

线性理论进行了广泛的研究,对诸如光导、边带不稳定性、混沌现象等非线性效应以及加速器中电子束流崩溃效应、尾场效应等取得了初步的研究结果。

开展了系统的 FEL 物理和束流物理的数值模拟工作。北京应用物理与计算数学研究所和中国原子能科学研究院等单位发展了一维、二维和三维的配套的数值模拟软件包,并紧密配合实验,进行了实验方案的设计、预估和实验结果的分析。于敏^[10]教授提出了分析 FEL 纵横的理论方法,刘盛纲^[11]教授发展了 FEL 的相对论空间电荷波理论。这些工作都独具特色,受到国际同行专家的好评。

近年来,我国科技工作者在自由电子激光的理论和实验研究方面取得了长足的进展,加深了对 FEL 物理的理解,初步掌握了相关的技术,积累了宝贵经验,培养了人才。几种不同类型的自由电子激光,包括拉曼型 FEL 曙光一号、射频加速器型 FEL、电磁波泵浦 FEL 和切连科夫 FEL 都建成了初步的实验装置并出了光,理论和实验相结合,对物理和技术问题作

了一定深度的分析。此外,我们还开展了一些自由电子激光单元技术的研究,特别是提高电子束品质的技术,取得了进展。我们将继续改进 FEL 的研究工作,并逐步使 FEL 走向实用化,使之在推动我国科学技术发展中作出应有的贡献。

- [1] Du Xiangwan et al., Nucl. Instrum. and Meth., A 272(1988), 29.
- [2] Liu Shenggang, Proceeding of 17th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, (1992).
- [3] Hui Zhong Xi et al., Proceeding of First Asian Symposium on FEL, (1993), to be Published.
- [4] Hu Kesong, *ibid.*
- [5] Xie Jialin, *ibid.*
- [6] Liang Zheng et al., 2nd Int. Conf. MM and FIT, Aug. 17-21, 1992.
- [7] Qingyuan Wang et al., *Appl. Phys. Lett.*, 59 (1991), 2378.
- [8] Zhai Xinglin, Proceeding of First Asian Symposium, to be Published.
- [9] Zhao Kui, *ibid.*
- [10] Yu Min, *High Power Laser and Particle Beam*, 3-2 (1991), 127.
- [11] Liu Shenggang, *Int. J. Electronics*, 72-1(1992), 161.

固体薄膜中的分形生长¹⁾

柳百新

(清华大学材料科学与工程系,北京 100084)

简要报道了作者近年来用离子束方法研究固体薄膜中分形生长现象的部分结果。例如,首次用离子束辐照使非晶态向晶态转变,在临界点观察到析出的 Ni-Mo 晶体的多核心凝聚;离子束界面混合形成的类似于晶格动物的不连续分叉树形结构;磁相互作用对分形凝聚过程及其分形维数的影响;离子注入下与化合物形成相关的类 DLA 结构等。

关键词 分形生长,固体薄膜,离子辐照

Abstract

Ion beam methods have been used to study fractal growth phenomena in thin solid films. We report the first observation of multi-nucleation aggregation of the

1) 国家自然科学基金资助项目。

crystalline Ni-Mo phase precipitated from the amorphous matrix at the amorphous-to-crystalline phase transition critical point induced by ion irradiation, discontinuously branching tree morphology similar to the so called Lattice Animal formed by interfacial mixing, the important effects of magnetic interaction on the fractal aggregation process as well as the fractal dimension, DLA-like structures formed by ion implantation in association with the compound formation, and so forth.

Key words fractal growth, solid films, ion irradiation

70年代末, B. B. Mandelbrot从研究数学中的病态几何出发,提出了分形概念,并用来描写自然生长形态^[1]. 自然生长形态和无序结构中常常存在自相似性或标度不变性,可以用一个分数维数 D_f 来表征. 分形概念很快就被引入到许多研究领域中去,并逐渐形成了分形研究的高潮. 例如1985年向 *Phys. Rev. Lett.* 投稿的三分之一的文章都是讨论分形的,但绝大多数是理论和计算机模拟研究的结果,能够作为发展理论的基础的实验研究结果却很少^[2]. 近年来的研究表明,尽管 D_f 对标度关系给出了一个定量的数值,但它除了表征出该结构的自相似性之外,不能揭示该结构的生长动力学的特征,因此需要用多个标度分形谱来描写^[3,4]. F. Argoul等^[4]还提出用子波变换这种数学显微镜来描写分形的局域标度特性,等等. 目前,分形物理的研究还在发展之中,提供系统的实验结果是很重要的一个方面. 本项目自1986年以来,着重于实验研究,并跟踪国际上理论的发展,对观察到的分形生长进行理论分析和计算机模拟,在以下六方面取得重要的,具有创造性的成果.

1. 1985年曾有关于非晶态薄膜在加热晶化时观察到分形生长的报道^[5]. 作者在过去研究离子束混合形成非晶态合金的基础上,提出用离子束进一步辐照,引发非晶态晶化,在接近相变临界点时研究分形凝聚的想法. 首次在Ni-Mo非晶态薄膜中,观察到析出的晶体相(hcp结构)组织成具有标度不变性的分形结构, $D_f = 1.72 \pm 0.02$ ^[6]. 在电镜下,对分形体和基体作了成分和结构分析,发现分形体是通过多核心凝聚过程而形成的. 在相变时,许多晶

体相同时析出,尺寸大的很难扩散而静止不动,尺寸小的作有限的扩散而连接其他晶体相组织成分形. 电镜分析还给出确实发生了扩散的实验证据. 由NiMo分子为凝聚核心的分形生长与CDLA(cluster-diffusion-limited-aggregation)模型描写的过程相似^[7],而与单核心生长的DLA(diffusion-limited-aggregation)模型^[8]有所不同. 类似的分形生长还在Ni-Zr^[9], Co-Yb^[10]等系统中观察到,分析结果表明,这些分形体都保持多标度分形的性质^[11,12]. 电镜下原位退火首次从实验上论证了分形结构的亚稳性, Yb-粒子分形(无磁性)随退火时间延长, D_f 减小,最终演变为均匀分布的非分形平衡形貌^[13]; 而Fe粒子分形(有磁性),由于粒子聚集, D_f 增大,最终形成一个大粒子(不再是分形)^[14]. 这些都与计算机模拟研究结果相符合^[15].

2. 实验中发现固体薄膜上磁性粒子的凝聚虽然亦是多核心凝聚过程,但 D_f 明显地小于1.72^[16,17]. 因此在实验条件相同的情况下,实现了纯金属Fe, Co, Cr和Ni粒子的分形凝聚,经测定,首次观察到 D_f 与粒子的玻尔磁子 μ_B 间的线性关系: $D_f = -0.041\mu_B + 1.72$ ^[18]. 这个结果说明粒子之间的相互作用对凝聚过程的重要影响. 当 $\mu_B = 0$, $D_f = 1.72$, 正好是CDLA的值,也与上述NiMo分子组成分形的 D_f 相同,经计算NiMo分子的净磁矩为零.

3. 用离子束界面混合方法在AgCo晶态薄膜中形成一种类似于晶格动物(lattice animal)的新分形结构. 它们是由反冲粒子Na和Cl首先合成NaCl单晶,再由这些单晶排列成不连续的分叉树形结构^[19],并从辐照理论和晶体

生长理论推导出 D_f 与剂量 Φ 之间的关系:

$$D_f \propto \ln [1 - \exp(-A\Phi^{1/2})],$$

A 为常数, 这个关系与几个剂量下获得的分形的 D_f 符合得很好^[20].

4. 用碳离子直接注入到 Ni^[21] 和 Co^[22] 金属薄膜中, 形成了类-DLA 分形结构. 注入的碳离子不仅触发原子碰撞而导致“扩散”, 而且它还与金属形成碳化物作为凝聚粒子参与凝聚过程. 尽管分形的形貌与 DLA 结构相似, 但其形成机制是不同的. 从物理上讲, 注入粒子可以在任何位置上“着陆”, 注入过程中粒子仅能移动很小的步子等. 考虑了这些物理上的差别, 用计算机模拟方法获得了与实验观察相符的结果^[22].

5. 首次用超高压电镜的 1MeV 电子辐照 fcc 结构的固体, 产生了大量原子层厚的弗兰克尔层错, 这些原子片组成了分形结构, 与 DLA 结构相似. 分析了电子光学成象带来的畸变, 并对照子波变换计算的结果, 确认了这种分形是 DLA 型的^[23]. 这个研究结果首次提供了实验论证, 说明子波变换作为数学显微镜对分形进行分析的适用性.

6. 众所周知, 位错是晶体中的一种线缺陷, 它决定了晶体的力学性能, 并对晶体的其他许多物理性能有重要的影响. 在非晶态固体中, 是否也存在这样一种对应物呢? 70 年代, 英国学者 N. Rivier 用规范场理论对连续弹性介质的近似处理预言了非晶态固体中不可能存在位错(自由能太高), 而有可能存在一种 2π 旋错, 但 10 多年来, 没有任何实验上的证据. 作者的研究组利用离子束辐照的两方面作用, 即一方面通过混合形成非晶态, 另一方面利用辐照产生缺陷, 从实验上寻找非晶态固体中出现的旋错环. 最近, 在 Ni-Mo 非晶态基体中观察到了这种线缺陷, 这种线缺陷是自避免的封闭环, 也具有自相似性, $D_f = 1.20 \pm 0.02$. 依据 Rivier 的处理方法, 很好地解释了这种缺陷的产生, 以及环与环之间的交互作用^[24].

从以上的介绍可以看出, 离子束方法引入

到分形生长的研究之中后, 揭示了许多新的现象. 例如, 离子束剂量可以精确调节, 因此可以迫近到相变临界点来研究分形凝聚现象. 又例如, 离子束混合和离子注入在薄膜中诱导的分形生长, 参与的凝聚粒子数在 10^{11} — 10^{12} 量级, 这比目前计算机模拟所能做到的粒子数至少大 10^6 倍, 而且薄膜是一种有利于二维分形生长的环境, 因此能提供丰富多彩的分形生长实验结果, 以推动分形理论的发展. 随着工作的深入, 离子束方法将会更多地应用于凝聚态物理学的一些重要课题的研究中去.

- [1] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, New York, (1983).
- [2] L. P. Kadanoff, *Phys. Today*, **39**(1986), 6.
- [3] Y. C. Halsey, M. H. Jensen and L. P. Kadanoff, I. Procaccia and B. I. Shraiman, *Phys. Rev. A*, **33**(1986), 1141.
- [4] F. Argoul, A. Arneodo, J. Elezgerly and G. Grasseau, *Phys. Lett. A*, **135** (1989), 327.
- [5] W.T. Elan et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54** (1985), 701.
- [6] B. X. Liu et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 745.
- [7] R. F. Voss, *J. Stat. Phys.*, **36**(1984), 861.
- [8] T. A. Witten and L. M. Sander, *Phys. Rev. Lett.*, **47**(1981), 1400; and *Phys. Rev. B*, **27**(1983), 5686.
- [9] L. J. Huang, J. R. Ding, H-D. Li and B. X. Liu, *J. Appl. Phys.*, **63**(1988), 2879.
- [10] B. X. Liu, J. R. Ding and H. B. Zhang, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **126**(1991), K93.
- [11] J. R. Ding and B. X. Liu *J. Physics A: Gen Math.*, **22**(1989), L265.
- [12] J. R. Ding, F. Wang and B. X. Liu, *Modern Phys. Lett. B*, **4**(1990), 1111.
- [13] B. X. Liu and J. R. Ding, *Sol. Stat. Commun.*, **80**(1991), 447.
- [14] B. X. Liu, F. Pan and K. Tao, *Phys. Stat. Sol. (a)*, (in press).
- [15] E. S. Sorensen, H. C. Fogedby and O. G. Mouriten, *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 2770.
- [16] L. J. Huang, B. X. Liu, J. R. Ding and H-D. Li, *Phys. Rev. B*, **40**(1989), 585.
- [17] J. R. Ding and B. X. Liu, *Phys. Rev. B*, **40** (1989), 5834.
- [18] B. X. Liu and J. R. Ding, *Phys. Rev. B*, **40** (1989), 7432.
- [19] C. H. Shang, H-D. Li and B. X. Liu, *Phys. Rev. B*, **40**(1989), 2933.
- [20] C. H. Shang and B. X. Liu, *J. Physics: Condensed Matter*, **1**(1989), 10187.
- [21] B. X. Liu, J. Wang and Z. Z. Fang, *J. Physics: Condensed Matter*, **3**(1991), 1941.

[22] B. X. Liu, J. Wang and Z. Z. Fang, *J. Physics: Condensed Matter*, **3**(1991), 9551.
[23] C. H. Shang, B. X. Liu, J. G. Sun and H-D.

Li, *Phys. Rev. B*, **44**(1991), 5035.
[24] B. X. Liu, C. H. Shang and H-D. Li, *J. Physics: Condensed Matter*, **3**(1991), 5769.

从“布基球”到“布基管”和“布基洋葱”

谢希德 叶 令

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

在回顾 C_{60} 等布基球基本概貌的基础上,介绍了这方面的一些最新进展,讲述了布基管的概念及其和布基球的关系.叙述了布基管的一些有趣的物理性质,它可以是良导体,也可以成为近零能隙或有中等大小能隙的半导体.这些物理性质和它的结构有密切的关系.最后介绍了以 C_{60} 等布基球为核心的多层类石墨结构的球——布基洋葱.

关键词 布基球,富氏烯,电子特性,布基管,布基洋葱

Abstract

With reference to C_{60} and other fullerenes some new forms of graphitic carbon nanostructures recently discovered are presented. The formation of graphene tubules and various properties exhibited in the electronic conduction of these tubes are described. The discovery of Bucky-Onions is also briefly mentioned.

Key words Bucky-Ball, Fullerene, electronic properties, Bucky-Tube and Bucky-Onion

一、“布基球”及其新进展

在1992年的《物理》上,已从不同角度对 C_{60} 作过几次介绍(见第21卷第3,4,6期),本文在讲布基管和布基洋葱之前,对 C_{60} 只作一点简单的回顾,并介绍这方面的一些最新进展.

近几年来,世界上有许多科学工作者都被这种不寻常的中空碳原子的排列结构及其呈现的各种独特性质所吸引,并在从事这方面的研究工作.纯碳原子除了可以构成 sp^3 杂化的金刚石晶体结构和层状 sp^2 杂化的石墨晶体结构外,又出现了一种介于 sp^2 和 sp^3 杂化之间的新的形态,通常称为富氏烯(Fullerene),包括一系列笼状分子,其中最引人注目的便是 C_{60} 了.这种分子的形状如足球,60个碳原子对称地分布在一个截角正二十面体的顶角处[图1

(a)],又称布基球(Bucky-Ball)(分子对称性属 I_h 群).这种分子很稳定,十分坚实,以每小时两万哩的速度向金属靶撞击时它不碎裂.其实在碳弧放电的烟灰中早就发现有这种分子.1985年,人们用气相法生长 C_{60} ^[1].到1990年,人们已经可以制备出一定量的纯净的 C_{60} 材料^[2],并做成晶体,从而使这方面的研究有了很快的发展.如果把一个 C_{60} 分子看做一个格点,那么在形成晶体时,这些格点是按面心立方结构堆砌的.纯净的 C_{60} 晶体不导电,如果掺入一定量的碱金属(如钾、铷等)后,形成 K_3C_{60} 或 Rb_3C_{60} ,它就变成了导体.这时碱金属原子正好填充到了原面心立方晶格的各个正八面体空隙和正四面体空隙之中.如果掺入量增大,到 K_6C_{60} 时,它的晶格结构又发生了相变,变成不导电的材料. K_3C_{60} 在低温下呈现超导性($T_c \sim 18K$), Rb_3C_{60} 的 $T_c \sim 28K$. 如与原常规超导