

物理“海马”、数学“海马”与生物“海马”*

高鸿钧^{1,†} 时东霞¹ 薛增泉²

(1 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100080)

(2 北京大学信息科学技术学院电子学系 北京 100871)

摘要 在 C_{60} -TCNQ(一种有机分子名称的缩写)和纯的 TCNQ 有机分子薄膜中,文章作者得到了一种形似海洋中生存的动物海马的图案结构,取名为“海马”分形结构.这种“海马”图案在旋转 180 度时具有近似的对称性,但是不同于简单的二维反转对称.在数学中用复变函数的多项式,通过 Julia 对复杂空间中函数的纯粹数学映射(即 $z \rightarrow z^2 + c$, 其中 $c = -0.74543 + 0.1130i$),也能模拟出相似的“海马”图案.对于“海马”分形,文章作者提出如下的一种形成机制,即:在薄膜形成初期过程中,中性分子或团簇中存在部分荷电粒子,由于库仑排斥作用,成核和生长过程中会形成对称性破缺,最终形成“海马”状分形.“海马”的有趣图案,加深了人们对自然与科学统一的认识,激发了人们对自然本源的探索激情.

关键词 薄膜, C_{60} -TCNQ, TCNQ, “海马”分形

“Seahorses” in Mathematical, Physical and Biological Systems

GAO Hong-Jun^{1,†} SHI Dong-Xia¹ XUE Zeng-Quan²

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

(2 *Department of Electronics, Peking University, 100871*)

Abstract We describe the formation of unique “seahorse” fractal patterns in the growth of fullerene – tetracyanoquinodimethane (C_{60} -TCNQ) and pure TCNQ thin films. These “seahorse” patterns are S-shaped forms with “fins” on the outer edges of the curved arms, like real biological seahorses. These “seahorse” fractal patterns exhibit an approximate symmetry under rotation by 180° , but strongly break two-dimensional inversion symmetry. Similar “seahorse” patterns can also be simulated by the Julia set from a pure mathematical mapping of the function in complex space: $z \rightarrow z^2 + c$, with $c = -0.74543 + 0.1130i$. A novel formation mechanism is proposed, involving the charging of part of the neutral molecules and clusters in the initial stage of film growth, and the broken symmetry arising from the Coulomb repulsive force in the nucleation and aggregation process. The similarity of physical, biological and mathematical seahorses shows the consistency of nature, which should stimulate our interest for deeper scientific explorations.

Keywords thin films, C_{60} -TCNQ, TCNQ, “Seahorse” patterns

在物理、化学和生物等领域,存在着许多令人惊奇的非常美丽的分形图案,吸引了许多科学家的目光^[1-4].自然界的自相似分形结构有很多,例如,一棵参天大树与它自身上的树枝及树枝上的枝杈,在形状上有很多相似之处,但有细节上的不同;树叶的叶脉,也有类似的性质,形状相似,细节不同.这类相似现象物理学上用分形结构来描述.数学上也有专门研究自相似结构的几何学,即分形学.在薄膜生长

过程中,人们观察到很多这类二维相似结构.近年来,我们系统地研究了富勒烯聚合物薄膜的生长^[5-7],这是一种在电学、光学和光电等方面具有优异特性的有机材料^[5,8,9].本文中,我们采用离子团

* 国家自然科学基金(批准号:60621061,60620120443)资助项目
2008-01-08 收到

† 通讯联系人. Email: hjgao@iphy.ac.cn

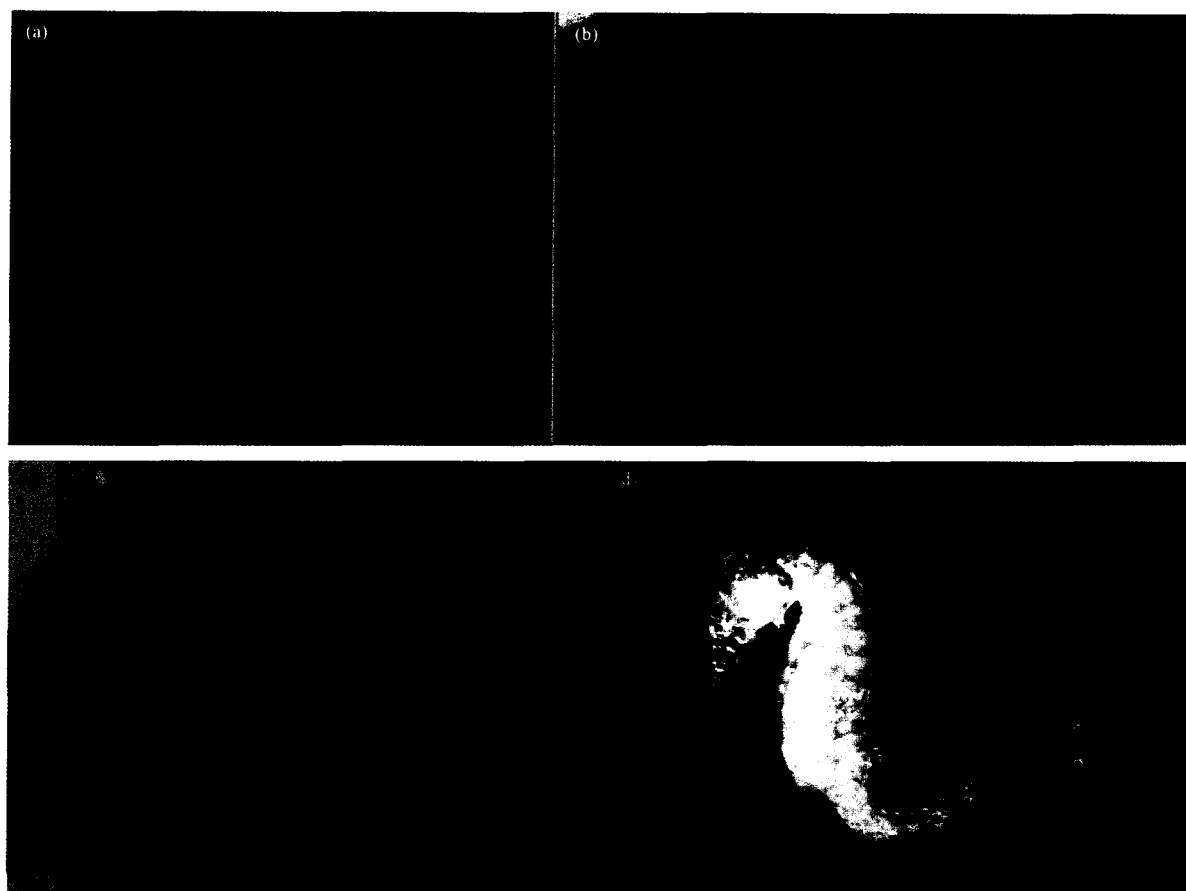


图1 C_{60} -TCNQ“海马”TEM像 (a)“海马”分形单胞(照片尺寸: $9.7 \times 7.3 \mu\text{m}^2$);(b)一对平行“海马”(图片尺寸: $10.1 \times 7.7 \mu\text{m}^2$);(c)一对非平行“海马”(图片尺寸: $7.6 \times 5.8 \mu\text{m}^2$);(d)真实海马照片

束沉积方法(ICB)制备 C_{60} -TCNQ 和纯 TCNQ 有机薄膜,观察到了一种奇特的准二维分形图案^[6],形似“海马”,呈现S形,即具有弯曲的主干,其边缘长有小的“鳍”.每个S形的图案都明显地与二维反转对称不同,这种对称性破缺在薄膜生长的文献中非常少见^[1,3,4].经过查找,仅发现在二维或者准二维的体系中有三个实验结果,存在着类似的对称性破缺:细菌的聚集^[10],磷脂在空气-水界面处的二维晶体生长^[11]和种子发芽后叶序的生长^[12].这三种特别的对称性破缺体系,在理论上都已经获得比较满意的解释,但是我们获得的“海马”分形,在生长形貌学领域是非常独特的,没有一种理论能明确地解释其生成原因.

根据实验结果,我们提出了一种全新的生长机制:在成核生长过程中,由于存在部分带电团簇,使得临界核荷电因受库仑排斥作用而导致对称性破缺,最终形成“海马”分形^[13,14].在进一步的实验中,在基底表面加一平行电场,发现分形的生长方式改变了.此结果有力地证明了我们提出的生长机理的

正确性.

ICB方法^[15,16]描述如下:具有较高蒸气压的原子或分子从加热的坩埚口蒸出,进入高真空室,这是个绝热膨胀过程,经迅速冷却碰撞聚集成500—2000个原子或分子组成的松散团簇.团簇在继续前进中经过能量为50—200eV的电子束照射区时,一部分团簇荷电成为离子团.然后经过400—2500V的高压加速,最终打在基底表面,通过扩散、迁移、成核和生长过程,形成薄膜.通过调节系统参数,如加速电压 V_{ai} ,离子流(即沉积通量) F ,基底温度 T_s ,电离电压 V_e ,电子束流 I_e ,坩埚温度 T 等,可以获得具有不同结构特征的薄膜.ICB制备有机分子具有如下优点:(1)熔点高的有机分子,或不溶于有机溶剂和酸的有机分子,都可以采用这种方法;(2)制备过程是在高真空中进行,是一种无污染的薄膜制备方法;(3)沉积条件容易控制;(4)与分子束外延方法相比,成本低廉;(5)由于以团簇的方式沉积,效率很高,到达基底表面的分子和团簇都具有较大的动能,并且可以通过改变加速电压来控制;(6)如果射

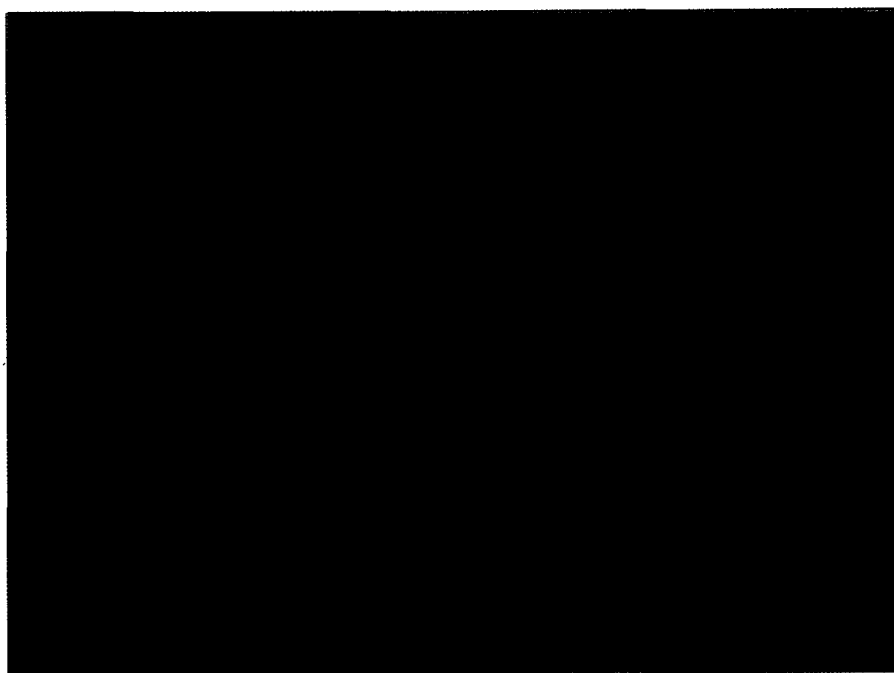


图2 C_{60} -TCNQ的TEM像,被称为海马“动物园”(沉积条件为: $F \approx 6 \text{ nm/min}$, $I_c = 2 \text{ mA}$, $V_c = 100 \text{ V}$, $V_{ai} = 1000 \text{ V}$, $T_s = 50^\circ \text{C}$)

束能量较高,则会对基底有所损坏,增强了成核过程. 由于上述种种优点,因此我们选择ICB方法来进行有机薄膜的制备^[6,7]. 在适当的实验条件下,可以得到良好的单晶有机薄膜材料. 但是,在另外一些实验条件下,沉积材料会非均匀成膜,得到独特的“海马”状枝晶生长形貌. 另外,ICB系统上配备有飞行时间质谱仪(TOFMS),能够原位监控沉积过程. TOFMS是一款设计简单,分析速率很快的质谱仪设备,所有的质量成分都可以在数毫秒内分析完毕. TOFMS的离子区位置刚好位于坩埚的外侧. 一小部分来源于坩埚喷嘴的团簇分子被用于质谱分析. 其余大部分的团簇分子将沉积到基底上.

图1给出了一些典型 C_{60} -TCNQ“海马”的透射电镜(TEM)像,(a)~(c)几乎是在相同的条件下形成的,沉积通量 $F \approx 5 \text{ nm/min}$,离子束电流 $I_c = 2 \text{ mA}$,电离电压 $V_c = 100 \text{ V}$,加速电压 $V_{ai} = 1000 \text{ V}$,衬底温度 $T_s = 50^\circ \text{C}$. 图1(a)是单个S型 C_{60} -TCNQ“海马”单胞. 图1(b)显示的是两个接近平行排列的左手性“海马”单胞,而图1(c)显示的则是两个相反手性的“海马”单胞. 图1(d)是真实海马照片,这里引用是为了说明为什么这种分形取名“海马”.

图2是TEM低放大倍率下的样品像,当初类似含有大量“海马”单胞的TEM像在国外杂志发表后,引起学者兴趣,评述为海马“动物园”. 其中包含

了两种手性和各种尺寸大小的“海马”单胞. 从大范围来看,左手性和右手性的“海马”单胞出现的几率几乎是相等的.

同样,我们在纯净的TCNQ的薄膜中也得到了“海马”分形图案,如图3所示的原子力显微镜(AFM)形貌像. 图4是ICB方法生长纯净的TCNQ单胞得到的“海马”图案的TEM像, $T_s = 60^\circ \text{C}$,其他条件均与图2相同. TCNQ与 C_{60} -TCNQ分子的图案非常相似,左手性和右手性的结构同时出现.

进一步的实验证明, C_{60} -TCNQ中 C_{60} 的浓度对生长图案有着很强的影响. 尤其是当 C_{60} 的浓度超过一个临界值($\sim 20\%$)后,“海马”图案就无法得到了.

单个“海马”单胞边沿的不规则枝状分布表明其在表面上是分散型聚集的^[1]. 这种聚集通常用小于2的分数维数来表征. 使用盒维数法进行分析,有 $A = S \cdot R^d$. 其中 A 是图形中心半径为 R 所包含的给定图案的面积, $S = 2.65 \pm 0.15$ 为形状因子, $d = 1.7 \pm 0.1$ 为分形维数^[17]. 每一个“海马”图形周围都有一个贫瘠区,在这个区域内, C_{60} 和TCNQ图簇的浓度都比远离该图形的地区浓度低得多,因此可以作为表征“海马”单胞凝聚的一个关键因素. 此外,在远离“海马”图形的区域内,存在许多更小(范围从数十到数百纳米)而且分布更密集的团簇. 这表明

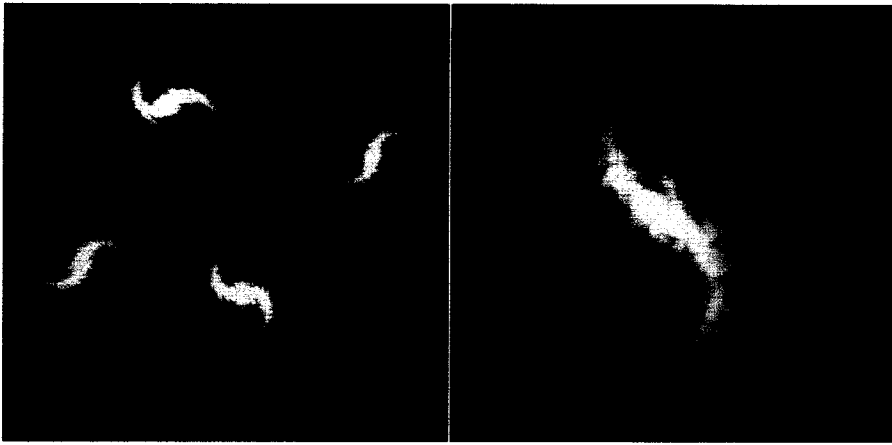


图3 TCNQ生长的“海马”分形图案的AFM形貌像(图片尺寸:左 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$;右 $12 \times 12 \mu\text{m}^2$)

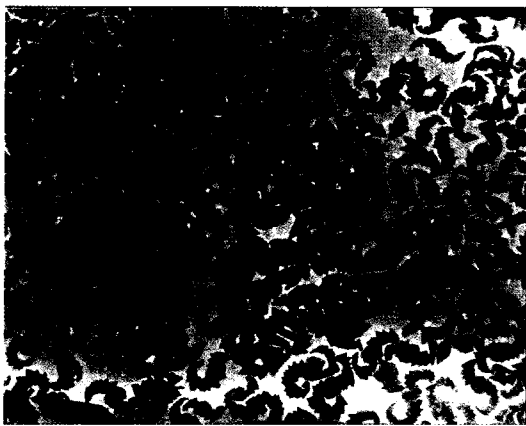


图4 TCNQ生长的海马“动物园”的TEM像(照片尺寸: $33.5 \times 27.4 \mu\text{m}^2$;沉积条件: $T_s = 60^\circ\text{C}$,其余条件与图2相同)

在上述几个微米范围内,生长岛之间的相关性仅受某种团簇间的长程作用力的影响.很明显,这需要有全新的物理机制或者对已有机制进行重大的修改才能够解释这些观察的结果.

对 C_{60} -TCNQ和TCNQ两种分子,我们试图寻找其结构与ICB沉积参数之间的关系,找出控制这些图形生长的关键制备参数.研究发现,决定“海马”生长的最主要因素是沉积速率(即通量) F 、基底温度 T_s 和加速电压 V_{a1} .如果将 T_s 固定在一个合适的范围内,可以得到4种可能的生长机制都是通量 F 的函数.在极低通量时,再蒸发速率等于入射通量,成核、生长将停止.在较大的通量时,容易得到晶态块状结构.在极大的通量时,得到多晶薄膜.而“海马”图形是在通量 F 处于适中值时得到的,其大小介于得到晶态和均匀薄膜的两值之间.我们发现,在形成“海马”适当的通量 F 值范围内,通量 F 值的

增加会增加“海马”的密度,但同时“海马”的尺寸变小.如果固定包括通量 F 在内的其他沉积参数时降低基底温度 T_s 时,减小了团簇在基底表面扩散迁移率,增加成核密度,最后容易形成均匀的薄膜,而不是非均匀的枝状图案.相反地,增加 T_s ,提高了再蒸发速率,直到其与入射通量相等时,成核、生长将停止,不会有“海马”图案生成.若增加加速电压 V_{a1} ,则会提高入射束的动能,从而增加扩散团簇分子的迁移率,增加成核密度.基底的完善性也是一个影响因素,有时观察到的这些图案与基底的缺陷有很大关系.当基底表面含有位错缺陷时,会导致“海马”图案的某种排列生长,如图5所示,每根枝条像独立的“海马”,但是,所有的枝条都生长于缺陷处.基底上的缺陷能够成为分形生长的成核中心,即成核、生长受基底表面缺陷影响.



图5 C_{60} -TCNQ枝条状图案TEM照片(分形结构沿缺陷方向排列.沉积条件: $T_s = 70^\circ\text{C}$,其余条件与图3相同.照片尺寸: $44.7 \times 33.9 \mu\text{m}^2$)

最后,基底的结晶状态也是个重要因素,我们在各种单晶云母、 CaF_2 等基底上尝试生长 C_{60} -TCNQ

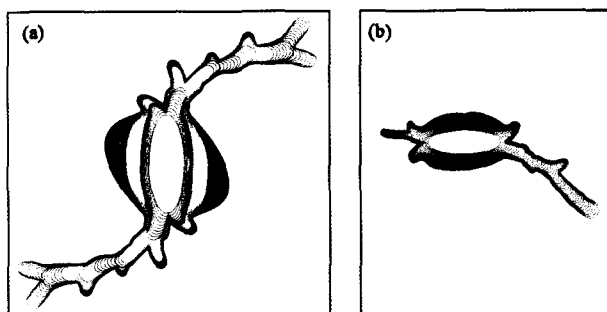


图6 基于连续模型的生长模拟 (a)与实验“海马”的形状相似,两个主臂都沿顺时针方向旋转,外侧长有小的鳍;(b)基底上加电场(图中水平方向)后生长的模拟,一个主支的生长受抑制,另一个继续生长不再弯曲

“海马”图案,都没有成功,其机制有待研究.

用X射线衍射对ICB沉积的TCNQ和 C_{60} -TCNQ“海马”分形进行了表征.我们发现,ICB沉积的TCNQ的X射线衍射谱^[7]中有一些峰显示是多晶结构. TEM的微束衍射显示,对于生长的 C_{60} -TCNQ和TCNQ“海马”的每个分支都包含许多小的方向规则的单晶.然而,这些单晶是处于亚稳态的,将样品暴露在TEM的电子束之下,3s后会转变为无定型态.通过高分辨TEM的快照可以监视此演变过程.在整个转变过程中,“海马”的整体形状保持不变.该行为类似于Liu等人报道的结果^[18].他们发现离子对无定型薄膜的轰击能够导致不规则花样的生长.当暴露在电子束下时,这些不规则花样样品转变为无定型结构,样品整体形貌保持不变,这类似于我们在“海马”分形中观察到的结果.

在我们实验中,所以能形成“海马”分形,是因为在用ICB方法沉积的团簇中,有一些(约10%)是荷电的团簇,其他是电中性的.在基底以扩散限制为主的运动、成核、生长过程中,荷电粒子对生长形状产生影响,由于荷电粒子间的排斥作用,在相距最远的两端,产生了生长优势,因此出现了S形结构.在这个过程中,荷电粒子间形成的电场,会对中性粒子产生极化作用,故生成了“海马”图案分形.

基于以上的分析,我们对“海马”的形成提出以下的物理机理:“海马”图样的生长主要来自于含有少数荷电粒子的中性团簇的扩散限制生长.中性团簇对生长起主要作用,一方面是因为它们数量大(90%),以随机扩散形式在基底上运动;另一方面,它们又被带电的核电场极化,形成某种优势的生长方向,最后产生了“海马”图案.

我们分析了几个相近的物理模型,包括“决定

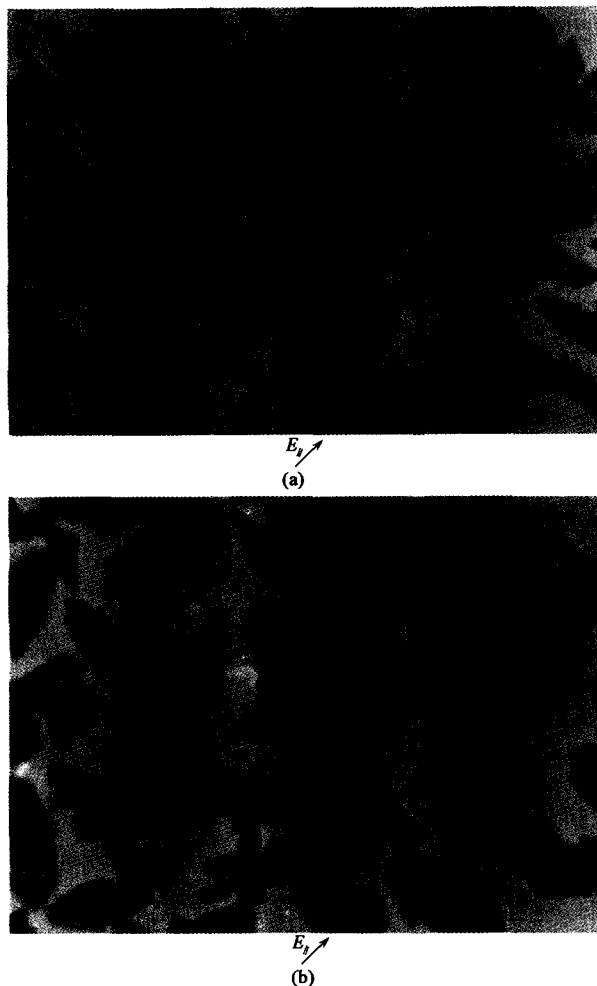


图7 平行基底电场 $E_{//}$ 时 C_{60} -TCNQ TEM像 (a)电场 $E = 100V/6cm$,绝大部分“海马”的“鳍”生长受到抑制,生长呈现出—端占优势;(b)电场 $E = 300V/6cm$.“鳍”完全受到抑制

性”和“非决定性”的“树”的生长模型,扩散聚集的蒙特卡罗拟合以及岛边界运动的连续模型^[14,19,20].关于岛所带的电荷 $Q(t)$ 的行为以及它在岛生长时的分布,团簇撞击到岛上的附着几率 P_s ,边界及表面扩散的相对强度,静电场强度,中性团簇的极化率 χ 都给出了详细的描述.在此我们只考虑能符合我们实验结果的一组假设,在边界上某点 (x, y) 处的生长正比于 $\exp[|x|E(x, y)|/2kt]$ (T 为适合团簇扩散的温度,可能比基底温度稍高).按此模型模拟结果,在成核以后的生长过程中,存在足够强的静电场作用,形成生长优势的两个臂的分开相隔180度,就像真实的海马一样.当两个臂长到一定长度 L_0 时就变得相当不稳定,发生“分叉”现象.这个长度由边缘和表面扩散的动力学上的竞争决定.我们发现,当 L_0 与 χ 在一个合适的范围内时,从主臂上分出的

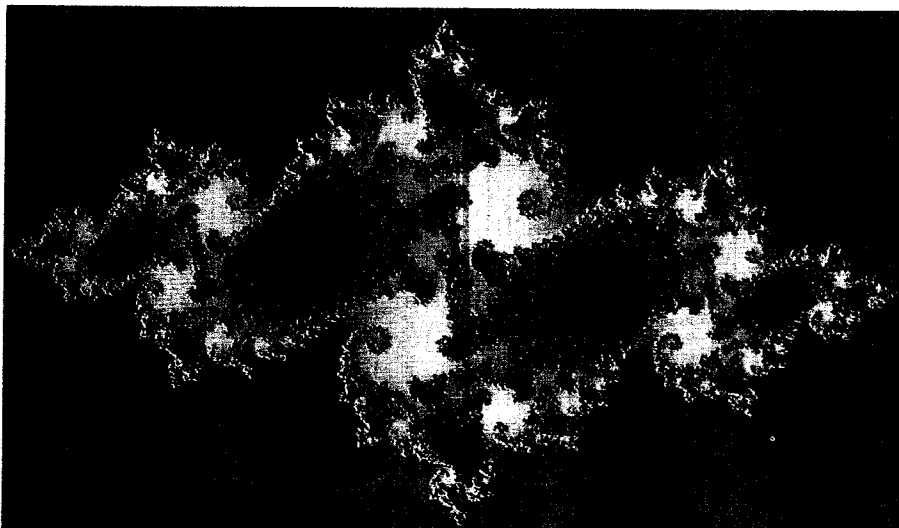


图8 由 Julia 分形公式得到的数学分形模型

一个叉总是会死去(即停止生长),成为“鳍”,另一个叉继续生长,直到长度达到 L_0 . 这种情况下,“活下来的”叉又以一定角度生长,直到成为一个鳍. 这个鳍的电势也将影响近邻分支的生长,结果就是,主臂不停地长出分支,在分支处向同一个方向弯曲,在主臂外边留下一个鳍. 令人满意的是,我们这些带电聚集模型的结果,与实验生长情况非常相似.

图 6(a)是由连续模型的数值模拟给出的生长结果,一个小的圆圈到了一个临界半径时候,变得不稳定,会被拉长,因此考虑初始条件是一个椭圆. 我们给这个椭圆加上一个微小的缺陷(在图中几乎看不见)来模拟噪音的影响. 生长的每一步都在图中表示了出来. 正如图 6(a)所示,这个小的初始缺陷导致了两个生长的臂,它们在不断分叉时弯曲,留下一个鳍在弯曲的外侧.

带电 + 中性粒子模型的合理性被以下事实支持:在 ICB 方法中,沉积到基底上的粒子大部分是中性的,其中小部分是带电的^[16]. 若静电荷在生长中起重要作用,那么在沉积过程中,在基底上加静电场可能对生长产生影响. 相关的实验是加一个与基底平行的电场 $E_{//}$,在其他生长条件不变的情况下,得到的结果见图 7. 我们在图 8(a)和(b)中均发现了不规则的直的形态,它的主轴与外加电场呈一个角度.

确定“海马”图形的基本形成机制是极富挑战性的,这一图案与一种特殊的结构相类似,这源于 Julia 对复杂空间中函数的纯粹数学映射: $z \rightarrow z^2 + c$, 其中 $c = -0.74543 + 0.1130i$ ^[21]. 在复平面中,水平坐标代表实数,垂直坐标代表虚数. 每个 Julia 集合

(有无限多个点)都决定一个常数 c ,它是一个复数. 在复平面上任意取一个点,其值是复数 z . 将其代入方程 $z \rightarrow z^2 + c$,进行反复迭代运算,即用旧的 z 自乘再加上 c 后的结果作为新的 z ;再把新的 z 作为旧的 z ,重复运算,就得到了令人难以置信的图案,图 8 是我们运用上述公式模拟得到的图形,这是数学上的一种类似我们前面得到的“海马”类的分形.

就我们所知,至今还没有有人在实验中观测过上述图形^[6]. 鉴于每个分形单胞周围都存在相应的贫瘠区,分形的 $\alpha \approx 1.7$ 都与二维扩散限制凝聚模型(DLA)所预测的数值相符^[1,22,23],可以得出可能的形成机制与 DLA 模型类似,但有细节不同. 与这些图形相比,“海马”图形在本质上是不同的,如果忽略“海马”首尾的微小差异,可以看出基本图形(见图 1(a))中存在清晰可见的 180° 旋转对称性.

我们描述了 C_{60} -TCNQ 与纯 TCNQ 在 ICB 沉积方法生长中 S 结构的形成,这是一种处于亚稳的多晶结构. 通过对沉积参数(特别是基底温度、流量、加速电压)的控制,形成了“海马”分形的奇特图案. 目前,没有观察到任何其他材料可以生长出这种 S 型图案. 这种新颖的形貌对理解其形成机理提出了一个挑战. 特别是这种二维的手性 S 图案不存在任何的转动关联,而仅仅是镜面反演,因此在图案形成过程中,自发地存在二维反转对称性破缺. 我们提出了这类分形的生长模型,认为二维的反演对称性只是在整个宏观尺度上被破坏了. 荷电效应、分子极化和诱导偶极或四极相互作用等在图案的形成过程中起了重要作用. 物理“海马”、数学“海马”与生物“海马”使人们所产生的遐想——自然与科学之关

联,需要更加深入系统地探索.

致谢 感谢吴全德、庞世谨先生、张振宇、G. S. Canright 教授的合作与讨论;感谢郁庆、蔡金明、田园、张成栋、陆洪亮、张连昌、毛金海等在实验和模拟方面的帮助.

参 考 文 献

[1] Vicsek T. Fractal Growth Phenomena. Singapore: World Scientific. 1992
 [2] Family F , Vicsek T (eds.). Dynamics of Fractal Surfaces. Singapore ; World Scientific. 1991
 [3] Nijhout H F, Nadel L , Stein D L (eds.). Pattern Formation in the Physical and Biological Sciences. New York; Addison-Wesley. 1997
 [4] Nakaya U. Snow Crystals. Cambridge: Harvard University Press, 1954
 [5] Cai J M, Bao L H, Guo W *et al.* Chinese Physics Letter, 2007, 24(10): 2918
 [6] Gao H J, Xue Z Q, Wu Q D *et al.* J. Mater. Res. , 1994, 9: 2216
 [7] Gao H J, Xue Z Q, Wu Q D *et al.* Thin Solid Films, 1997, 292: 40
 [8] Wang Y. Nature, 1992, 356: 585
 [9] Sariciftci N S, Smilowitz L, Heeger A J *et al.* Science, 1992, 258: 1474

[10] Ben-Jacob E, Cohen I, Shochet O *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1995, 75: 2899
 [11] Weis M R, McConnell H M. Nature, 1984, 310: 47
 [12] Douady S, Couder Y. Phys. Rev. Lett. , 1992, 68: 2098
 [13] Sandler I M, Canright G S, Zhang Z Y *et al.* Phys. Lett. A, 1998, 245: 233
 [14] Sandler I M, Canright G S, Gao H J *et al.* Phys. Rev. E, 1998, 58: 6015
 [15] Takagi T, Yamada I, Kunori M *et al.* Osterreichische Studien Gesellschaft fur Atomenergie. In: Proc. 2nd Int. Conf. on Ion Sources. Vienna, 1972. 790
 [16] Yamada I. Appl. Surf. Sci. , 1989, 43: 23
 [17] Feder J, Fractals. New York: Plenum, 1992
 [18] Liu B X, Huang L J, Tao K *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1987, 59: 745
 [19] Cohen D. Nature, 1967, 216: 246 ; MacDonald N. Trees and Networks in Biological Models. New York: Wiley, 1983
 [20] Saito Y, Misbah C, Müller-Krumbhaar H *et al.* In: Formation, Dynamics and Statistics of Patterns. Vol. 1. Eds. Kawasaki K, Suzuki M, Onuki A. Singapore: World Scientific, 1990, 236
 [21] Peitgen H O, Richter P H. The Beauty of Fractals. Berlin: Springer - Verlag, 1986
 [22] Witten T A, Sander L M. Phys. Rev. Lett. , 1981, 47: 1400; Phys. Rev. B, 1983, 27: 5686
 [23] Meakin P. Phys. Rev. A, 1983, 27: 1495

· 书评和书讯 ·

探索高等科教书店物理类书目推荐 (X)

| 作者 | 书名 | 定价 | 作者 | 书名 | 定价 |
|-----------------|---------------------------|-------|---------------|--------------------|------|
| W. Greiner | 量子电动力学 第3版(影印) | 85.0 | W. Thirring | 经典数学物理 第3版(影印) | 58.0 |
| W. Greiner | 量子力学对称性 第2版(影印) | 88.0 | 金观昌 | 计算机辅助光学测量 第2版 | 55.0 |
| D. B. Williams | 透射电子显微学:材料科学教材4卷本(影印) | 89.0 | 陈继民 | 激光现代制造技术 | 36.0 |
| W. Greiner | 量子色动力学 第3版(影印) | 89.0 | 季家镛 | 高等光学教程——光学的基本电磁理论 | 54.0 |
| W. Greiner | 经典力学 粒子系和哈密尔顿动力学(影印) | 95.0 | 蔡履中 | 光学(第三版) | 40.0 |
| W. Greiner | 经典力学 点粒子和相对论(影印版) | 85.0 | 车得福 | 多相流及其应用 | 60.0 |
| Kurt Binder | 玻璃质材料和无序固体——它们的统计力学导论(影印) | 45.0 | 程光煦 | 拉曼 布里渊散射(第二版) | 98.0 |
| F. Bechstedt | 表面物理原理(影印) | 58.0 | 吴代鸣 | 固体物理基础 | 32.0 |
| 陈亚孚 | 超晶格量子阱物理 | 28.0 | 叶良修 | 半导体物理学(第二版)上册 | 65.0 |
| 徐光宪 | 量子化学——基本原理和从头计算法(第二版)上 | 45.0 | A. N. 克莱兰 | 纳米力学基础——从固态理论到器件应用 | 45.0 |
| 陈钢 | 晶体物理学基础(第二版) | 49.0 | 徐家跃 | 新型弛豫铁电晶体——生长、性能及应用 | 30.0 |
| | 核材料科学与工程丛书(12本) | 702.0 | David K Ferry | 纳米结构中的输运(影印) | 80.0 |
| F. P. Incropera | 传热和传质基本原理习题详解 | 45.0 | A. R. Leach | 分子模拟的原理和应用 第2版(影印) | 98.0 |
| 王欲知 | 真空技术 第2版 | 55.0 | M. Adachi | 自组织纳米材料(影印) | 56.0 |
| 达道安 | 真空设计手册 | 186.0 | 倪星元 | 纳米材料制备技术 | 25.0 |
| 钟迪生 | 真空镀膜——光学材料的选择与应用 | 38.0 | 刘锡三 | 强流粒子束及其应用 | 58.0 |
| 叶恒强 | 透射电子显微学进展 | 70.0 | 方鸿生 | 材料科学中的扫描隧道显微分析 | 5.5 |
| 进藤大辅 | 材料评价的高分辨电子显微方法 | 68.0 | 盛美萍 | 噪声与振动控制技术基础(第二版) | 19.0 |
| 施敏 | 半导体器件物理与工艺 | 55.0 | 张新安 | 振动吸声理论及声学设计 | 16.1 |
| 近角聪信 | 铁磁性物理 | 52.5 | 邱励俭 | 聚变能及其应用 | 96.0 |
| D. J. Sellmyer | 先进磁性材料手册 1-4 卷 | 445.0 | 王义道 | 原子的激光冷却与陷阱 | 40.0 |

本店以经营科技专著为特色,以为科技工作者和大专院校师生提供优质服务为宗旨,欢迎广大读者来店指导或来电查询.

电话:010-82872662、62556876、89162848

网址:<http://www.explorerbook.com>

电子邮箱:explorerbook@vip.163.com

通讯地址:北京市海淀区海淀大街31号313北京探索高等科教书店

邮政编码:100080

联系人:徐亮、秦运良