

# 从鲁斯卡获诺贝尔物理奖看电子显微镜学的发展

郭可信

(中国物理学会电子显微镜学分会)

1986年的诺贝尔物理奖授给西德的鲁斯卡教授,表彰他在二十年代末与三十年代初在电子光学的基础研究和设计电子显微镜方面做出的杰出贡献。这是继英国物理学家克鲁格因为发展了晶体电子显微学,观察到病毒、染色质等生物大分子结构而获得1982年诺贝尔化学奖后,国际自然科学界对电子显微学的重要意义的又一次肯定。

自从哲学家在两千多年前提出原子的概念后,直接观察原子一直是人们的美好愿望。十七世纪光学显微镜问世大大开阔了人类的眼界,在生物医学,矿物地质,冶金材料等方面都起了重要的推动作用。但是,根据阿贝成像原理,光学显微镜的最高分辨率也仅能达到可见光的波长的一半左右(约 $0.2\ \mu\text{m}$ )。1925年德布罗意提出微观粒子具有波动性的概念后,由于电子的波长(在100 kV时为 $0.0037\ \text{nm}$ )远远小于原子直径( $0.2\text{--}0.3\ \text{nm}$ ),许多科学家就把直接观察原子的期望寄托在电子显微镜上。在这种前提下,用电磁透镜将电子聚焦制成电子显微镜很快就在三十年代初实现了。尽管它的分辨率在当时比光学显微镜好不了多少,但是这一新生事物却有很强的生命力,为几十年后用电子显微镜、场离子显微镜(1951年西德缪拉发明)及扫描隧道显微镜(1979—1981年期间瑞士IBM的宾尼与劳尔发明,与鲁斯卡同获诺贝尔物理学奖)直接观察原子开辟了途径。这些发展都是一脉相承的。此外,还有扫描电子显微镜、扫描透射电子显微镜、表面电子显微镜、全息电子显微镜等。

由于电子与物质的相互作用所产生的多种信息,带动了一系列衍射和成分分析仪器的展。物质对电子的弹性散射会产生衍射,由此

可以得出有关晶体结构的数据。电子束穿过薄晶体产生衍射束并聚焦在物镜后焦面上,再经放大透镜展谱。由此可见,电子显微镜本身就具有电子衍射仪的功能。它的特点是可以研究很小( $\mu\text{m}$ )甚至极小( $\text{nm}$ )晶体的衍射,同时可以与放大几万甚至几百万倍的象也就是晶体的微观结构进行对照分析。下面将提到的具有五次对称特征的准晶体就是利用这一特点而发现的。将电子束聚焦到晶体上还可以得出它的会聚束电子衍射图,一则可以研究单个位错,层错的衍射效应,二则可以给出晶体的三维结构信息,特别是点群及空间群特征。

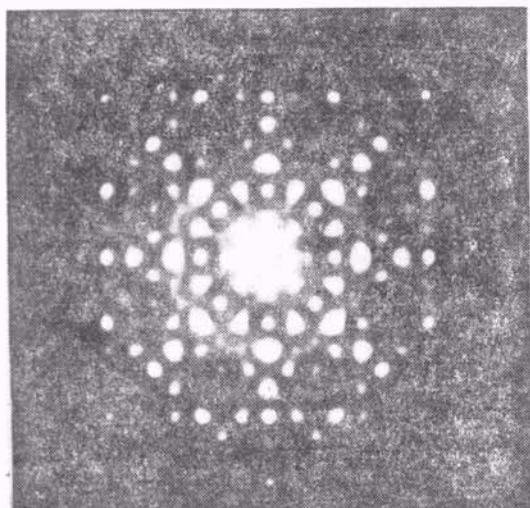
电子在非弹性散射过程所损失的能量具有特征值,与物质中的元素有关,同时产生的特征X射线及俄歇电子也有特征能量。利用这些信息可以制造电子能量损失谱仪(EELS),X射线能谱仪(EDS),俄歇电子谱仪(AES)等。配在电子显微镜中,为它增添了显微(微米甚至纳米)成分分析的可能性。

由此可见,电子显微镜发展到今天已成为研究物质微观世界(原子级)的全能仪器,下面举例说明它在固体物理与生物物理中的重要作用。

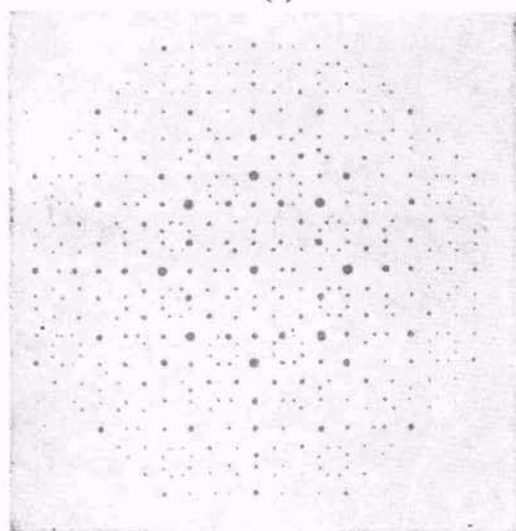
## 1. 晶体缺陷

在客观世界中完整的晶体是不存在的,其中有各式各样的点、线、面缺陷,严重影响晶体的物理、化学、力学性能。因此,近半个世纪以来晶体缺陷一直受人注目,尤其是位错与层错,它们的几何模型在五十年代初已臻成熟,但一直缺乏确凿的实验证据。1956年英国的赫什等人发展了金属薄膜衍衬技术,在电镜中首次观察到位错及其运动,引起固体物理界的广泛重视。六十年代是晶体缺陷研究高潮的时期,

除金属之外,半导体、无机化合物、矿物以及有机分子都成了研究对象,这些研究不但证实了过去的一些假说,还充实和丰富了位错理论.到了七十年代末,电镜已发展到可以分辨原子的水平,这又为直接观察各种晶体缺陷的原子结构提供了条件,这方面的研究工作正方兴未艾.



(a)



(b)

图 1

## 2. 准晶态

晶体学家在十九世纪中叶就已经总结出 32 种晶类和 14 种空间点阵,认为这是晶体必须具备的点对称和平移对称.由于点阵平移对称的约束,五次与高于六次的旋转对称都是不允许的.一百多年来的研究无一与此相违,因此

物理

已被公认为是天经地义的真理,每一本晶体学或固体物理教科书开宗明义就要说明这一点.1984 年美国国家标准局的一个研究小组和我们用电镜观察不同合金时几乎同时发现五次对称,他们还进一步确定了“非晶体学”的二十面体  $m\bar{3}5$  点群对称.接着又有人发现了十次与十二次对称.最近,我的硕士研究生王宁又在铬镍硅急冷合金中发现了八次准晶,图 1(a) 是它的八次对称电子衍射图;图 1(b) 是示意图,八次对称特征非常明显,如果这些都属实的话,布拉喇点阵就不再是晶体的必要条件了.这是与旧传统决裂的一件大事,当然会引起卫道者的非难,如著名的晶体学家鲍林就认为这是胡说八道.为什么准晶在东方和西方都是由电镜工作者发现的呢?原因很简单,在过去研究的急冷合金中准晶的尺寸是亚微米级的,只有用电镜才能得出它的微衍射和高分辨象.近一年来人们已经在缓冷的铝铜锂合金中制备出厘米级的准晶,正在用 X 射线和中子衍射确定准晶中原子的分布.

## 3. 表面结构

表面状态对固体的性质有重要的影响,特别是低维物质.过去研究表面结构主要是用低能电子衍射和离子散射,现在则可以用反射电镜观察一两层原子的台阶,用透射电镜观察表面处原子的沉积与溅射,小面化以及表面重构.扫描隧道显微镜可以观察更细微的表面起伏,并由此得出表面上原子的分布.硅表面的  $7 \times 7$  重构第一次用肉眼可见,这不能不说是显微学发展的一个里程碑.表面结构的观察可以说仍处于启蒙阶段,更重要的发现将会在今后接踵而至.

## 4. 生物大分子结构

用电镜观察生物分子的主要困难均与它是由碳、氢、氧、氮等轻原素组成有关,一则衬度低,二则容易在电子照射下产生辐照损伤.过去都用重金属离子染色,分辨率不高.克鲁格发展了图象处理及三维重构方法,得出一系列病毒及蛋白质的超微结构象.他的同事们用这一方法得到紫膜的分辨率为  $0.7 \text{ nm}$  的象,近来又

进一步提高到 0.4 nm。另一方面, DNA 是由双链扭在一起的,也在电子显微镜中清晰可见。这些结果无疑对研究生物大分子的结构并进一步进行人工合成和转化有很大裨益。电子显微镜在分子生物学和遗传工程中的重要作用将日益明显。

上述几个例子仅是电子显微镜在物理学中众多应用的一些侧面,由此可以看出它在研究物质特别是各种无序状态的原子级结构中的突出作用。X 射线衍射测定的结构是亿万万个单胞的平均结果,不能显示局部的无序,而电镜可以给出它们的微衍射和原子象。随着电子显微镜分辨率的进一步提高,特别是全息电子显微镜的发展,新的无序及生物大分子结构将逐一揭露出来。

电子显微镜不仅是物质微观结构的基础研究所必不可少的仪器,也是生产实践中的一种

重要检验工具。例如催化剂颗粒度(10 nm 或更小些)及形状的检验,大规模集成电路及半导体薄膜器件生产中产生废品原因的分析,病毒及癌细胞的鉴定,诊断与免疫电子显微学等等。一般说来,用于生物医学的电子显微镜数目是大于非生物方面的,由此可以看出电子显微镜应用的广度。

在过去六、七年里,中国的电子显微学研究工作也在多方面取得了可喜的进展,在有些分支学科方面还居于世界前列,如晶体缺陷的会聚束电子衍射分析,准晶结构的研究,晶体的原子象与衍射的结合分析等。更为可喜的是,有一批二、三十岁的优秀青年科学家已在国内外的一些著名的电子显微镜实验室内崭露头角,十年后他们将为我国电子显微学全面赶超世界先进水平作出卓越的贡献。

---

(上接第540页)

许多国内外同行的赞扬和好评。

院内五个单位合作研制和发放的我国万立方米级高空科学气球已通过国家级鉴定,并获得国家科学技术进步奖二等奖,为许多学科的科学观测和工程实验提供多次成功的飞行。目前 20 万立方米的气球已研制和发放成功。这个工程的成功也是各学科、各单位各自发挥自己的优势共同努力的结果。

甘巴拉山乳胶室于 1980 年和日本七所大学在平等互利的基础上开展了合作。他们提供了高灵敏度的 X 光片、核乳胶、先进的自动黑度测量仪等,这对我们高山乳胶室工作达到国际先进水平有相当作用。另外,国外每年人员的多次来访也带来国际上学术的最新信息。正在

进行的中、英高能天体物理的合作研究,在双方已有的技术基础上将研制具有高水平的硬 X 射线望远镜系统,利用我国气球系统进行联合观测,英国也派遣研究生参加了中国科学院高能物理研究所气球观测项目。在上述两个项目中,双方提供了一定经费供双方人员来往,进行学术交流。另外,中国科学院高能物理研究所和美国 MIT 大学合作参加在意大利地下宇宙线观测的多国合作项目。西藏高山超高能宇宙线现象观测站国际合作的设想,将是较高水平的合作。走向开放的国际合作,应是多层的。有可能把国际合作的基地建设在国内,它是一个国际先进水平的中心实验基地,这对于我国基础研究的发展是很重要的。