

# 尘埃等离子体

王 龙

尘埃等离子体是一种复杂的物质形态，由普通的等离子体和悬浮在其中的固体颗粒组成。一般的等离子体由带负电的电子和带正电的离子组成，再加入固体颗粒就形成三组分的物质（图 1）。等离子体中的作用主要是静电的相互作用，而悬浮在等离子体中的颗粒一般也是带电的，所以这些颗粒也参与了与其他两种粒子的相互作用，使这种物质形态内的过程更复杂。

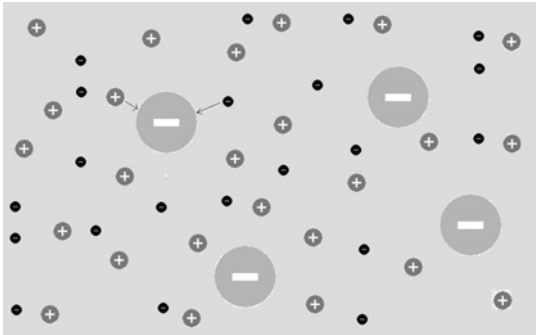


图 1 尘埃等离子体的组成

进入等离子体的固体颗粒为什么也带电呢？这是因为，在等离子体中不断作热运动的电子和离子经常与固体颗粒碰撞而被俘获（图 1），将自己的电荷传给颗粒。然而，电子所携带的负电荷和离子所携带的正电荷不能完全抵消，这是因为即使在同样的温度下，质量小的电子的运动速度远大于离子，所以单位时间内被颗粒俘获的电子要远高于离子，使颗粒带负电荷。但是，在一定的环境下，这个颗粒负电荷增长过程不是无限继续下去的。当一个颗粒的负电位（这个负电位由它所携带的纯电荷，即正负电荷量之差，和它的尺寸决定）增长到一定程度时，它通过静电的作用吸引正电荷，排斥负电荷，致使两种粒子流相等，电位和纯电荷就不再增长。

这个颗粒充电是个很复杂的过程。虽然等离子体中的颗粒一般带负电，有些情况也带正电。例如存在强的光辐射时，入射到颗粒表面的光会产生光电子离开表面，使颗粒添加了一个正电荷。

这种颗粒荷电现象是非常普遍的，不限于尘埃等离子体。例如我们熟悉的雨滴一般是带电的，虽

然其电荷微弱不足以影响其运动。其荷电过程可能发生在带电的雨云中，也可能在降落过程中由与空气的摩擦形成。后一种原因也造成空气中的尘埃，或被大气物理学家称为气溶胶的微小固体或液体颗粒带电。

尘埃等离子体广泛存在于自然界，典型的如土星的光环（彩图 1，本文涉及的一些彩图，请参见本期中心彩插 7、8 页）。它是由尺寸从 1 米到亿分之一米的尘埃颗粒组成的。此外，彗星尾巴（彩图 2）、一些星际云，都可看成尘埃等离子体。

但是尘埃等离子体作为研究对象是从 20 世纪 80 年代才开始的。部分起因来自土星光环的观测与研究。当时在土星光环中观察到一些轮辐式结构（彩图 3）。这种结构可以持续一小时以上，在几分钟内看到变化。图中的几幅小图就是分别间隔几分钟照的。因为光环中的离子运动都是沿环绕土星的轨道而进行的，所以用传统理论不能解释。但是后来用等离子体领域里熟悉的不稳定性理论解释了这一现象。所谓不稳定性，是等离子体中常见的现象，就是有某种原因导致了某种运动或变化，而这运动或变化的结果又加剧了这一原因，导致增长或振荡。解释土星轮辐式结构的模型是认为有外来大型颗粒入射到土星环，使等离子体局部密度变化，导致电场扰动，顺环运动的尘埃颗粒在这里积累，产生局部变黑效应。而这一局部变化可以作为波在径向传播，形成轮辐结构。

在与天体物理毫不相干的另一技术领域也发现了尘埃等离子体的踪迹。这个领域就是迅速发展的大规模集成电路的制造业，或称 IT 业。现在的 IT 业广泛使用等离子体技术，如等离子体刻蚀、镀膜。这样的工艺过程当然要求很清洁的环境，避免环境中的尘埃污染成品。但是这样的污染难于完全避免，因为它们不完全来自环境而主要来自等离子体过程。这是因为，等离子体中的离子会与固体器壁强烈作用，将器壁材料溅射进等离子体，或者一些反应气体会合成固体颗粒。例如，粒子在石墨电极或铝真空室壁上溅射出来的碳或铝离子在空间结合成微粒。一些气体在等离子体条件下也可反

应产生固体微粒。如硅烷和乙炔中的放电产生碳化硅微粒。这样的微粒的产生往往是普遍的、难以避免的。它们往往在被处理的载体上空形成尘埃云（彩图 4）。

在等离子体加工工艺中，这些尘埃微粒是十分有害的。在放电结束后，这样的微粒会停留在芯片的电路板上造成击穿（图 2）。而且，随着大规模集成电路加工尺寸的越来越小，原先可能是无害的 10 纳米尺度的微小微粒也可能充当这种“杀手微粒”。据说，等离子体加工业的 50% 的经济损失来自尘埃微粒。这当然提出一个如何控制微粒的产生和运动的问题。而且要求这个问题的解决越来越紧迫。

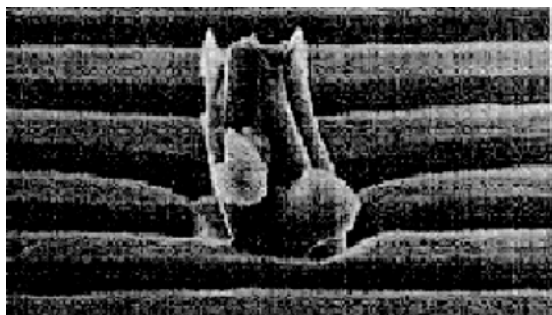


图 2 一颗沉积在集成电路上的微米级“杀手”颗粒

所幸实验室的尘埃等离子体所带来的并不都是问题。在某些等离子体条件下，在空间形成的微粒淀积在载体表面会生成有用的纳米晶体薄膜，可用于太阳能电池。很多纳米材料包括  $^{60}\text{C}$ 、纳米管也可在等离子体条件下生成。其方法可能是弧光放电、高频放电或激光等离子体。大家知道，这样几种纳米材料都是高度有序、原子排列整齐的物质结构，却在高度无序的放电等离子体中产生，实在是令人惊讶的事。

一般来说，等离子体中的颗粒成长是个复杂的过程，以硅烷（甲烷中的碳原子以硅代替）中的颗粒生成为例（彩图 5）。其气体原子在等离子体环境下被激发或电离后，结合成多体，再形成团簇。团簇仍为微观结构，它进一步形成纳米晶体，进入介观结构。然后，它们通过凝聚过程长大形成宏观的颗粒。

我们在图 1 上可以看到，悬浮在等离子体中的固体颗粒可以通过不断收集环境中的电子离子（还有中性的原子分子未在图中表示），但是这种增长速度很低，主要增长机制是凝聚，即不同的

颗粒聚合在一起。而且这样的凝聚主要是大颗粒和小颗粒间的聚合。这个道理从简单的考虑就可理解。两小颗粒间由于碰撞截面小而发生几率低，两大颗粒间由于相互运动速度低也发生几率低。而大颗粒收集小颗粒的结果就是它们都发展成疏松的菜花状（图 3）。这种颗粒生长过程在自然界实际上是常见的，例如冰雹就是类似的形状（彩图 6）。

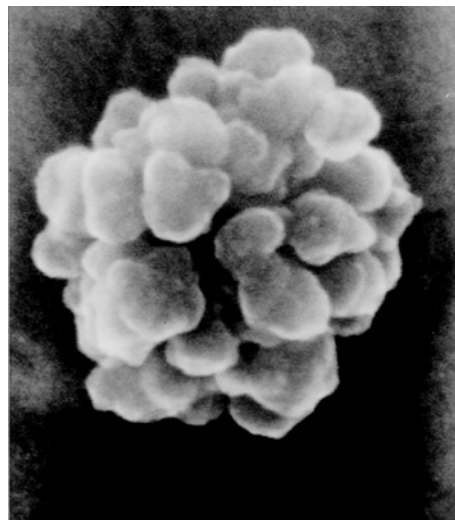


图 3 等离子体环境下生长的碳颗粒

这个生长机构的另一证明是观察实验开始后生成颗粒尺寸分布随时间的变化（图 4）。从实验得到的图上可以看到，颗粒是同步长大的，就是说，随着这批颗粒的长大，在同样气体环境下，似乎没有新的颗粒生成。其原因，当然是新生的小颗粒被已长成大颗粒“吃掉”了。

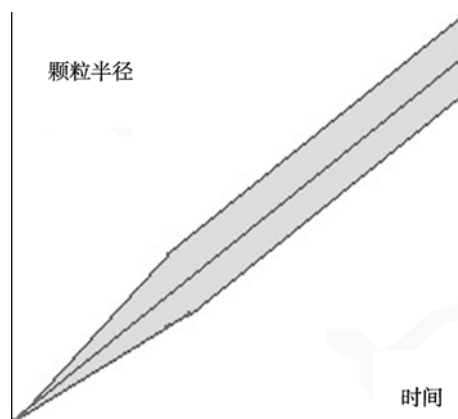


图 4 生长颗粒半径分布随时间变化

所以从彩图 5 看，等离子体中的颗粒生长过程是很复杂的，涉及多层次的物质结构和物理。

但是，真正使人对尘埃等离子体刮目相看的是另外一件事情。早就有人预言，尘埃等离子体会形成晶体。这个预言在 20 世纪 90 年代在实验上得到验证。这种研究使尘埃等离子体变成一种纯基础研究。

这样的实验往往使用比较简单的放电装置，产生低密度低温等离子体。尘埃的加入有两种形式。一种是从外界加入，例如使用小玻璃球，或者用一些植物的孢子。它们的尺寸可以非常均匀。第二种方法是用气体反应合成。在后者，可以观察不同颗粒尺度下的相互作用。

这样的有序颗粒分布往往是二维的，悬浮在等离子体上方。有时在垂直方向也有几层结构。彩图 7 是一个实验设备的侧面照。其中蓝色的是等离子体，上方红色的是用激光束照明的尘埃颗粒。如果从上方观察，有时可以看到规则的晶体结构（彩图 8）。

同样是尘埃等离子体中的组分，为什么尘埃颗粒可以组成规则的晶体结构而电子离子不行呢？这是因为，尘埃颗粒带电很多，以至于它们相互之间的位能可以和它们的动能相比甚至大得多。这样的等离子体称为强耦合等离子体。但是，前面说过，尘埃颗粒带的都是负电，为什么能形成晶体结构呢？这是因为，等离子体在边界处会形成一个负电鞘，使得带负电的颗粒处在一个位阱中。

这样的研究除去好玩以外，有什么意义呢？意义在于，它是凝聚态物理过程的一种模拟。大家知道，凝聚态的晶格结构是微观尺度的，不易直接观察。而这样的尘埃等离子体实验中，所形成的晶格是可以肉眼观察到的，所以成为研究凝聚态物理的工具。

这种研究分为两类。一为结构研究，二为动力学研究。所谓结构研究，主要是研究相变过程，怎样从气态到液态、固态，以及结构中的课题如晶体缺陷、粒子扩散、杂质原子的作用等。而动力学问题，主要是波的传播。

彩图 9 是一个直流放电形成的尘埃等离子体的垂直剖面图。因为照相有一定曝光时间，看到颗粒呈长形实际上表示它们在作振荡。可以看出，在下方，颗粒在作规律性的震荡运动而且形成波动。在

中间层，颗粒排列比较规整。而在上方，颗粒在作对流运动。彩图 10 是另一幅类似照片。其中的颗粒也是在垂直方向波动。这样的波是一种自激发的尘埃声波，类似于固体物质中的弹性波。

等离子体中的尘埃构型是形形色色的。图 5 是磁场中的等离子体中的尘埃颗粒构成的漩涡图形。

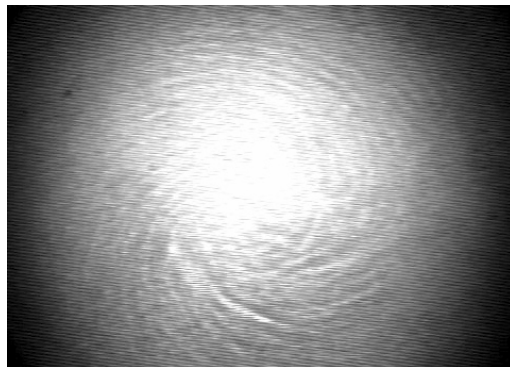


图 5 磁场下的尘埃等离子体漩涡结构

而在尘埃等离子体位形中最令人惊异的是空洞的观测。所谓空洞就是尘埃构型中没有尘埃的部分。而更奇怪的是它们的边界十分清晰（图 6）。使用各种模型试图解释这一新奇现象，但没有一种模型被广泛接受。

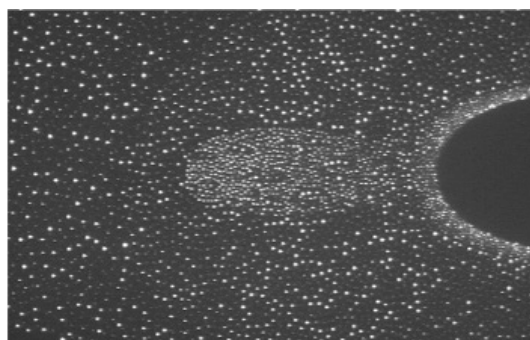


图 6 尘埃等离子体中的尘埃空洞

在模型建构中，最重要的问题当然是颗粒以及颗粒和等离子体间的相互作用力。两个带电的颗粒间的作用力是十分简单的，就是库仑静电力。但是浸在等离子体中的带电颗粒的作用力就十分复杂了。其中一个问题就是它们之间是否存在吸引力。我们前面说过，一般的等离子体中的尘埃颗粒带的都是静电，带同样电荷的颗粒间只能有排斥力，不可能吸引。然而一些实验现象似乎表明有吸引力存在。例如图 7 所表示的二维尘埃晶体结构中，有一些单元是两个颗粒靠在一起，构成“二原子分子”。

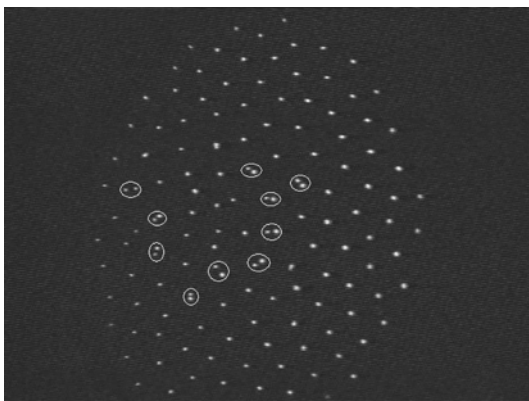


图7 尘埃位形中的“双原子”构型

如果是单纯的排斥力，即使有一个外势，也不能构成这样的位形。那么，这一实验结果是不是就证明了吸引力的存在了呢？也不能这样说。因为仔细观察，这个构型不严格是二维的。如果涉及第三维，问题就比较复杂了。所以，对于等离子体中带同样电荷的颗粒间是否有吸引力的问题，在学术界尚未达到共识。

关于尘埃等离子体中力的相互作用涉及另一研究领域，就是胶体物理。胶体也是一种混合相物质，例如泥浆、油漆，可视为微小固体颗粒悬浮在电解液中，因此颗粒也是带电的。从理论分析看，颗粒

间相互作用类似于尘埃等离子体。从实验结果看，也似乎有彼此吸引的作用。

尘埃等离子体，如果包含空洞，位形是极其丰富多彩的，即使从艺术角度看也是很有意思的。彩图 11 是在纽约举行的一届科学艺术大奖赛上曾获一等奖的作品。照片下方是一放电电极，上方漏斗状是形成的尘埃等离子体。但这样的照片在尘埃等离子体研究中不算什么杰作，因为更好看的照片比比皆是。

上面所介绍的一些实验结果中的颗粒尺寸都比较大。在气体合成的实验中，当颗粒处于比较小尺寸时（1 微米以下），颗粒结构有强的流动性，流体性质强，发生一些强的非线性现象。彩图 12 为一例。它表示了一组连续拍摄的照片，其中发光的是尘埃云（不能分辨个别颗粒），暗色的是空洞。如果看视频，就会看到它们流动组合成如梦幻一样的花样。但从物理学角度看，这样的现象尚不能完全解释。

上面谈到，尘埃等离子体涉及许多自然现象、基础研究和应用领域。实际上，它的涉及面还不止这些。例如太阳系形成早期，就很类似尘埃等离子体中的凝聚过程。

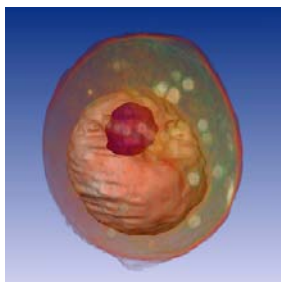
（中国科学院物理研究所 100190）



## 科苑快讯

### 返老还童的秘密

所有人都会逐渐衰老，但在繁育后代时，无论父母年轻还是年老，所有新生婴儿的年龄状态都是一致的。现在美国麻省理工学院的阿蒙（Angelika Amon）和同事似乎找到了返老还童的秘诀。他们在酵母细胞孢子中发现了控制年龄的相关蛋白质团和 DNA 片段。



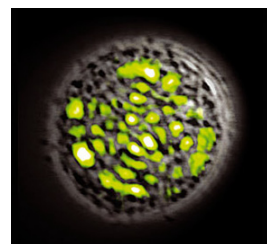
X 射线电子显微镜下的酵母细胞，内部浅色的是细胞核、深色的是大液泡

一个叫做 NDT80 的基因在孢子形成过程中起着关键作用，它一旦开启，酵母细胞的寿命就会加倍。NDT80 在酵母菌孢子形成过程中可消除由衰老诱导的细胞损伤、使生命时钟重置，换句话说就是“返老还童”。

（高凌云编译自 2011 年 8 月《欧洲核子中心快报》）

### 生物激光

美国波士顿市威尔曼光医学中心（Wellman Center for Photomedicine）、麻省总医院（Massachusetts General Hospital）的盖泽（Malte C Gather）、邵环云（Seok Hyun Yun）利用基因工程改造人的肾脏细胞使其表达源自水母的绿色荧光蛋白质（green fluorescent protein, GFP, 由于其荧光性，常在细胞生物学中作为标记物）。



研究者将每个细胞置于微小的镜子之间，细胞就在光照下产生了微小的激光，在镜子之间来回反弹后，最终发出强烈的绿色光束。在发射激光的过程中，细胞一直保持活性。事实上，这是一种能够自我修复的激光，绿色荧光蛋白质破坏后还可再生。而在传统类型的激光中，产生激光的介质会随着时间而退化，直至停止工作。

（高凌云编译自 2011 年 7 月《欧洲核子中心快报》）