

镍单晶膜上氧化镍的配位生长取向关系*

徐 濮 陈乾惕 郭可信

提 要

对在膜面为(110), (001)和(111)的镍单晶膜上生成的氧化镍取向进行了电子衍射分析, 除在(111)和(001)镍膜上肯定了前人已发现的氧化镍与镍的平行取向关系外, 还在(110)和(001)镍单晶膜上发现了 $\langle 111 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 001 \rangle_{\text{Ni}}$, $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 取向关系以及 $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 氧化镍纤维组织。

在所有氧化镍与镍的取向关系中均有 $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$, 说明 $\langle 110 \rangle$ 密排方向在配位生长中的重要作用。从单晶膜面上 $\langle 110 \rangle$ 方向的数目以及镍膜的完整程度两方面讨论了氧化镍的不同配位生长趋势。

一、引 言

金属单晶在氧化后, 表面生成的氧化物与基体金属间往往有一定的取向关系, 这种配位生长(epitaxy)的研究一方面可以阐明配位生长的机理, 另一方面还有助于对金属氧化时表面结构变化的了解, 这对于发展抗氧化合金材料是有一定参考价值的。

镍及氧化镍均具有面心立方点阵, 点阵常数分别为 3.52 及 4.19 Å, 错配(misfit)约 19%, 略大于一般认为的配位生长所要求的错配临界值。表 1 中列出了前人在镍与氧化镍的取向关系方面的研究结果。除 Collins 和 Heavens^[1] 使用镍单晶膜外, 其他工作者^[2-4] 都使用不同方式制成的镍单晶球进行氧化研究。单晶球的优点在于可以同时研究不同晶面的氧化行为, 但是由于电子束穿透本领较弱, 因此用电子衍射的反射法仅能得到表面数十埃的结构。使用单晶膜虽然一般只能对几个主要的晶面进行研究, 但由于电子束可以穿透数百至一二千埃的薄膜, 因此可以得到较厚氧化膜的结构。此外, 从薄膜元件在工业技术中应用的前景来看, 对镍膜氧化的研究也是有一定意义的。

从表 1 中可以看出, 在所有发现的取向关系中, 除尚待证实的取向关系(4)外, 都有 $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 的共同特征。铜的氧化^[5]以及面心立方金属在 NaCl 表面淀积^[6]也都具有这种取向特征。

为了进一步了解 $\langle 110 \rangle$ 方向在面心立方晶体的配位生长中的作用, 我们研究了分别具有一个、二个和三个 $\langle 110 \rangle$ 方向的(110), (001)和(111)三种膜面镍单晶膜的氧化行为, 结果亦列入表 1 中, 除肯定了前人已发现的平行取向关系外, 还发现有 $\langle 111 \rangle$ 纤维组织和 $\langle 110 \rangle$ 纤维组织, 也都具有 $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 取向关系, 进一步说明了这个方向在面心立方晶体的配位生长中的重要作用。

* 1964 年 5 月 9 日收到。

表 1 镍单晶氧化后,氧化镍与镍的取向关系*

	平 行 面	平 行 方 向	文 献	注
(1) 平行取向	$(001)_{\text{NiO}}// (001)_{\text{Ni}}$ 或 $(110)_{\text{NiO}}// (110)_{\text{Ni}}$ 或 $(111)_{\text{NiO}}// (111)_{\text{Ni}}$	$[1\bar{1}0]_{\text{NiO}}// [1\bar{1}0]_{\text{Ni}}$ $[1\bar{1}0]_{\text{NiO}}// [1\bar{1}0]_{\text{Ni}}$ $[1\bar{1}0]_{\text{NiO}}// [1\bar{1}0]_{\text{Ni}}$	[1—4]; 本工作 [1—4] [1—4]; 本工作	
(2)	$(111)_{\text{NiO}}// (001)_{\text{Ni}}$	$[1\bar{1}0]_{\text{NiO}}// [1\bar{1}0]_{\text{Ni}}$	[1—4]	
(3)	$(001)_{\text{NiO}}// (110)_{\text{Ni}}$	$[1\bar{1}0]_{\text{NiO}}// [1\bar{1}0]_{\text{Ni}}$	[3,4]	
(4)	$(111)_{\text{NiO}}// (111)_{\text{Ni}}$	$[2\bar{1}\bar{1}]_{\text{NiO}}// [1\bar{1}0]_{\text{Ni}}$	[4]	很 弱
(5) $\langle 111 \rangle$ 织构	$(111)_{\text{NiO}}// (001)_{\text{Ni}}$	$\langle 110 \rangle_{\text{NiO}}// \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$	本 工 作	12种 NiO 取向都有共同的 $\langle 111 \rangle$ 方向,实际上是 $(111) \langle 110 \rangle$ 织构
(6) $\langle 110 \rangle$ 纤维织构	—	$\langle 110 \rangle_{\text{NiO}}// \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$	本 工 作	所有 NiO 都有共同的 $\langle 110 \rangle$ 方向

* 除文献[1]及本工作使用镍单晶膜及透射电子衍射外,其他工作都使用单晶球及反射电子衍射。

二、镍单晶膜的制备

膜面为(001),(110)及(111)的三种镍单晶膜是在真空喷镀仪中利用汽相淀积法制备的,真空度约为 10^{-5} 毫米汞柱。

制备(001)及(110)取向的单晶膜时,以新劈开的 NaCl 单晶为底晶。NaCl 晶体的解理面是 {001} 面族,但是在沿 {110} 面族解理时,也可以得到一些约几个平方毫米面积的 {110} 面。解理后立即将 NaCl 晶体放入真空喷镀仪中,抽空到 10^{-5} 毫米汞柱后加热到 400℃,保温约半小时,以使底晶表面吸附的气体尽可能清除。然后通电加热,使放在螺旋形钨丝加热器上的镍屑蒸发,淀积到底晶表面上。膜的厚度控制在 500 到 1000 Å 之间。真空中冷到室温,将底晶取出置于水中,用镍网将浮于水面的镍膜捞起,即可进行电子衍射检验。使用的是 Finch 型冷阴极电子衍射仪,电子束的加速电压一般为 50 千伏。

Bassett 和 Pashley^[7] 曾在 NaCl 底晶上先淀积一层较厚的银膜,然后再淀积一层金膜,将复膜置于王水中,使银膜溶解后就可以得到单一的金膜。这样制备的金膜在厚度仅为 100—200 Å 时就已经是连续的了,而直接淀积的金膜要到 1000 Å 时才变为连续。此外,用复膜方法所制得的金属膜的完整程度较高,容易得到较好的单晶膜^[8]。为了研究镍单晶膜完整性对氧化镍配位生长取向关系的影响,我们在 NaCl 上先在 350℃ 淀积一层厚约为 2000 Å 的铜膜,然后再在 250℃ 淀积一层镍膜,将 50 克铬酸、50 克浓硫酸和一公升水配成溶液^[9],用此溶液将铜溶掉就可以得到较完整的(001)及(110)镍单晶膜。

试图沿 {111} 解理 NaCl 晶体未获成功,从而改用云母为底晶以制备膜面为(111)的镍单晶膜。首先在新撕开的云母上淀积一层铜膜,然后再淀积一层镍膜。但是由于铜在云母上不易生成单晶,从而未能获得镍单晶膜。先在云母上淀积一层银膜,然后再淀积一层镍膜,固然可以得到单晶复膜,但不能用上述溶液使银溶掉。为了克服上述困难,我们先在 250—450℃ 在云母上淀积一层 2000 Å 厚的银膜,然后再在银上于 300—350℃ 淀积

一层约 $1000 \text{ \AA}$ 厚的铜膜,最后于 $200-250^\circ\text{C}$ 淀积所需厚度的镍。反射电子衍射指出,镍膜是(111)取向的单晶膜。将制好的复膜浮在上述溶液表面,约 20—30 分钟后,铜就可以完全溶解,从而使镍膜脱离。淀积复膜最好在不破坏真空的条件下一次完成,由于避免了大气污染,所需淀积温度较低,同时亦可减少复膜间金属的互扩散。

应当指出,由于撕开的云母表面远较 NaCl 晶体的解理面光滑,所以(111)镍单晶膜的厚度均匀而连续,也比较完整。

三、氧化镍的配位生长

用上述方法制备的镍膜于 $300-500^\circ\text{C}$ 在大气或纯氧中氧化,或在电子衍射仪中一面加热、一面进行氧化,并同时观察其结构变化,所得到的结果基本上是一致的。我们着重研究了氧化镍配位生长的晶体几何关系,对氧化条件与配位生长的关系未作细致研究。表 2 列举所获得的各种取向关系,其中大都是多于五到十次的重复结果。

表 2 本工作所获得的氧化镍与镍的取向关系

镍膜取向	$\langle 110 \rangle$ 方向的数目	底 晶	NiO 与 Ni 的取向关系
(110)	1	NaCl NaCl + Cu	$\langle 110 \rangle$ 纤维织构 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构
(001)	2	NaCl NaCl + Cu	$\langle 110 \rangle$ 纤维织构, $\langle 111 \rangle$ 织构, 平行取向 平行取向, $\langle 111 \rangle$ 织构, $\langle 110 \rangle$ 纤维织构
(111)	3	云母 + Ag + Cu	平行取向

1. (110) 膜

图 1(a) 是(110)镍单晶膜的透射电子衍射花样。除有明显的主反射外,在 $\langle 111 \rangle$ 方向还有一些附加的弱反射,这是由于孪晶引起的^[10]。当膜在电子衍射仪中加热到 600°C 以后,附加的衍射显著减弱,晶体变得较为完整。无论底晶是 NaCl 还是 NaCl 上淀积一层铜膜,(110)镍单晶膜在不同条件下氧化时只发现了一种取向关系。图 1(b) 是镍膜在 600°C



图 1(a) (110)镍单晶膜的电子衍射花样

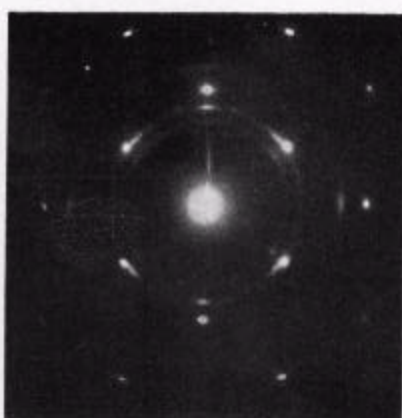


图 1(b) (110)镍单晶膜氧化后的电子衍射花样
氧化镍与镍的取向关系为 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构

加热处理后于 500℃、0.1 大气压下氧化五分钟的电子衍射花样。除有微弱的氧化镍多晶

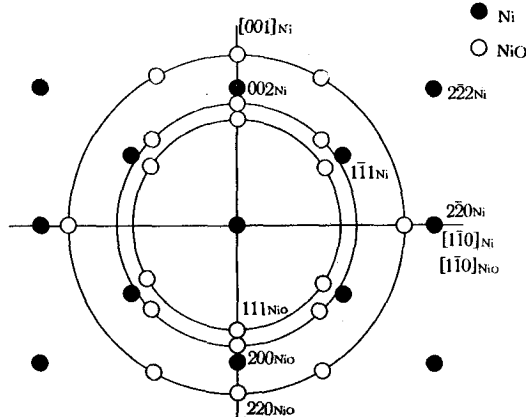


图 1(c) 图 1(b)的分析图, $[1\bar{1}0]_{\text{NiO}} // [1\bar{1}0]_{\text{Ni}}$

环外, 还有氧化镍的衍射斑点座落在环上。经过分析, 发现这些斑点是 $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 纤维织构所引起的, 具体分析见图 1(c)。例如氧化镍的 $\{200\}$ 衍射斑点一方面座落在 $(200)_{\text{NiO}}$ 衍射环上, 另一方面又与 $[1\bar{1}0]_{\text{NiO}}$ 方向交于 45° 与 90° , 此即氧化镍 $\langle 200 \rangle$ 方向与 $\langle 110 \rangle$ 方向的夹角, 亦即 $\{200\}_{\text{NiO}}$ 倒易阵点绕 $[1\bar{1}0]_{\text{NiO}}$ 旋转并与反射球面相截的结果。在 (110) 单晶膜上仅有一个 $\langle 110 \rangle$ 方向作为氧化镍织构的纤维轴, 也就是所有氧化镍晶体都有一个 $\langle 110 \rangle$ 方向与

镍的 $[1\bar{1}0]$ 方向平行, 而绕这个轴的径向分布则无择优取向。

2. (001) 膜

图 2(a) 是 (001) 镍单晶膜的电子衍射花样, 除呈方格形的 $(h\bar{h}0)$ 主反射外, 同样可以看到较弱的 (111) 孪晶反射^[10]。在 (001) 面上有两个 $\langle 110 \rangle$ 方向, 如果氧化镍是以 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构形式出现, 就应有两套纤维织构。但是, 在 (001) 膜面上生成的氧化镍不仅有较复杂的取向关系, 并与镍膜的完整程度有关, 分述如下。

图 2(b) 是在 NaCl 解理面上直接生成的镍膜经氧化后的电子衍射花样, 图 2(c) 是在 NaCl 底晶上淀积一层铜膜, 然后在其上生成的镍膜经氧化后的电子衍射花样。在这两个花样中, 氧化镍的衍射斑点很多, 但都座落在衍射环上, 并出现在相同的位置, 只不过是强度不同而已。这意味着氧化镍与镍的取向关系在两种镍膜中都是相同的, 但不止一种, 出现的程度亦有所不同。在图 2(c) 中仍可以看不座落在 NiO 衍射环上的镍的方格形衍射斑点, 在图 2(b) 中, 由于氧化过度, 残留的镍已不多, 方格形的衍射斑点已很微弱, 但仍能察觉。

经过分析, 发现在两种镍膜中共有三种氧化镍与镍的取向关系, 即表 1 和表 2 所列的 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构, $\langle 111 \rangle$ 织构和平行取向关系, 具体分析见示意图 2(d)。在 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构中, 氧化镍晶体仅共一个 $\langle 110 \rangle$ 方向, 配位生长关系最不严格; 在 $\langle 111 \rangle$ 织构中, 氧化镍晶体除了共一个 (111) 面外, 还共一个 $\langle 110 \rangle$ 方向, 故总共有 12 种可能取向, 配位生长关系较为严格。由于 12 种 NiO 取向都共有一个 $\langle 111 \rangle$ 方向, 故称之为 $\langle 111 \rangle$ 织构。在平行取向关系中, 除了共一个 (001) 面外, 还共一个 $[1\bar{1}0]$ 方向, 只有一种可能, 配位生长关系最为严格。

在 (001) 面上有两个 $\langle 110 \rangle$ 方向, 从而有两套 $\langle 110 \rangle$ 织构迭加在一起, 这在图 2(b) 中特别明显, 例如最内层的 12 个 $\{111\}$ 衍射斑点。图 2(b) 和 2(c) 中呈对称分布的 12 个 $\{220\}$, $\{422\}$, $\{440\}$ 衍射超过了与 $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 纤维织构相应的相对强度, 这是由于氧化镍的 $\langle 111 \rangle$ 织构引起的, 所产生的衍射斑点在图 2(d) 中用“—”表示之。

氧化镍与镍的平行取向关系在图 2(c) 中特别明显。NiO 亦具有面心立方点阵, 在与

镍有平行的取向时亦给出方格形衍射斑点,但由于点阵常数较镍为大,故方格较小,在图 2(d)中以“|”记之。在图 2(b)中不能确定是否有氧化镍与镍的平行取向关系,但在其他直接淀积得到的镍膜中却能肯定这种取向关系的存在。

从上述结果可以看出,(001)镍单晶膜的完整程度对表面生成的氧化镍的取向关系有一定程度的影响;在完整程度较高的膜上易于生成具有平行取向的氧化镍,而在完整程度较低的膜上易于生成具有 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构的氧化镍。换言之,镍膜越完整,氧化镍的配位



图 2(a) (001)镍单晶膜的电子衍射花样

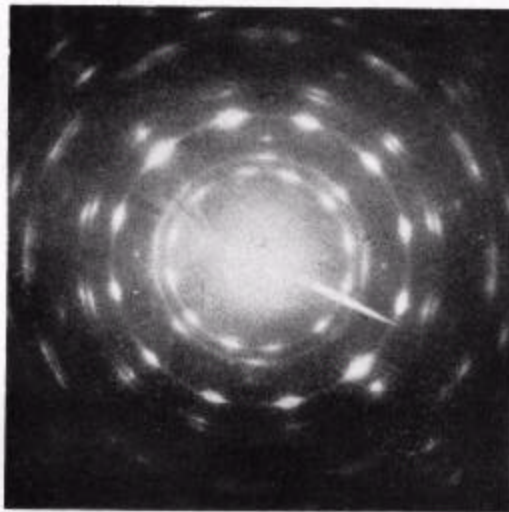


图 2(b) 底晶为 NaCl 的镍单晶膜氧化后的电子衍射花样
氧化镍与镍的取向关系为 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构, $\langle 111 \rangle$ 织构及平行取向

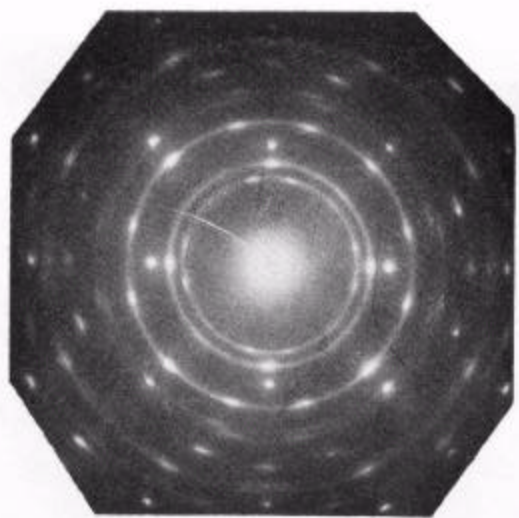


图 2(c) 底晶为 NaCl + Cu 的镍单晶膜氧化后的
电子衍射花样
氧化镍与镍的取向关系为平行取向、 $\langle 111 \rangle$ 织构及 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构

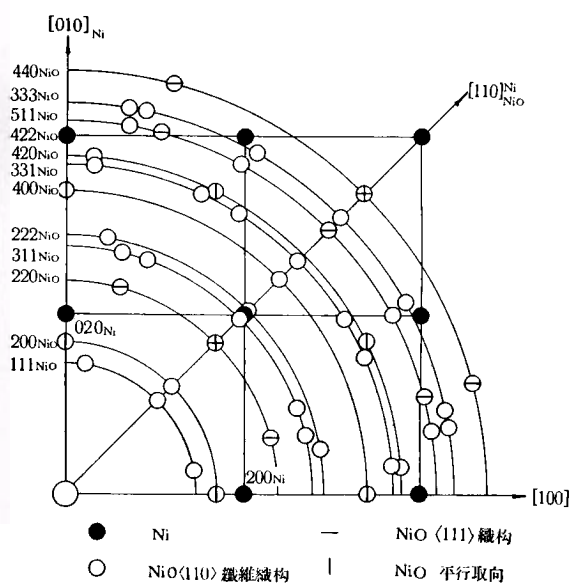


图 2(d) 图 2(b)和图 2(c)的分析图

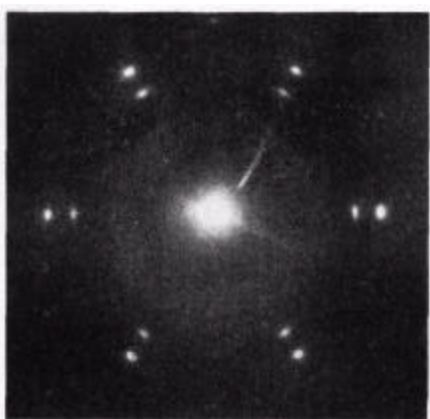


图3 (111)镍单晶膜氧化后的电子衍射花样
氧化镍与镍的取向关系为平行取向

生长关系越严格.

3. (111) 膜

图3是(111)镍单晶膜在500°C和0.1大气压下氧化十分钟后的电子衍射花样.从图中可以明显地看出内层较弱的六个 $\{220\}_{\text{NiO}}$ 衍射斑点与外层较强的六个 $\{220\}_{\text{Ni}}$ 衍射斑点间的平行取向关系,即 $(111)_{\text{NiO}} // (111)_{\text{Ni}}$, $[1\bar{1}0]_{\text{NiO}} // [1\bar{1}0]_{\text{Ni}}$.

图中透射线附近的六个非常弱的斑点是由于镍的 $\{220\}$ 衍射在氧化镍中产生二次衍射的结果.

四、讨论与结语

从表1及表2所列的结果可以看出,本工作所获得的镍单晶膜上氧化镍的配位生长关系与前人的结果虽然有些一致的地方,但也有不少分歧之处.前人的研究工作中只有Collins和Heavens^[1]使用以NaCl为底晶生长的镍单晶膜与本工作的实验情况相似;其他的工作^[2-4]都使用较大的镍单晶球进行氧化研究,由于实验条件不同,不便直接对比.因此下面的讨论主要是从比较我们的结果与Collins和Heavens的结果的异同出发,探讨氧化镍的配位生长关系.

Collins和Heavens在膜面为(001), (110)和(111)三种镍单晶膜上都得到氧化镍与镍间的平行取向关系,而在本工作中,这种关系仅在(111)镍单晶膜上经常出现,在(001)镍单晶膜上只是当镍膜比较完整时才占主导地位.另一方面,在本工作中还新发现了配位生长关系较不严格的氧化镍 $\langle 111 \rangle$ 纤维结构和 $\langle 110 \rangle$ 纤维结构.

应当指出,Collins和Heavens使用的NaCl底晶是经过研磨、抛光和化学浸蚀的,表面比较平整.我们则直接使用NaCl晶体的解理面,或者是在NaCl晶体上淀积一层铜膜,表面有许多台阶,只有新撕开的云母才是非常平滑的.从金属在NaCl底晶上的配位生长研究结果得知,当底晶较完整和表面较平滑时,容易得到连续的金膜,孪晶和层错等晶体缺陷都比较少^[8].显然,不连续或不完整的镍膜上生成的氧化镍就比较容易有不大严格的配位生长关系.从这个角度来看,Collins和Heavens在三种取向的镍膜上都获得了氧化镍的平行生长取向,而从未观察到氧化镍的 $\langle 111 \rangle$ 纤维结构和 $\langle 110 \rangle$ 纤维结构,并不是难以理解的.镍单晶球一般都是比较完整的,文献[2-4]的结果在许多方面与Collins和Heavens的结果相同(见表1)也是很自然的.表2中所列的(001)单晶的实验结果更清楚地说明了镍膜的完整程度对氧化镍配位生长的重要作用.在NaCl底晶上直接生成的镍膜较不完整,氧化镍的配位生长关系也较不严格, $\langle 110 \rangle$ 纤维结构占主导地位.在铜膜上生成的镍膜较为完整,氧化镍的配位生长关系也较为严格,平行取向占主导地位.在两种镍膜情况下,界于上述两种配位生长关系中间的氧化镍 $\langle 111 \rangle$ 纤维结构均占适当的地位.Brine和Young^[6]在新解理的(001)NaCl底晶上淀积金、银和铜,也曾获得这些金属的 $\langle 111 \rangle$ 纤维结构和 $\langle 110 \rangle$ 纤维结构.

尽管有上述差异,本工作与前人^[1-4]的研究都一致地指出, $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 是所有配位生长关系中的共同特征.在阐明 $\langle 110 \rangle$ 方向的作用方面,表2所列本工作的结果可能

更有说服力。膜面为(001)和(110)的镍单晶膜都是在新解理的 NaCl 底晶上生长的, 不完整程度应相似, 但是在(001)镍单晶膜上生长的氧化镍却有较严格的配位关系, 这很可能是(001)面上有两个 $\langle 110 \rangle$ 方向所致。我们虽然在(111)镍单晶膜上获得了完全的氧化镍平行生长关系, 但不能肯定这是由于(111)面上有三个 $\langle 110 \rangle$ 方向的结果, 还是由于云母上生长的镍膜比较完整所致。为了研究 $\langle 110 \rangle$ 方向数目的作用, 我们曾试图在(111)面解理 NaCl 晶体, 以消除各种取向镍单晶膜的不完整程度的差异, 未获成功。

无论如何, 在面心立方晶体的配位生长关系中, $\langle 110 \rangle$ 方向的重要作用是不容忽视的。金属在 NaCl 上淀积如此, 在面心立方金属上生成面心立方的氧化膜也是如此。 $\langle 110 \rangle$ 是面心立方晶体的密排方向, 也是外来原子最容易吸附的方向。Germer 等^[11]用慢电子衍射证实氧原子首先在镍的(111)面上的三个 $\langle 110 \rangle$ 方向吸附, 沿这些方向长大, 同时扩展到整个晶面, 在镍的(111)面上形成有平行取向的氧原子层。镍原子通过扩散到达表层, 也排列在 $\langle 110 \rangle$ 方向, 形成有平行取向的氧化镍。(111)面上有三个 $\langle 110 \rangle$ 方向, 只要在这三个方向上优先长大, 就可以确定平行取向关系。Shimoka^[12]在电子显微镜中研究镍铬合金及不锈钢的氧化, 发现氧化优先在 $\langle 110 \rangle$ 开始。在许多其他面心立方金属上, 氧化物的配位生长也遵循 $\langle 110 \rangle$ 方向平行的关系, 例如铜在硫酸铜中氧化后生成的氧化亚铜与铜的取向关系就是如此^[5]。

从上述讨论可以看出, 无论是从镍单晶膜的完整性来看, 还是从(111)面上的 $\langle 110 \rangle$ 的数目来看, (111)镍单晶膜上生成的氧化镍有完全平行的生长关系是很自然的。

(110)膜面上仅有一个 $\langle 110 \rangle$ 方向, 氧化镍还是优先沿这个方向长大的, 但是一维生长条件不能确定氧化镍三维长大的趋势。氧化镍的侧向生长完全没有约束, 自由度很大, 可以绕 $\langle 110 \rangle$ 轴任意旋转, 产生 $\langle 110 \rangle$ 纤维结构。在这种情况下, 镍膜的完整程度的作用不大。我们的实验结果与此是相符的。

(001)膜面上有两个正交的 $\langle 110 \rangle$ 方向, 因为在此膜面上 $\langle 110 \rangle$ 方向的数目介于(110)与(111)膜面之间, 所以氧化镍既有生成平行取向的趋势, 也有生成 $\langle 110 \rangle$ 纤维结构的趋势。在这种情况下, 镍膜的完整程度可能起主导作用。镍膜的完整程度较高, 氧化镍生成平行取向的趋势较大; 反之, 氧化镍生成 $\langle 110 \rangle$ 纤维结构趋势较大。我们的实验基本上肯定了这种关系。

综上所述, 可以得出下面两点结论:

(1) 膜面为(110), (001) 和 (111)的镍单晶膜上生成的氧化镍的取向的电子衍射分析结果是, 除了在(111) 和 (001)镍单晶膜上肯定了前人已发现的平行取向关系外, 还在(110)和 (001) 镍单晶膜中发现了 $(111)_{\text{NiO}} // (001)_{\text{Ni}}$, $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 的氧化镍纤维结构以及 $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 的氧化镍纤维结构。

(2) 在所有氧化镍与镍的取向关系中, 均有 $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ 关系, 这足以说明 $\langle 110 \rangle$ 密排方向在面心立方晶体配位生长中的重要作用。从单晶膜面上的 $\langle 110 \rangle$ 方向的数目以及膜的完整程度两方面讨论了氧化镍在(110), (001), (111)三种镍单晶膜上的配位生长关系, 指出在有三个 $\langle 110 \rangle$ 方向的(111)膜面上最容易生成配位生长关系最严格的平行取向, 在仅有一个 $\langle 110 \rangle$ 的(110)膜面上最容易生成配位生长关系很不严格的 $\langle 110 \rangle$ 纤维结构。在有两个 $\langle 110 \rangle$ 方向的(001)膜面上, 氧化镍既有生成平行取向的趋势, 亦有生成

$\langle 111 \rangle$ 纖維构和 $\langle 110 \rangle$ 纖維纖維构的趋势。在这种情况下, 镍膜的完整程度有相当大的作用; 镍膜越完整, 氧化镍的配位生长关系越严格, 平行取向则占主导地位。

参 考 文 献

- [1] Collins, L. E. and Heavens, O. S., *Proc. Phys. Soc.*, **B70** (1957) 265.
- [2] Lawless, K. R., Young, F. W. and Gwathmey, A. T., *J. Chim. Phys.*, **53** (1956), 667.
- [3] Schrank, M., 博士论文, Darmstadt (1958), 引自文献[4].
- [4] Otter, M., *Z. Naturforsch.*, **14a** (1959), 355.
- [5] Lawless, K. R. and Miller, G. T., *Acta Cryst.*, **12** (1959), 594.
- [6] Brine, D. A. and Young, R. A., *Phil. Mag.*, **8** (1963), 651.
- [7] Bassett, G. A. and Pashley, D. W., *J. Inst. Metals*, **87** (1958/59), 449.
- [8] Anderson, J. C., Transaction of the Eighth Vacuum Symposium, **2** (1961), 930.
- [9] Watanabe, D. and Ogawa, S., Fujita, F. E., *J. Phys. Soc. (Japan)*, **12** (1957), 999.
- [10] Heidenreich, D. and Burbank, R. D., *Phil. Mag.*, **5** (1960), 373.
- [11] Germer, L. H. and Hartman, C. D., *J. Appl. Phys.*, **31** (1960), 2085.
- [12] Shimoka, G., *J. Electrochem. Soc.*, **110** (1963), 1177.

THE ORIENTATIONS OF NiO EPITAXIALLY GROWN ON Ni FILMS

Hsü PU CHEN TSIEN-TI KUO KE-HSIN

ABSTRACT

The orientations of NiO formed on evaporated Ni single-crystal films with surfaces parallel to $\langle 110 \rangle$, $\langle 001 \rangle$, or $\langle 111 \rangle$ have been studied by means of electron diffraction. Beside that the parallel orientation relationship already known to exist between NiO and Ni has been confirmed, the following NiO textures have been found in the present investigation:

$\langle 111 \rangle$ texture: $\langle 111 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 001 \rangle_{\text{Ni}}$, $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$;

$\langle 110 \rangle$ fibre texture: $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$.

It was shown that $\langle 110 \rangle_{\text{NiO}} // \langle 110 \rangle_{\text{Ni}}$ is common to all orientation relationships between NiO and Ni, thus making it clear that the close-packed direction $\langle 110 \rangle$ plays an important role in the epitaxial growth of f.c.c. crystals. The various trends of epitaxial growth of NiO are discussed with respect to the number of $\langle 110 \rangle$ directions on the film surface and to the degree of perfection of Ni films.