

反射高能电子衍射及其应用

李宗全

(中国科学院固体物理研究所)

本文介绍了反射高能电子衍射原理、应用及近年来取得的成果。反射高能电子衍射对固体表面非常敏感,在研究表面结构、表面相变及有关问题上,显示了其优于低能电子衍射的特点。

早在研究电子衍射的初期,人们就对反射高能电子衍射进行过实验^[1,2],但由于当时实验技术、仪器性能的限制,未能得到满意的反射高能电子衍射图,加之透射电子衍射等技术的发展,反射高能电子衍射曾一度被放弃了。到了60年代,随着超高真空技术的发展,反射高能电子衍射再度被用来研究表面结构,70年代初就得到了与表面结构有关的反射高能电子衍射图^[3,4]。目前,反射高能电子衍射已可揭示晶体表面第一、二个原子层的表面结构,并在研究吸附、晶体生长、表面缺陷等方面取得了很大进展,显示了反射高能电子衍射相对于低能电子衍射的优越性,从而成了当今相当活跃的一个领域。

一、原理

当能量为20—200keV的电子束以很小的角度掠射过晶体表面时,电子束只能进入表面层1—2nm,反射电子束却携带了有关晶体表面结构的信息。表面二维结构所引起的倒易杆拉得很长,倒易杆与Ewald球相截,在荧光屏上便得到反射电子衍射图,其示意图如图1所示。与透射电子衍射图或低能电子衍射图不同的是,反射高能电子衍射图不是倒易空间的一个二维截面,它由位于同心圆弧上的斑点组成,同一劳厄带上的斑点位于同一圆弧上。图2为20kV下Si(111)表面的反射高能电子衍射图及其标定^[5],显示了Si(111)7×7超结构。反射高能电子衍射图可以用计算的方法将其转换成倒

物理

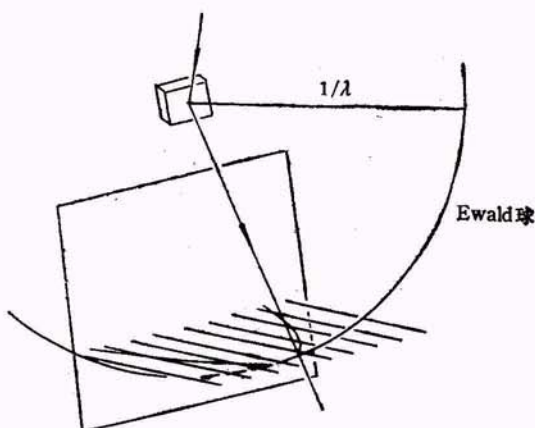


图1 反射高能电子衍射的 Ewald 球构造
(由于试样阴影的遮挡,只能观察到电子衍射图的一半)

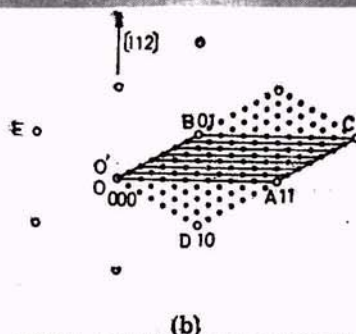
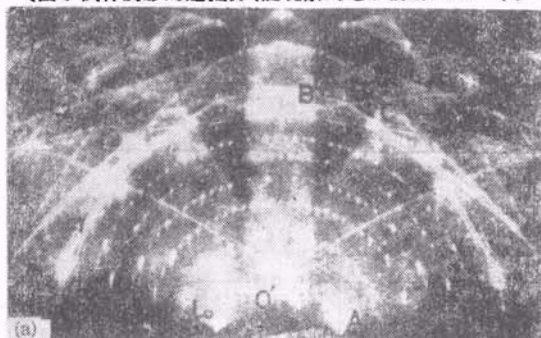


图2 Si(111) 7×7 超结构的反射高能电子衍射图
(a)及与此相应的倒易截面(b)电子束入射方向为
[112]; (b)中所标字母与(a)相对应

易空间的一个截面,也可改用球面荧光屏,直接记录类似低能电子衍射那样的电子衍射图^[3]。

二、与低能电子衍射的对比

反射高能电子衍射在研究晶体表面结构方面不仅取得了可以与低能电子衍射相媲美的结果,而且显示了优于低能电子衍射的若干优点。低能电子衍射中, Ewald 球半径较小,部分衍射斑点不与 Ewald 球相交,因而观察不到;而反射高能电子衍射中可以得到上百个衍射斑点,而且衍射斑点非常明锐,可以进行精确的几何位置的测量,从而可得到更多有关结构的信息。低能电子衍射中要测定倒易杆强度的变化,只能以改变加速电压从而改变 Ewald 球半径来实现。但是,改变加速电压又引起强烈的动力学效应,给强度分析带来困难。反射高能电子衍射中,动力学效应较小,除了阴影附近的衍射斑点的动力学效应较强外,其他斑点可以用运动学来加以处理,而且衍射强度沿倒易杆的分布可以用摆动或旋转晶体法直接测得^[5,6],改变掠射角的大小,可以改变电子束的穿透深度,从而

使反射高能电子衍射可用来测定结构随深度的变化。例如受污染的 Si 在 20kV 下,当掠射角为 47' 时,表面 SiC 污染层的反射强,而基体 Si 的反射很弱;掠射角增加至 3°8' 时, SiC 的反射弱于 Si;掠射角为 4° 时, Si 的反射很强,而 SiC 的反射则可以忽略。表 1 列出了反射高能电子衍射与低能电子衍射的对比。

三、应用

1. 表面结构的研究

反射高能电子衍射是研究表面结构的有效方法之一。改变电子束的掠射角、方位角、试样温度等条件,可以准确地测定晶体的表面结构及其转变。例如 Si(111) 表面,不洁净时为 (1 × 1) 结构;加热到 900—1000℃ 时,表面上观察到 SiC 层;高于 1200℃ 时,表面转变成 (7 × 7) 结构。而洁净的 Si(111) 表面却在 830℃ 发生相变,低于 830℃ 时为 (7 × 7) 结构;高于 830℃ 时为 (1 × 1) 结构^[5,6]。用 (7 × 7) 反射束成像,可直接观察 (1 × 1) 与 (7 × 7) 之间的相变^[9], (7 × 7) 区为亮区, (1 × 1) 区为暗区,并直观地表明了台阶与相变的关系。这种直接观察,表明了这种表面相变是一级相变,解决了有关相变类型的争论。

2. 吸附引起的超结构及其相变

洁净的基体表面原位蒸发上不同金属,将引起表面结构的转变。金属层的成分、厚度、温度等对表面超结构及其相变都产生很大影响。反射高能电子衍射已广泛地用来研究半导体材料表面的吸附及有关现象^[10],如 Si(111)-Au, Ag, Cs, In, K, Li, Na, Ni, Rb, Sn; Si(110)-Ag, Au, Ge, Ni, Sn; Ge(111)-In, Sn 等,得到了大量类似于合金相图的表面结构状态图,测定了表面的超结构,如 Ge(111)-In 的表面超结构有^[11]: $n \times 2\sqrt{3}$ ($n = 10, 11, 12, 13$), $m\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ($m = 4.0, 4.2, 4.3, 4.43$), $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$, $\sqrt{61} \times \sqrt{61}$, 4.3×4.3 , 1×1 等超结构。

3. 晶体生长

反射高能电子衍射对表面上的原子台阶非

表 1 反射高能电子衍射与低能电子衍射的对比^[13]

	反射高能电子衍射	低能电子衍射
1. 表面研究的灵敏度		
表面结构	与低能电子衍射相似	与反射高能电子衍射相似
亚表层结构	可观察	困难
2. 电子衍射图的特点	平行于倒易杆截面 几何测量精度高 亮、明锐	垂直于倒易杆截面 几何测量困难 暗、弥散
3. 沿倒易杆强度分布	摆动或旋转晶体法	改变电压
4. 沿深度方向的信息	改变掠射角	—
5. 研究范围		
动态观察	容易	困难
外延生长粒子	容易, 斑点衍射图	困难
表面随机分布粒子	容易, 环状衍射图	不能
表面非晶层	容易, 晕环	不能
表面形貌观察	反射高能电子显微术	低能电子反射显微术 ^[13]

常敏感, 台阶支配了衍射束的特征形状及晶体处延生长中衍射强度的变化, 从而可用来测量表面上台阶的分布^[12]。Si(001), GaAs(001) 等外延生长中, 反射高能电子衍射强度发生振荡, 强度是外延生长时间的函数, 每一周期相当于逐层生长中形成一单一原子层的时间。这样, 反射高能电子衍射的强度振荡可以用在分子束外延生长中表面组分的控制及厚度测量^[13]。

当晶体三维结晶生长或从二维过渡到三维生长时, 表面上形成小岛, 透射电子衍射图叠加在反射电子衍射图上, 可用来测定小岛相对于衬底的取向、择优生长方向。衍射斑点宽度的变化可用来测定小岛的**平均高度、宽度^[14]。GaAs(110)-In 表面小岛的形状和取向的观察, 证实了反射高能电子衍射分析结果。

4. 无序表面结构

无序表面结构, 如镶嵌结构、反相边界等使倒易杆变宽, 与 Ewald 球相截部分增加而形成衍射条纹。因此, 从衍射斑点的变化可以研究表面的无序结构。例如, GaAs(001)-2 × 4 表面外延生长中存在强度调制的衍射条纹及劳厄圆上的一些斑点消失, 就是由表面层无序引起的^[15]。劳厄圆外条纹强度的增加, 是由于布拉格散射受到表面无序结构产生的前漫散射所至。

反射高能电子衍射在研究表面结构方面所取得的成果及其潜力, 已越来越受到人们的重视。除了上面提到的几个方面外, 反射高能

电子衍射在强度理论^[16]、微束反射高能电子衍射^[17]、表面波共振现象、通道效应^[18,19]及表面会聚束衍射^[20]等方面也取得了较大的进展。但是, 无论是理论上还是实验上, 反射高能电子衍射还不够成熟, 有待进一步完善。随着实验技术、理论研究的发展, 反射高能电子衍射将会取得更大的成果, 成为研究表面不可缺少的主要工具之一。

- [1] S. Miyake, *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res. Tokyo*, **31** (1937), 161.
- [2] R. Uyeda, *Proc. Phys. Math. Soc. Japan*, **22**(1940), 1023.
- [3] A. Y. Cho, *J. Appl. Phys.*, **42**(1971), 2074.
- [4] J. E. Menadue, *Acta Cryst. A*, **28**(1972), 1.
- [5] S. Ino, *Jpn. Appl. Phys.*, **16**(1977), 891.
- [6] S. Ino et al., *J. Phys. Soc. Japan*, **53**(1984), 1911.
- [7] W. Telieps and E. Bauer, *Ultramicroscopy*, **17**(1985), 57.
- [8] S. Ino, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**(1980), 1277.
- [9] N. Osakabe et al., *Surf. Sci.*, **109**(1981), 353.
- [10] T. Ichikawa, *Surf. Sci.*, **140**(1984), 37.
- [11] T. Ichikawa, *Surf. Sci.*, **111**(1981), 227.
- [12] P. I. Cohen and P. R. Pukite, *Ultramicroscopy*, **26** (1988), 143.
- [13] J. H. Neave et al., *Appl. Phys. A*, **31**(1983), 1.
- [14] D. E. Savage and M. G. Legally, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **4**(1986), 943.
- [15] P. K. Larsen et al., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **5**(1987), 611.
- [16] P. A. Maksym and J. L. Beeby, *Surf. Sci.*, **110**(1981), 423.
- [17] M. Ichikawa et al., *Surf. Sci.*, **159**(1985), 133.
- [18] S. Miyake and K. Hayakawa, *Acta Cryst. A*, **26** (1970), 60.
- [19] A. Ichimiya et al., *J. Phys. Soc. Jap.*, **49**(1980), 684.
- [20] M. D. Shannon et al., *Ultramicroscopy*, **16**(1985), 175.

(上接第 626 页)

化。这在核裂变和重离子物理的研究中都是必不可少的。

胡济民教授的研究工作, 面较广、成果多, 已发表主要论文 40 多篇和多种专著。他的研究工作变动也比较多, 但都是为适应当时国家的需要而进行的, 并且常常是和实验紧密联系的。

1980 年, 胡济民教授当选为中国科学院数学物理学部委员、常务委员。1982 年至 1986 年连任两届中国核物理学会理事长。他在业务领

导岗位上尽心尽力, 重视发扬学术民主和发现、扶植新生力量, 赢得国内外同行们的爱戴和敬重。他在担任国务院学位委员会学科评议组和国家自然科学基金委员会评审组的工作中, 办事公正, 坚持标准, 深受各界的赞誉和信赖。他在推动我国原子能科学技术及核物理学科的发展方面作出了重大贡献。

1989 年, 胡济民教授已年至七旬。但他至今仍给学生讲课, 作科学研究, 在计算机上演算, 指导研究生和中青年教师, 还在勤勤恳恳地为我国原子能事业耕耘, 乐此不疲, 奉献不已。