence Science and Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** The principle of low target feature plasma technology and several related research topics are reviewed, including the atmospheric environment from the ground to high altitudes, ways of producing plasma in such an environment, the maintenance and evolution of the plasma, and interactions of the plasmas with electromagnetic waves at frequencies of 2—18 GHz. The key technological problem is how to produce plasmas with sufficiently large density and volume. The main physical problem is the interaction of the plasma with aerodynamic flow.

**Key words** plasmas, low target feature technique, aircraft

## 1 引言

### 1.1 工作原理

飞行器的等离子体低目标特征技术系指在飞行器表面产生等离子体,吸收或折射电磁波以减少雷达反射截面而达到不被发现的目的.

作为低目标特征技术的一种方案——等离子体方案主要和在飞行器表面涂敷微波吸收材料的方法相比.它的优点是具有较宽的带宽.当然这带宽依赖具体的等离子体参数.此外,它具有开关性能.这一特点可用于天线部位(图1).当天线工作时,不使用等离子体;当天线工作完毕,等离子体可很快产生并吸收电磁波<sup>[1]</sup>.至于这一方法的缺点和困难,主要来源于等离子体和环境的相互作用.

等离子体低目标特征技术的基本原理如下:电磁波入射到等离子体中时,其波动电场引起等离子体中的带电粒子以同一频率作规则振动.当这些带电粒子和其他粒子碰撞时,这种规则振动就会转化

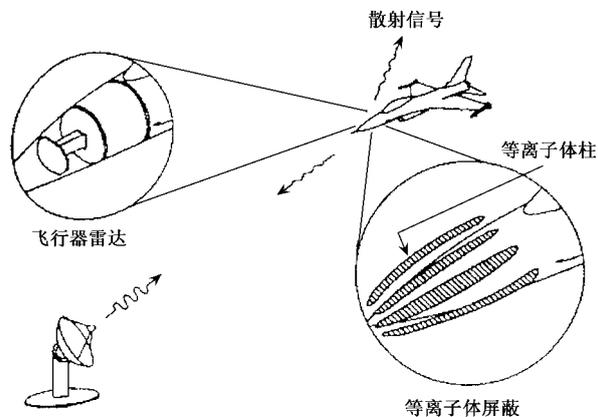


图1 等离子体低目标特征技术用于飞行器天线

为粒子的无规运动,也就是说,转化为热能.这就是电磁波在等离子体中的正常吸收过程.这一过程和电磁波包括光波在金属中的吸收相似.因为等离子体在这里起的作用就是导体的作用.

\* 2003-02-26 收到初稿,2003-05-27 修回

† 通讯联系人. E-mail: wanglong@aphy.iphf.ac.cn

以上所说的波在等离子体中吸收的两步过程缺一不可. 如果没有带电粒子的碰撞, 它们的规律性的振动的能量又会返回到电磁波, 如同电路的无功功率所表现的那样.

电磁波在等离子体中的传播和吸收远比在金属中的相应过程要复杂得多. 电磁波在各向同性等离子体中的色散关系为<sup>[2]</sup>

$$\omega^2 = \omega_{pe}^2 + k^2 c^2, \quad (1)$$

其中  $\omega$  为电磁波圆频率,  $\omega_{pe}$  为电子等离子体(圆)频率,  $k$  为波数,  $c$  为光速. 电子等离子体频率有时简称等离子体频率, 是等离子体中不同种类电荷(电子和离子)之间的相对运动的固有频率. 它由电子密度决定:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}, \quad (2)$$

其中  $n_e$ ,  $e$ ,  $m_e$  分别为电子的密度、电荷和质量. 如果电子密度用  $\text{cm}^{-3}$  作单位, 等离子体线频率可写为

$$f_{pe} = 9 \times 10^3 \sqrt{n_e}. \quad (3)$$

电磁波的色散关系[(1)式]如图2所示. 它是一个抛物线, 在波频率很高(相对于等离子体频率)或者说等离子体密度很低时, 趋于半无限直线  $\omega = \pm kc$ , 相当于电磁波在真空中的传播. 当波频率低于等离子体频率  $\omega < \omega_{pe}$  时, 电磁波不能在等离子体中传播. 原因是电磁波振动过慢, 它引起的电子规则振荡产生的波将其完全抵消. 因为等离子体频率取决于电子密度, 一定频率的电磁波将不能穿过密度超过某一临界值  $n_{cr}$  的等离子体. 这个临界值称临界密度. 如果一束电磁波从低密度侧射入一密度不均匀等离子体, 它将在密度等于临界密度处, 即电磁波频率等于局部等离子体频率处反射.

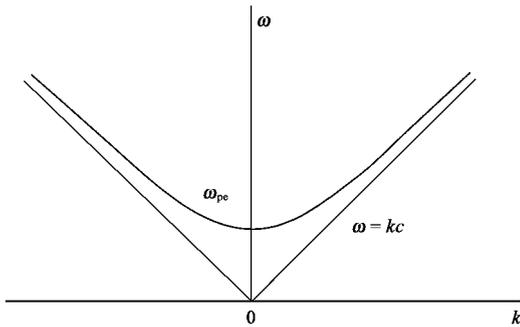


图2 电磁波在均匀等离子体内的色散关系

从图2所示的色散曲线上的任何一点向原点连一直线. 这直线的斜率是波的相速度  $v_{ph} = \omega/k$ , 在这点所作曲线切线的斜率为波的群速度  $v_g = d\omega/dk$ .

显然, 在等离子体中传播的电磁波的相速度大于光速, 而其群速度小于光速. 特别是在临界密度即波的反射点附近, 群速度接近于零. 由于波能量是以群速度传播的, 电磁波在临界密度附近能更有效地通过和带电粒子的相互作用沉积能量. 这一过程称为波在等离子体中的共振吸收. 所以, 使等离子体达到或接近临界密度是等离子体低目标特征技术的基本要求. 如果电磁波频率为 2—18GHz, 从(3)式得到相应的临界密度是  $4.9 \times 10^{10} - 4 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ . 这样密度的等离子体在真空容器中容易得到, 在开放的大气环境下就很困难了.

图3表示等离子体密度随深度即电磁波传播方向的变化. 由于纵轴没有标尺, 它也表示相应于局部临界密度的电磁波频率. 此图可形象地表示入射电磁波在等离子体临界密度处反射. 因为随着波的向内传播, 等离子体密度都是从低到高逐渐增大的, 频率较低的波在浅层反射, 频率较高的波在深层反射, 相应临界密度超过最高等离子体密度的电磁波将会透射.

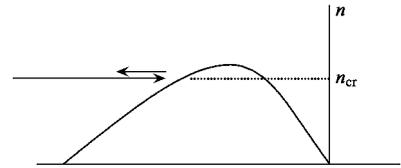


图3 电磁波在非均匀等离子体中的传播和反射

### 1.2 与相关研究领域的联系

以上所述是等离子体物理很基本的知识. 电磁波在临界密度等离子体上的反射和吸收的研究也已非常充分. 在历史上这一研究开始于对电离层的研究. 用不同频率的电磁波垂直向上发射, 使之在不同电离层电子密度处反射, 测量从发射到反射所需时间来确定电离层电子密度随高度的分布. 电离层的最大电子密度约为  $10^6 \text{cm}^{-3}$ , 相应的电磁波在 MHz 波段. 20 世纪 70 年代以来, 使用这一波段的大功率电磁波(几百 MW 级)在几十公里尺度上加热 D 或 F 层电离层, 称为电离层人工变态<sup>[3]</sup>. 它所利用的就是上述电磁波在临界密度附近强吸收的原理. 这一过程所牵涉到的线性和非线性现象得到充分研究. Ginzburg 和 Budden 关于电磁波在等离子体中传播的著作已奠定了相应的理论基础<sup>[4,5]</sup>. 此外, Gurevich 曾提出在高度为 30—60 公里的空间用微波产生人工电离层来反射电磁波的方案<sup>[6,7]</sup>. 他的先行工作对我们今天的课题有很大参考价值.

另一主动激发电离层的方法是撒放化学物质. 例如在电离层中撒放钡原子, 使其在阳光的紫外线中被电离, 形成发光的钡云. 观察这一钡云的发展, 可以研究空间等离子体的很多性质. 涉及钡云在空间的电离、扩散及化学反应的过程的研究对我们所论述的课题也有参考价值<sup>[8]</sup>.

另一尺度迥异但物理过程相近的实验是惯性聚变中激光束和等离子体的相互作用<sup>[9]</sup>. 在这样的实验中, 激光波长一般为  $1\mu\text{m}$ , 相应的等离子体密度为  $10^{21}—10^{22}\text{cm}^{-3}$ , 接近固体密度. 这样的稠密等离子体由激光聚焦到固体表面产生. 在惯性聚变研究中, 一般采用纳秒 ( $10^{-9}\text{s}$ ) 宽度的脉冲激光. 近年来, 出现了飞秒 ( $10^{-15}\text{s}$ ) 激光. 这样的激光有非常强的功率, 经聚焦后可得到  $10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$  的功率面密度, 可产生一系列丰富的非线性现象. 激光等离子体还可用于产生 X 射线激光、粒子加速等技术领域. 相应的研究重点是电磁波和非均匀等离子体的相互作用. 这些过程也经详尽研究, 相应的文献如汗牛充栋.

上述两过程以及我们所谈论的低目标特征技术问题的物理可比性可用一些无量纲参数来判断<sup>[10]</sup>.

这些无量纲参数是: 密度梯度标量  $L = n_e / \frac{dn_e}{dz}$  和电磁波长之比  $L/\lambda$ , 电子碰撞频率和电磁波频率之比  $\nu_e/\omega$ , 波的电场振幅平方和等离子体热压强之比  $E^2/4\pi n_e kT_e$ . 如果这些无量纲参数接近, 则物理过程相似, 而不管其绝对尺度如何.

从这些无量纲量来看, 我们所研究的低目标特征技术问题较之于上述两问题尚有很大区别 (1) 低目标特征技术问题所处理的电磁波为厘米和分米波, 而所形成的等离子体层厚度不可能远远大于波长, 所以在波传播问题中一般不可能用准光学近似, 这和电离层以及激光等离子体情形是很不同的; (2) 在低目标特征技术问题上, 等离子体处于大气环境下, 电子和大量中性粒子的碰撞是主要的, 电磁波受到由此而引起的很大阻尼, 而在上述两种情况下, 第二个无量纲量可能都很小; (3) 在低目标特征技术问题上, 波的能量都很小, 所以等离子体中的非线性效应可能不很重要, 而在上述两种情形下, 各种非线性效应和不稳定性起了很大作用. 因此, 尽管上述两个研究领域给我们积累了大量有参考价值的文献, 等离子体低目标特征技术仍是一个本质上非常不同的新问题, 必须从头研究.

除上面所说的特点外, 等离子体低目标特征技

术尚有两个显著特点. 第一个仍与大气环境有关. 如果我们能产生适合需要的  $10^{10}—10^{12}\text{cm}^{-3}$  的电子密度和相应的离子密度, 它们比大气层中  $10^{16}—10^{19}\text{cm}^{-3}$  的中性粒子密度仍然很小. 在这种情况下, 电子和离子直接碰撞而导致复合的几率甚低. 绝大部分电子一经产生就很快附着于中性粒子 (特别是氧分子) 而形成负离子. 负离子有相当长的寿命. 在大气特别是低层大气的等离子体成分中, 负离子和正离子占相当大的比重. 他们在等离子体的演化与吸收电磁波中起什么作用, 是值得研究的. 此外, 大气参数是随高度而变的. 随高度的不同, 粒子数密度和压强均有几个量级的变化, 因此所需的产生等离子体方法和等离子体的性质可能是非常不同的.

在飞行器的低目标特征技术问题中, 飞行器本身是高速飞行的. 其速度可能达到或超过一个马赫数. 如果我们产生的是几个电子伏特的等离子体, 那么这个速度应在电子热速度和离子热速度之间. 在飞行器表面, 这样的剪切流对等离子体约束和能量交换过程的影响是非常重要的.

从基础研究角度看, 我们要产生的等离子体属于所谓负电等离子体, 即由正离子、电子和数目超过电子的负离子组成的三分量等离子体. 这样的等离子体有很多独特的性质且应用广泛, 迄今尚未得到很深入的研究<sup>[11]</sup>.

所以, 我们所要研究的等离子体低目标特征技术问题乃是许多学科内容的交叉. 很少有人能对这许多门学问都很熟悉. 况且, 迄今我们所能看到的直接有关文献实在太少, 我们尚不能对这一技术有很概括的了解. 本文只对有关的一些基本物理问题做些讨论, 力图勾画出一个所需研究的问题的轮廓, 供有兴趣者参考.

### 1.3 研究简史

Vidmar 于 1990 年首先明确提出在大气层用人工产生的等离子体吸收或反射雷达波<sup>[12]</sup>. 他用冷等离子体模型对有解析解的 Epstein 密度轮廓进行了计算, 得到了关于吸收系数的公式. 他用大气化学程序计算了等离子体的产生和维持, 发现在高度较低时, 三体附着是主要过程, 随高度增加, 二体附着和复合逐渐超过三体过程. 他还估计了维持一定密度等离子体所需功率. 总之, 大气等离子体的基本物理和技术问题他都涉及了, 是一篇开山之作.

同一时期, 马里兰大学的一个研究组<sup>[13]</sup>用同轴等离子体枪在一个真空容器中产生脉冲等离子体, 测量对回旋管产生的 10GHz 微波束的吸收. 他们的

结论是由于碰撞产生的正常吸收不是主要的. 由于他们使用的微波功率很大, 这一结论是可以理解的, 但在低目标特征技术问题上未必有普遍意义.

美国休斯公司的 Gregoire 等人在 1989—1992 年期间曾进行了以低目标特征技术为目的的电磁波在等离子体中的传播实验研究<sup>[14]</sup>. 他们用高压火花阵列产生的紫外光电离接近一个大气压的混合气体, 可在 20 升体积中产生密度高达  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  的等离子体. 他们用等离子体填充波导和微波通过陶瓷壁入射到等离子体室中的两种办法, 均明显观察到电磁波的吸收. 他们还提出了用使电磁波绕射的方法达到低目标特征技术目的.

在以上所述的以吸收电磁波为目的的实验中, 所采用的等离子体都是在真空容器中产生的, 虽然其中有些工作于大气压. 但真正开放于大气环境下的实验尚很罕见. 然而近年来应用于大气环境下的等离子体处理技术(如除尘消毒、表面处理、臭氧发生)发展得很快. 这些技术对于我们所讨论的课题都有重要借鉴意义.

另一种大气等离子体是大气层中的核爆炸产生的高温等离子体. 这样的高温等离子体可能与我们要讨论的以低目标特征技术为目的的等离子体非常不同.

在地球大气层, 自然产生的等离子体可能只有闪电一种. 闪电过程, 特别是能持续时间很长的球状闪电(可达几分钟), 可能对我们所讨论的等离子体产生和维持机制有参考意义. 目前关于球状闪电尚无非常权威的物理机制来解释, 但普遍认为, 其内部存在化学储能以维持长的寿命, 因为化学储能较之于电场或磁场储能有更高的储能密度和转换效率. 此外, 还有一种意见认为, 非均匀分布的带电尘埃颗粒使电荷复合时间变得非常长, 这一电荷分离形成的电场同时产生了约束<sup>[15]</sup>. 球形闪电的存在坚定了寻找大气中长寿命等离子体的信心.

近年来, 国内做了一些与低目标特征技术有关的调研和理论上的准备工作. 主要是对一些电磁波和等离子体相互作用模型进行了数值计算<sup>[16—20]</sup>.

## 2 大气模型<sup>[21—25]</sup>

低目标特征技术所使用的等离子体所处的大气环境非常不同于实验室等离子体所处的真空环境. 大气的参数、性质随地表状况、高度、纬度、日夜变化、季节交替、太阳活动而变.

### 2.1 物理特征

大气主要按照其温度的变化在垂直方向分层(图4). 大气温度从地面向上逐渐降低, 在 15km 高度左右达到极小值. 这一层称为对流层. 对流层以上是平流层. 在平流层, 温度随高度升高而缓慢增加, 在大约 50km 高度达到最大值. 从 50km 以上到 85km 为中间层, 温度随高度升高而降低. 85km 以上温度随高度升高而增加, 称为热层.

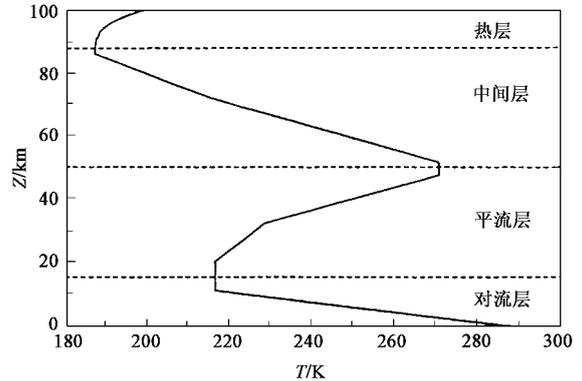


图4 大气温度高度分布和分层

如果从电离度来划分, 60km 以上为电离层. 其中有相当数量分子受太阳的 X 射线或紫外线辐射而电离. 又按照电子密度大小自下而上划分为 D 区(60—90km)、E 区(90—140km)和 F 区(140km 以上). 在 60km 高度, 白天的电子密度可达  $10^2 \text{ cm}^{-3}$ . 最大电子密度在 F 区, 为  $10^6 \text{ cm}^{-3}$ . 电离层显著影响电磁波的传播.

大气压强大致随高度呈指数减少(图5). 在 60km 高空, 压强约为 0.2mmHg(1mmHg = 1.33322  $\times 10^2$  Pa). 粒子数密度在地面为  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 在 60km 高空为  $6.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (图6).

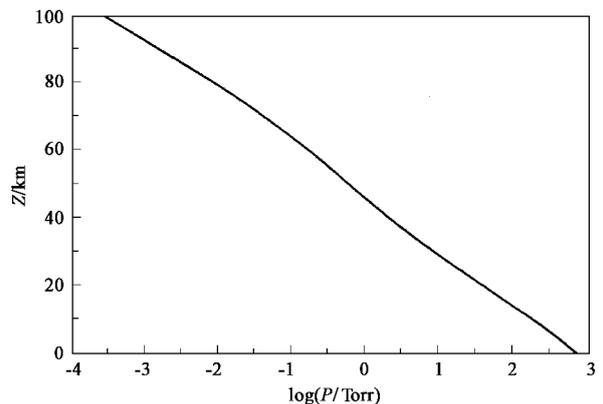


图5 大气压强的高度分布

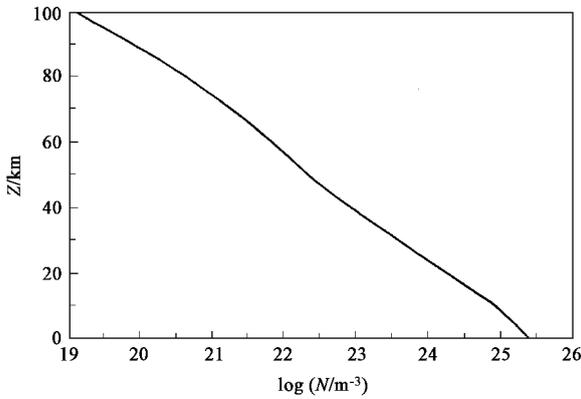


图6 大气中性粒子数密度的高度分布

另一重要的大气性质是扩散. 在 80km 以下的高度主要扩散机制是湍流. 湍流扩散系数为  $10^3$ — $10^4$   $\text{cm}^2/\text{s}$ . 相比之下, 分子扩散系数大约为  $0.16\text{cm}^2/\text{s}$ , 可以忽略. 在 80km 以上, 湍流扩散逐渐转变为分子扩散. 到 110km 完全转变为分子扩散.

## 2.2 成分

80km 以下的大气由于分子扩散很低, 无重力分离, 其主要成分比例不变, 即 78% 的  $\text{N}_2$ , 21% 的  $\text{O}_2$  和 1% 的 Ar. 此外还含有约 0.3% 的  $\text{CO}_2$  以及少量的惰性气体. 水的含量则随时间地点变化很大. 在地面为 0.1%—3%, 主要集中在对流层下半层, 随高度急剧降低. 80—110km 是过渡层. 110km 以上, 由于分子扩散是主要扩散机制, 气体成分按分子量大小垂直分布.

由于太阳的辐射作用, 氧分子的激发态 [ $\text{O}_2(^1\Delta)$  和  $\text{O}_2(^1\Sigma)$ ] 和氧原子随高度而增加. 在 60km 高空, 它们的数值密度分别可达  $10^9$ — $10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$ . 从地面到 45km 高度, 臭氧  $\text{O}_3$  的密度为  $10^{11}$ — $10^{12}$   $\text{cm}^{-3}$ , 最大值在 25km 处, 45—60km 减少到  $10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$ . 氮的氧化物  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{HNO}_3$  在大气中也有一定含量. 它们一般也随高度增加而减小.

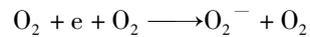
大气中还含有大量固态或液态的颗粒物质, 在大气科学中称为气溶胶. 气溶胶来自自然过程和人类活动. 自然过程包括宇宙尘埃、火山活动、沙尘暴、植物种子等. 人类活动包括工农业交通直接排放到大气中的颗粒, 以及污染气体经反应产生的粒子. 和来源有关, 气溶胶的地理分布十分不均匀. 气溶胶的粒度分布是一个很宽的谱, 从分子大小到直径  $10\mu\text{m}$  以上都有. 在大气科学中主要关心的是 0.1— $10\mu\text{m}$  直径的范围. 气溶胶和很多大气活动相关.

## 2.3 自然电离过程

大气中存在自然电离现象. 60km 以下自然电离

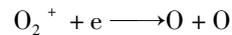
源来自土壤或从土壤逸入大气的放射性元素所辐射的  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  射线以及宇宙线. 前者主要发生在地面附近; 后者在高空占优势. 大气电离率(单位时间单位体积内发生的正负电荷对数)在十几公里的高空有一个大约为  $40\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$  的最大值, 在地面和较高的高度都小一个量级. 在电离层, 主要电离源是来自太阳的 X 射线、紫外线的辐射.

空气分子被电离后, 首先形成一个自由电子和一个正离子. 在低层大气, 自由电子迅速被分子附着, 形成负离子. 这个过程在较低的大气层中主要是如下的三体附着:



这两反应特别是第一个反应有较大的反应截面. 在地面附近, 这一反应决定的电子寿命为  $10^{-7}$ — $10^{-8}$  s. 和以上大气电离率相乘, 自然状态下地面大气中自由电子密度只有大约  $10^{-6}\text{cm}^{-3}$ .

在电离层, 主要电子复合反应是如下的两步反应:



称为分解复合.

一般来说, 负离子的寿命远大于自由电子. 特别是在低层大气. 这是因为正负离子与中性粒子的碰撞几率远远大于彼此碰撞复合的几率. 而离子和中性粒子碰撞只会产生电荷的转移. 所以在自然大气中, 负电荷的载体主要是负离子, 而不是电子. 多数负离子和正离子又经历复杂的物理化学反应, 有些进一步形成由数个分子组成的荷电团簇. 在电离层 D 区, 负离子经一连串复杂的反应, 最终形成较稳定的  $\text{HCO}_3^-$ , 再与正离子复合(图 7). 有关反应我们将在后面详细介绍. 而正离子往往最终形成荷电团簇. 这样的荷电团簇如  $\text{O}_2^+ \cdot \text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O})_n$ . 离子和团簇又会被气溶胶吸附, 形成带电的气溶胶粒子(图 8). 在大气科学中, 通常粗略地将分子离子称为大气小离子, 带电气溶胶称为大气大离子. 在地面附近, 主要是在 2km 高度以下, 小离子和大离子的典型密度分别为  $10^2\text{cm}^{-3}$  和  $10^3\text{cm}^{-3}$  量级.

## 3 等离子体的产生技术

大气环境下产生的等离子体必然属于通常所说的低温等离子体. 低温等离子体可大致分为两种: 热等离子体和非平衡等离子体. 热等离子体的特点是电子温度和离子温度相等, 达到局部热平衡. 典型的

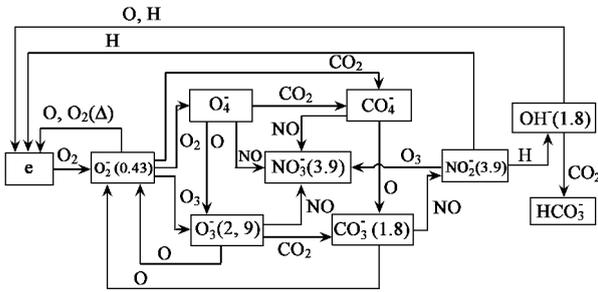


图7 电离层D区负电荷离子演化过程<sup>[21]</sup>

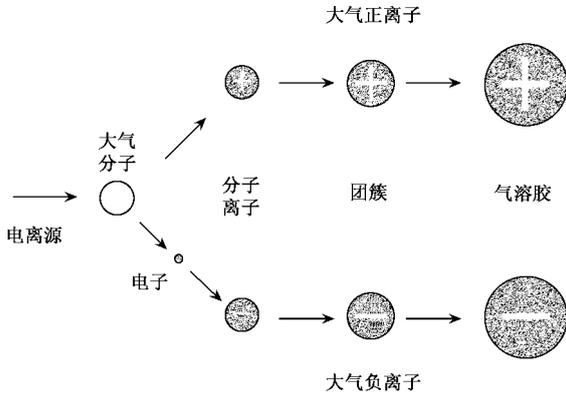


图8 大气带电成分

热等离子体就是电弧。非平衡等离子体的电子温度显著不同于离子温度，一般远高于离子温度。典型的非平衡等离子体是辉光放电。并不是所有的低温等离子体的产生方法都适于大气环境下的等离子体。以低目标特征技术为目的的等离子体的起码要求有两点，一是要达到一定密度，即至少  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  以上；二是这样的等离子体要有一定的厚度和覆盖面积。由于大气环境下的物理和化学过程（扩散、复合、附着）这样的等离子体实现起来有相当的难度，特别在低层大气。

在大气中最容易实现的放电是电晕放电。其方法是在电极施上加直流或交流高电压，一般在10kV以上。为防止击穿，高压电极须远离地电位。电极附近的强电场会使电极表面产生很微弱的放电，相应的电子密度很低，不能满足隐身的需要。电晕放电发生在接近一个大气压的高气压环境下。在低气压下就会发展成辉光放电。

下面介绍几种可能应用于低目标特征技术的等离子体产生方法。

### 3.1 介质阻挡放电和沿面放电

我们首先介绍介质阻挡放电<sup>[26]</sup>是因为这种放电可在一个大气压下进行。它的另一特点是放电装

置极为简单，所以在很多技术领域广泛应用。

介质阻挡放电的基本装置类型是两块很接近的平行平面电极[图9(a)]，其中至少一块的表面用绝缘介质层(玻璃、石英、陶瓷)覆盖。在两电极上施加交流电压。其频率可从工频变化到几百kHz，幅度在几千伏以上。在强的电场作用下，两电极间的气体被击穿，形成放电通道。但由于介质层的存在，不能形成放电回路，介质层上积累的电荷随之很快阻止和熄灭放电。但这积累的电荷在外加电压的下半周反相时将有助于反向击穿过程。

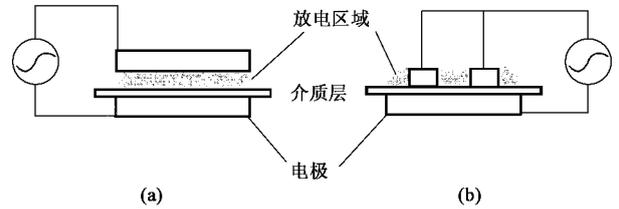


图9 介质阻挡放电(a)和沿面放电(b)

介质阻挡放电装置有一变型，称为沿面放电。二者的结构和放电区域如图9所示。它们的放电机理是相同的，但沿面放电没有需要调节的气隙，适合于实际应用的场合。

介质阻挡放电及沿面放电有两种基本类型。在接近一个大气压的工作环境下，放电由在空间和时间都随机分布的微放电通道组成。每一通道的直径在0.1mm以下，持续时间为10—100ns。这样的放电称为流光放电。在一个大气压下，典型的参数是峰峰值电压几千到1万多伏，电极间距离几毫米。在气压比较低时，放电呈均匀分布，称辉光放电。

从应用角度看，大气压的放电当然是很方便的，因为无须真空容器和抽气系统。但在很多应用场合，大气压下的流光放电是不利的。其放电时间过短，很多希望发生的化学反应进行不充分。在有些情况下，可以得到大气压辉光放电<sup>[27]</sup>。其特征是时空均匀性好，每半周期只有一个持续时间 $\mu\text{s}$ 量级的电流脉冲。对这一现象有不同的解释<sup>[28]</sup>。一种看法是原子亚稳态的淬灭不断产生自由电子，使得下次放电容易击穿；另一可能机制是离子空间约束，即前一放电脉冲在两电极间产生的离子尚未扩散，下一次放电即已开始<sup>[29]</sup>。

一项专利明确提出使用大气压辉光放电覆盖在飞行器的表面<sup>[30]</sup>，包括飞行器表面两组电极的排列和结构。该专利也提出了利用电极列阵间的位相差在等离子体中产生静电波，以消除湍流减小飞行阻

力。

使用这样的放电原理于低目标特征技术的目的还有一个问题似乎讨论不多。即使是实现了大气辉光放电,在一个电压半周期内的一个电流脉冲只维持几微秒的时间,其“占空比”仍然很小(10%左右)。而根据一些实验结果,在电流脉冲过去后,等离子体的扩散是很快的。这样的放电运行模式能否有效吸收电磁波仍是有疑问的。只凭电流脉冲时刻的电子密度与其他方法比较是不合理的。况且我们还没有看到任何这样的等离子体吸收微波的实验报道。

### 3.2 电弧法

在近期发表的一项实验中<sup>[1]</sup>,使用两电极间产生工频交流电弧,再用气体将等离子体从电极缝隙中吹出。这样很多同样的电弧组成能吸收电磁波的阵列(图10)。每个电弧半径为1cm,高6.5cm,消耗功率600W。电弧内的温度估计为1760K。从伏安特性估计,电子密度为 $1.38 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。从这一装置上的测量和计算结果可知,为维持这样的电子密度和温度,需要 $60 \text{ W/cm}^3$ 的电功率。

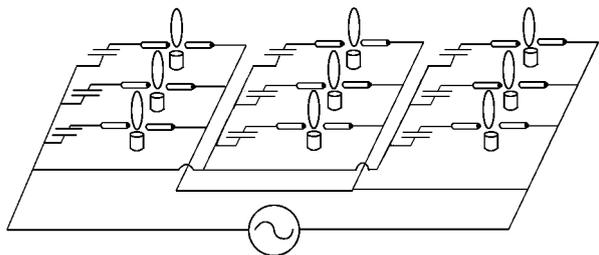


图10 交流电弧阵列

为测试对微波的吸收效应,他们在横放的传输微波的波导管上开三对上下相对的洞,以容纳三个电弧。他们在8.5—10.5GHz微波频率范围内测试,最大衰减为25dB。这种测试方法和实用位形显然还有很大差距。

这一实验室在早期曾报道<sup>[31]</sup>过另一电弧实验结果。他们用空心阴极在1—10Torr气压(1Torr = 133.332Pa)下产生电弧,电流和电压分别为10A和50V。

### 3.3 紫外辐射

Gregdire<sup>[13]</sup>等人使用紫外光电离技术产生等离子体。该实验室曾发展一种技术,用火花放电产生的紫外光辐照接近一个大气压的、掺入低电离电位种子气体3n丙基胺(tri-n-propylamine)的混合气体,产生大体积的电子密度在 $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 以上的等离子

体。他们在这一实验中将种子气体氙和工作气体氦混合充入一个陶瓷罩,维持150—500Torr的气压(图11)。用引燃管控制一个电容放电回路,将脉冲电压加在一组火花隙,使之击穿放电产生紫外光电离气体。在实际的波吸收实验中,他们将火花隙阵列和波导结合。

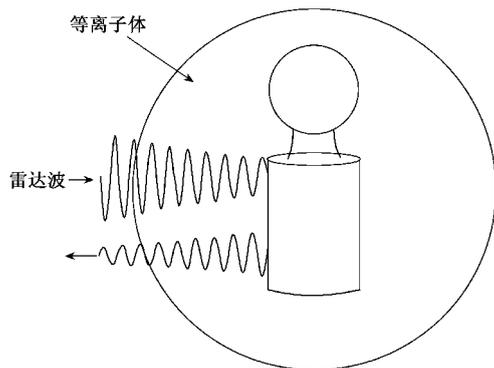


图11 紫外辐射产生等离子体吸收电磁波示意图

他们计算了维持一定的电子密度所需的功率。损失机构只考虑复合,电离效率为10%。结果以氙气所需功率为最低,为维持 $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 的电子密度,仅需 $0.4 \text{ W/cm}^3$ 。氙气则需 $23 \text{ W/cm}^3$ 。但是当所维持的电子密度升高一个数量级时,所需功率提高两个数量级。后面的分析指出,这个结论的条件是电子主要消失机构是和离子的三体复合。

Stalder, Vidmar 和 Eckstrom<sup>[32]</sup>用一种火花隙板产生紫外辐射电离氙气。氙气中掺入了四方二甲基胺乙烯 TMAE[ tetrakis( dimethylamino )ethylene ]的蒸汽。得到的等离子体密度达到 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 。这样的等离子体对10GHz微波的吸收达20dB。他们所用的火花隙板是早期气体激光研究所发展的一种标准技术。

紫外辐射以及粒子束这一类产生等离子体的方法的优点是可以较远距离产生和控制等离子体,而无须先在一个容器产生再喷出,适合于产生一定厚度的等离子体。关键问题是产生短的波长的辐射,以及使用低电离电位气体。一般紫外灯使用方便,但主要辐射能量在200nm以上,单光子电离效率很低。火花隙可产生50—100nm的真空紫外辐射,比较适合光电离的需要。但提高效率仍是紫外辐射方法所要解决的主要问题。

### 3.4 磁化等离子体

在低目标特征技术研究早期有两项磁化等离子体的简单报道<sup>[33,34]</sup>。一是用2.45GHz微波在0.5—1.5kGs磁场中产生长2m、直径12cm的等离子体

柱. 电子密度为  $5 \times 10^9$ — $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , 电子温度为 3—6eV. 可使微波在 1.5—3GHz 电子回旋共振波段衰减 25—50dB. 这样的磁场位形在实际情况下不易实现. 另一项是磁场中的 Penning 放电产生的 12cm 直径、密度  $10^9 \text{ cm}^{-3}$  的等离子体. 对频率在电子回旋波段的非常波(垂直磁场入射)进行了吸收实验.

以上只是现有文献中包含的低目标特征技术用的等离子体的产生方法. 实际上很多种低温等离子体的产生方法均可用于这一目的.

### 3.5 种子气体问题

上述几个实验都使用了电离能低的种子气体. 种子气体也用于气体激光和粒子物理研究中的 Cerenkov 探测器中. 在常见的物质中, 碱金属是电离能最低的物质(如铯 Cs, 3.894eV), 其次是碱土金属(如钡 Ba 5.212eV)和稀土元素(如镨 Pr 5.42eV). 在有机物质中, 以胺类和芳烃的电离能最低, 但都在 6—7eV 以上. 正因为容易丢失电子, 它们的化学活性很高, 可能有毒或危险, 所以在使用时需要注意.

电离能低不是对种子气体的惟一要求. 还希望它们在大气环境下有一定的稳定性, 有较高的饱和蒸气压(因为它们常温下往往是液体). 上述的几个例子中未使用碱金属可能是因为它们极易在电离前被氧化. 此外, 还希望种子气体的辐射系数低, 在电离后不易复合. 一些常见物质的电离能和饱和蒸气压的数值可见文献 [35].

### 3.6 能量效率问题

原则上说, 电离一个原子或者说产生一个电子所需的能量为其电离能, 为 10eV 的量级, 即使算上多原子分子的分解能也相差无几. 但实际上在等离子体的工艺中, 所需能量远远大于这个值. 原因是等离子体并非孤立系统, 在具体的放电装置中, 总存在各种能量损失机构. 例如电极放电产生的电子总要损失到电极上去. 从汤生放电理论和经验公式得到了一定电场时产生的最大放电电流的气压值, 称为 Stoletow 点<sup>[29]</sup>. 由此计算空气中产生一个电子离子对的最小能量为 81eV. 由此计算, 如果电子寿命是  $10^{-6} \text{ s}$ , 为维持  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  的电子密度, 所需的功率为  $13 \text{ W/cm}^3$ .

Vidmar 计算了维持一定密度等离子体所需功率<sup>[10]</sup>. 他也只算了三体复合. 在使用种子气体 TMAE 条件下, 如果三体复合的速率系数为  $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$ , 维持  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  的电子密度所需功率为  $1 \text{ W/cm}^3$ .

以上几项关于维持等离子体所需功率的估计结

果在数量级上大致符合. 不同方法产生的等离子体所需功率相差并不悬殊. 根据这样的结果, 要产生大面积的  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  密度的等离子体, 所需要的功率还是非常大的. 这是在零维模型中做的. 考虑到扩散等因素, 所需能量可能还要大得多. 适当降低等离子体密度的要求, 会使对功率的要求减小很多(见后面的分析).

### 3.7 等离子体诊断

大气等离子体的诊断是一个新课题. 这样的诊断对象有两个特点. 一是高密度的中性粒子背景; 二是虽然最后要达到的等离子体密度很高, 但在研究扩散过程中, 可能要诊断低密度的等离子体. 在以上所述的几个实验中, 都采取比较简单的方法估算等离子体参数. 原因之一是作为实用目标很强的研究, 主要指标是对雷达波的吸收, 精确的等离子体参数对于初步的研究可能没有那么重要. 其次, 这种情况也表现了通常的等离子体诊断遇到的困难.

等离子体物理中成熟的电探针方法在大气压环境下要作很大修正<sup>[36]</sup>. 最主要的问题是在接近 1 个大气压时, 带电粒子的平均自由程  $\lambda$  远小于探针尺寸  $r_p$ . 这使探针附近的电离度降低到  $n_e \lambda / r_p$  的水平, 离子漂移速度也降低同样比例. 这又得到两个结果: 一是鞘厚度增加; 二是等离子体流速须大于这一离子漂移速度才能视为稳定的. 另一问题是探针会使周围的等离子体冷却. 当然还有一个结果, 就是使测量的灵敏度大大降低.

上述文献引进两个无量纲量以判断探针的工作区域. 第一个是电 Reynolds 数, 第二个无量纲量是 Damkohler 数. 从这些参数可得到探针的工作区域并引用不同的模型. 但具体方法仍是很复杂的. 在文献 [13] 中仅将电探针用于相对的测量.

除探针法外, 光学方法对任何等离子体都是很方便的. 最简单的当然是发射光谱诊断. 这一光谱所提供的是电子碰撞所产生的上能级的信息, 广泛用于  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}$  等谱线. 例如使用 391.4nm 的  $\text{N}_2^+$  谱线和  $\text{N}_2$  谱线对比, 可得到电子能量分布信息. 大气中的水或氢产生较强的  $\text{H}_\alpha$  或  $\text{H}_\beta$  原子谱线. 由于氢原子很轻, 其斯塔克展宽很大, 可通过测量谱线的展宽计算电子密度<sup>[37]</sup>.

吸收光谱则提供基态的信息. 这一方法广泛用于臭氧的研究. 多种氮的氧化物也适用于吸收光谱诊断. 一些有用的截面数据见文献 [38]. 红外吸收光谱可用于多种碳和氮的氧化物, 特别是一些有机成分. 一种傅里叶变换干涉仪 (FTIR) 改进了一般红

外吸收光谱的信噪比,特别适用于碳氢化物碎片的研究.其原理和使用方法见文献[39].

激光荧光光谱(LIF)是一种主动探针法.其优点是空间分辨率高.LIF所能探测的组分和吸收光谱近似.它适于N,OH,NO等成分的探测,但密度的定标是复杂的事情.有关文献非常多.相干反斯托克斯拉曼谱(CARS)也是一种主动探针技术.它利用三波耦合原理,有非常好的信噪比,但需两束不同波长的激光,装置比较复杂<sup>[40]</sup>.

质谱方法也广泛用于大气等离子体诊断.当然往往需要一个差分抽气系统.大气等离子体诊断的一个特殊问题是负离子的诊断.Braithwaite和Allen提出用电探针来测量负离子份额 $\alpha = n_- / n_e$ <sup>[41]</sup>.这一份额决定比例 $R = I(V_p) / I_{sat} = f(\alpha)$ ,其中 $I(V_p)$ 是等离子体位势处的电子电流, $I_{sat}$ 是正离子饱和流.在另一项适用于磁化等离子体的技术中<sup>[42]</sup>,使用一带保护环的平面探针测量Bohm流,用小的圆柱探针测量电子流.当然这样的探针技术不能在大气环境下直接使用.这样的诊断也不能直接得到关于负离子的质量和电荷的信息.这样的数据可从质谱测量和激光引起的光脱附测量得到<sup>[43]</sup>.

大气中进行较低的电荷密度的测量是很困难的事情.一种仪器<sup>[44]</sup>将含电荷的气体吸入到两个平行电极之间,电极上加高直流电压,测量通过电极的电流就可推算大气中的电荷密度(图12).当然如何定标是个复杂的问题.

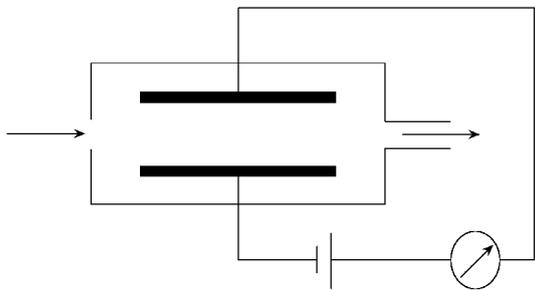


图12 测量大气电荷密度的仪器

参 考 文 献

[ 1 ] Koretzky E, Kuo S P. Phys. Plasmas, 1998, 5 : 3774  
 [ 2 ] 博伊德 T J M, 桑德森 J J. 等离子体动力学. 北京: 科学出版社, 1977 [ Boyd T J M, Sanderson J J. Plasma Dynamics. Beijing: Science Press, 1977 ( in Chinese ) ]  
 [ 3 ] 王龙. 物理学进展, 1985, 5 : 101 [ Wang L. Progress in Physics, 1985, 5 : 101 ( in Chinese ) ]  
 [ 4 ] 金兹堡 V L. 电磁波在等离子体中的传播. 北京: 科学出版社, 1978 [ Ginzberg V L. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas. Beijing: Science Press, 1978 ( in Chinese ) ]

[ 5 ] Budden K G. The Propagation of Radio Waves, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1985  
 [ 6 ] Gurevich A V. Sov. Phys. Usp. 1980, 23 : 862  
 [ 7 ] Gurevich A V, Borisov N D, Milikh G M. Physics of Microwave Discharges: Artificially Ionized Regions in the Atmosphere. Gordon and Breach, 1997  
 [ 8 ] Li L, Xu R L, Chin. Phys. Lett., 2002, 19 : 1214  
 [ 9 ] Rubenchik A, Witkowski S. Physics of Laser Plasma, Handbook of Plasma Physics, Vol. 3. North-Holland, 1991  
 [ 10 ] Wong A Y et al. J. Geophys. Res., 1981, 86 : 7781  
 [ 11 ] Franklin R N. Plasma Sources, 2002, 11 : A31  
 [ 12 ] Vidmar R J. IEEE Trans. Plasma Sci., 1990, 18 : 733  
 [ 13 ] Destler W W et al. J. Appl. Phys., 1991, 69 : 6313  
 [ 14 ] Gregdore D J et al. AFOSR AD-A250710, 1992  
 [ 15 ] Stenhoff M. Ball Lighting. Kluwer Acad./Plenum Pub., 1999  
 [ 16 ] 王舸, 陈银华, 陆玮. 核聚变与等离子体物理 2001, 21 : 160 [ Wang G, Chen Y H, Lu W. Nucler Fusion and Plasma Physics, 2001, 21 : 160 ( in Chinese ) ]  
 [ 17 ] 孙爱萍, 童洪辉, 沈丽如等. 核聚变与等离子体物理 2001, 21 : 224 [ Sun A P, Tong H H, Shen L et al. Nucler Fusion and Plasma Physics, 2001, 21 : 224 ( in Chinese ) ]  
 [ 18 ] Liu M H, Hu X W, Jiang Z H et al. Chin. Phys. Lett., 2001, 18 : 1225  
 [ 19 ] 唐德礼, 孙爱萍, 邱孝明. 物理学报 2002, 51 : 1764 [ Tang D L, Sun A P, Qiu X M. Acta Physica Sinica, 2002, 51 : 1764 ( in Chinese ) ]  
 [ 20 ] 孙爱萍, 李丽琼, 邱孝明等. 核聚变与等离子体物理 2002, 22 : 135 [ Sun A P, Li L Q, Qiu X M et al. Nucler Fusion and Plasma Physics, 2002, 22 : 135 ( in Chinese ) ]  
 [ 21 ] 海克伦 J. 大气化学. 北京: 科学出版社, 1983 [ Hecklen J. Atmospheric Chemistry. Beijing: Science Press, 1983 ( in Chinese ) ]  
 [ 22 ] 美国国家海洋和大气局、国家航宇局和美国空军部. 标准大气. 北京: 科学出版社, 1982 [ National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United States Air Force, U. S. Standard Atmosphere, Beijing: Science Press, 1982. ( in Chinese ) ]  
 [ 23 ] 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学. 北京: 气象出版社, 1991 [ Zhao X J, Tao S C, Yao K Y. Higher Atmospheric Physics, Beijing: Meteorology Press, 1991 ( in Chinese ) ]  
 [ 24 ] 孙景群. 大气电学手册. 北京: 科学出版社, 1995 [ Sun J Q. Handbook of Atmospheric Electricity. Beijing: Science Press, 1995 ( in Chinese ) ]  
 [ 25 ] 庄洪春. 空间电学. 北京: 科学出版社, 1995 [ Zhuang H C. Space Electricity. Beijing: Science Press, 1995 ( in Chinese ) ]  
 [ 26 ] Kogelschatz U, Eliasson B, Egli W. J. Phys. IV France, 1997, 7 : C4  
 [ 27 ] Kanazawa S, Kogoma M, Moriwaki T et al. J. Phys. D : Appl. Phys., 1988, 21 : 836  
 [ 28 ] Gherardi N, Gouda G, Gat E et al. Plasma Source Sci. Technol. 2000, 9 : 340  
 [ 29 ] 罗思 J R. 工业等离子体工程(第一卷)基本原理. 北京: 科学出版社, 1998 [ Roth J R. Industrial Plasma Engineering ( Vol. 1 ): Fundamental Principle, Beijing: Science Press, 1998 ( in Chinese ) ]  
 [ 30 ] Roth J R, U. S. Patent 5669583, Sept. 1997  
 [ 31 ] Ho A Y, Kuo S P. Bull. Amer. Phys. Soc., 1990, 35 : 2067  
 [ 32 ] Stalder N R, Vidmar R J, Ecktron D J. J. Appl. Phys., 1992, 72 : 5089  
 [ 33 ] Eldridge O C, Scharer J E et al. Bull. Amer. Phys. Soc., 1990, 35 : 2067  
 [ 34 ] Combs L H, Liu C. Roth J R. Bull. Amer. Phys. Soc., 1990, 35 : 2068  
 [ 35 ] Woodworth J R, Green TA, Frost C A. J. Appl. Phys., 1985, 57 : 1648

[ 36 ] Smy P R. *Advances in Physics* ,1976 ,25 :517  
 [ 37 ] Bastien F , Marode E. *J. Phys. D : Appl. Phys.* , 1979 , 12 : 249  
 [ 38 ] Finlayson - Pitts B J , Pitts J N. *Atmospheric Chemistry : Fundamentals and experimental techniques*. New York : John Wiley & Sons , 1986  
 [ 39 ] Nishikida K , Nishio E , Hannah R W. *Selected applications of modern FTIR techniques*. Tokyo : Kodansha Ltd. , 1995  
 [ 40 ] Levenson M D , Kano S S. *Introduction to nonlinear laser spectroscopy*. San Diego : Academic Press , Inc. , 1988

[ 41 ] Braithwaite N St J , Allen J E. *J. Phys. D : Appl. Phys.* , 1988 , 21 : 1733  
 [ 42 ] Chabert P , Sheridan T E *et al.* *Plasma Source Sci. Technol.* , 1999 , 8 : 56  
 [ 43 ] Hayashi D , Katoda K. *J. Appl. Phys.* , 1998 , 83 : 697  
 [ 44 ] 庄洪春 私人通信 [ Zhuang H C. Private communication ( in Chinese ) ]

( 未完待续 )



· 物理新闻与动态 ·

### 最远的人造物体

最远的人造物体是 Voyager 1 号宇宙飞船 ,它与 Voyager 2 号宇宙飞船是在 1977 年飞离地球射向太阳系的. 现在 Voyager 1 号宇宙飞船探测到在它的附近 ,高能粒子的数量有着显著地增长. 对于这个信息有两批科学家表示了不同的看法. 他们的观点同时发表在 2003 年 11 月 6 号出版的 Nature 杂志上.

以 Krimigis 教授为首的研究组认为 ,目前 Voyager 1 号宇宙飞船离开我们的距离约为地球到太阳距离的 85 倍. 在这个区域内 Voyager 1 号宇宙飞船将遭遇到由太阳粒子层形成的太阳系的“ 终端激

波 ” 粒子流的速度在碰到星际介质时 ,其速度将由超音速转变为亚音速 ,激波的前沿将对粒子起加速作用 ,因此造成了 Voyager 1 号宇宙飞船在其周围观察到大量的高速高能粒子流.

但 McDond 等教授却有着不同的看法 ,他们认为 Voyager 1 号宇宙飞船根本还没有到达太阳系 “ 终端激波 ” 区域 ,因此这些高能粒子的出现只是由于反常宇宙射线所导致的结果. 他们列举的理由相对来说不太能令人信服.

( 云中客 摘自 Nature , 6 November 2003 )



## 无锡市苏威试验设备有限公司

WUXI SUWEI TESTING EQUIPMENT CO., LTD.

苏威公司是一家集科研、设计及制造各类模拟气候环境试验设备的专业性企业。本公司现已通过 ISO 9001:2000 质量管理体系认证。产品有：适于作步入式恒温、高低温、高低温湿热、高低温交变湿热、恒定湿热、高温恒温、盐雾腐蚀、滴水淋雨、紫外灯( 氙灯 )耐气候、砂尘、霉菌、振动、跌落等各种试验的试验设备。

<http://www.wxsuwei.com>



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱 高低温交变湿热试验箱



GDJS-系列



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



YWX/Q-系列

盐雾腐蚀试验箱

地址：无锡市山北双河大庄 1 号      销售热线：0510-3725132 3723557      北京办事处：010-68633994 13671120840  
 电话：0510-3019806(总机)      传真：0510-3739455      广州办事处：020-86259303 13672423931  
 邮编：214037      手机：0-1390619778      西安办事处：029-87441566 13689268474