

Sr 变质对 Al-Si 合金共晶硅中 孪晶产生的影响

哈尔滨工业大学 曾松岩 张虎 李庆春

本文利用 TEM 观察了经 Sr 变质后 Al-Si 合金中共晶硅的生长特征。结果表明：变质后共晶硅中孪晶密度较高，且常有两个以上的 $\{111\}$ 孪晶同时存在，生长速度对孪晶密度与孪晶特征影响很大。文章也分析了产生上述现象的原因。

关键词：Al-Si 合金，孪晶，变质

The Effect of Modification of Sr on the Formation of Twins in Eutectic Si of Al-Si Alloy

Zeng Songyan Zhang Hu Li Qingchun
(Harbin Polytechnical University)

The growth characteristic of eutectic Si of Al-Si alloy has been investigated through TEM. It has been shown that the density of eutectic Si is higher and that there is usually existed more than two $\{111\}$ twins. The growth rate has a great effect on the density and the characteristic of twins. The reason has also been analyzed in this paper.

Key words: Al-Si alloy, Twin, Modification

一、前言

在 Al-Si 合金变质中，Sr 为“吸附”类变质剂，它可以明显改变共晶硅的组织形态及微观结构。但其微观结构的改变，如晶体生长缺陷的变化对共晶硅的生长过程有何影响，都是多年来人们非常感兴趣而认识又很模糊的问题。本文观察了加 0.10% Sr 变质的 Al-12.7% Si 共晶合金在生长速度为 30~2500 $\mu\text{m/s}$ 范围内的组织形态，并探讨了加 Sr 变质共晶硅的生长特征。

二、试验方法

试样均取自在自制的连续定向凝固装置上铸成的 $\phi 10\text{mm}$ 铸锭。透射电镜样品是用离子减薄或采用萃取方法制备。

三、试验结果及分析

1. 加 Sr 变质共晶硅的特征

图 1 为加 Sr 后共晶硅的典型特征。可见，共晶硅上半部含有 $(1\bar{1}1)$ 、 $(11\bar{1})$ 轴孪晶，下半部也含有 $(1\bar{1}1)'$ 、 $(11\bar{1})'$ 轴孪晶，上半部分和下半部分又互为孪晶，孪晶轴为 $(1\bar{1}1)$ 。未加 Sr 变质的共晶硅中只含有平行于

$[21\bar{1}]$ 方向的孪晶，而加 Sr 变质后，不但含有平行于生长方向 $[21\bar{1}]$ 方向的孪晶，还有不与生长方向平行的孪晶。此外，加 Sr 变质后，又包含大量非常细小的孪晶（见图 1 颜色发暗处），其宽度非常狭窄，仅为 10~40 \AA ，也就是说只有 3~10 个原子间距宽。同时孪晶分布很不均匀，在同一硅片中，有些区域孪晶密度很高，而另一些区域很小甚至不存在孪晶。

表 1 给出了当 Sr 加入量相同时生长速度对共晶硅中孪晶密度的影响。表中孪晶平均间距为在垂直于孪晶

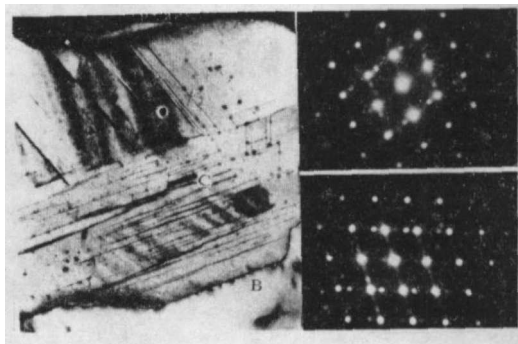


图 1 加 Sr 变质共晶硅的孪晶特征，Al-12.7%Si+0.1%Sr
R=100 $\mu\text{m/s}$ ，TEM，离子减薄样品
(a) B $[0\bar{1}1]_{\text{Si}}$ 形貌；(b)、(c) (a) 中
B、C 处 B $[0\bar{1}1]_{\text{Si}}$ 衍射花样

轴方向上视野中整个共晶硅长度上的平均间距；孪晶宽度为在这一方向上微细孪晶的宽度。当生长速度较低时（ R 为 $100\mu\text{m/s}$ ），平均孪晶间距为 700\AA ，平均孪晶宽为 20\AA ，随生长速度增大，孪晶密度增大；当生长速度超过某一值后，孪晶密度反而下降。

表 1 加 Sr 变质共晶硅的孪晶特征

生长速度 R ($\mu\text{m/s}$)	Si 相平均宽 (μm)	孪晶平均间距 (\AA)	微孪晶平均宽 (\AA)
100	0.40	250~20000	10~40
750	0.25	100~2000	10~40
2500	0.15	>500	10~30

Lu 和 Hellawell 以及 Hogan 等人^[1~3]研究认为，加 Sr

变质共晶硅生长方向在 $[001]$ 到 $[011]$ 间变化，择优生长方向为 $\langle 001 \rangle$ 。对萃取样品中共晶分枝形态观察表明，经 Sr 变质后，仍具有确定的择优生长方向，择优生长方向为 $\langle 2\bar{1}1 \rangle$ （见图 2）。图 2b 为分枝示意图，并示意地表现了相应的孪晶特征，分枝 1、2、3、4、5、6、8、10，在同一 (011) 平面，分枝 1（4、9、10）、2、5、8 生长方向分别为 $[2\bar{1}1]$ 、 $[21\bar{1}]$ 、 $[2\bar{1}1]$ 。分枝 7 在 $(0\bar{1}1)$ 平面，生长方向为 $[211]$ 。有趣的是分枝 6 由分枝 5 进一步分枝生长逐渐由 $[21\bar{1}]$ 方向转为 $[2\bar{1}1]$ 方向并最终搭接在分枝 4 上，与分枝 4 愈合并共同生长。可见，尽管从共晶硅形态的伸展方向和分枝的最初生长方向看，共晶硅可以沿不同方向生长，但最优先的生长方向仍为 $\langle 2\bar{1}1 \rangle$ 。

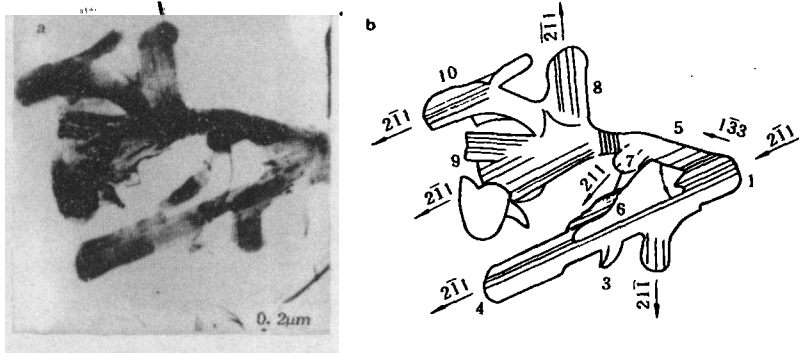


图 2 加 Sr 变质共晶硅的分枝特征，Al-12.7%+0.1%Sr， $R=750\mu\text{m/s}$ ，TEM，萃取样品
(a) 共晶硅形貌； (b) 共晶硅结构与分枝示意图

2. 加 Sr 变质共晶硅中生长缺陷的产生及其在生长中的作用

由前可知，加 Sr 变质共晶硅含有大量孪晶，关于产生高密度孪晶的原因前人有过许多探讨，其中以 La 和 Hellawell^[2]提出的“杂质诱及孪晶”理论最为信服。这里只从晶体结构出发讨论孪晶的产生过程。

有迹象表明，加 Sr 变质共晶硅中孪晶与正常硅一样是在生长过程中逐渐产生的。图 3 为只含 $(1\bar{1}1)$ 系孪晶的共晶硅，生长方向为 $[111]$ 。生长方向与孪晶面 $(1\bar{1}1)$ 面相垂直。显然，它是由于硅原子在已有的共晶硅 (111) 面上外延生长时产生错排而产生。而它在共晶硅继续生长中不起作用。

图 4 为含有 $[11\bar{1}]$ 轴和 $[1\bar{1}1]$ 轴孪晶的共晶硅，生长方向为 $[21\bar{1}]$ 。这些孪晶相当于在一大块共晶硅上分布着许多细小的面缺陷，如把它们视为亚晶界，则大块共晶硅就由这些连续或不连续的亚晶界分割为许多亚晶粒，而每一亚晶粒在生长过程中都有自己独立的生长过程，即各亚晶粒独立生长又互相影响，可用图 5 描述之。

亚晶粒 1 沿已有凹槽生长，其端部与螺旋生长台阶相似，在亚晶粒和原 (111) 面间的接合层形成微孪晶，亚晶粒原不含孪晶，但在生长中产生一平行于生长方向

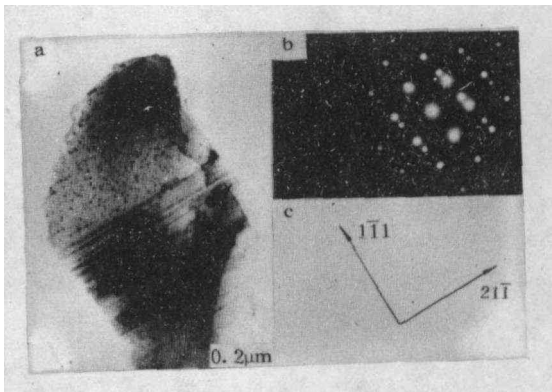


图 3 加 Sr 变质共晶硅中孪晶的生长特征，
Al-12.7%Si+0.1%Sr， $R=100\mu\text{m/s}$
TEM，萃取样品
(a) $B[011]_{\text{Si}}$ 形貌，(b) 相应的 $B[011]_{\text{Si}}$
衍射花样，(c) 硅中取向关系

的微孪晶，而此孪晶显然对亚晶粒本身生长不起作用。图 5b 中亚晶粒 (4) 在生长过程中产生不平行于生长方向的另一孪晶系的横向微孪晶，继而又产生一横向孪晶，并扩展到亚晶粒 (3) 内，形成一较大的横向微孪晶，于是亚晶粒 (3)、(4) 合并成同一亚晶粒 (5)。此后又

产生横向孪晶(6), 孪晶(6)由于某种原因未能在原晶粒(7)上完全生长而暴露出亚晶粒(7)的已有{111}面, 说明亚晶粒沿已有凹槽或已有的{111}面生长并非特例, 而是一种普遍现象, 不仅存在于晶粒边缘, 即便

在晶粒中心部位, 也可以这种方式生长。随着共晶硅继续生长, 孪晶(6)又恢复为正常晶体并由平行于生长方向的微孪晶分裂成亚晶粒(8), (9), 如图5c所示。

由上述可见, 含有两面{111}轴孪晶的共晶硅仍具

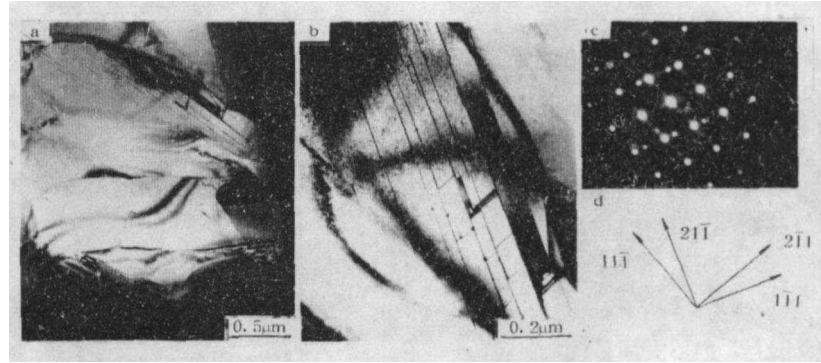


图4 加Sr变质共晶硅中孪晶与层错的生长特征, Al-12.7%Si+0.1%Sr, R=100μm/s, TEM, 萃取样品
(a) B [011]_{Si}; (b) (a)中(D)处局部高倍形貌; (c)相应的B [011]_{Si}衍射花样; (d)硅中取向关系

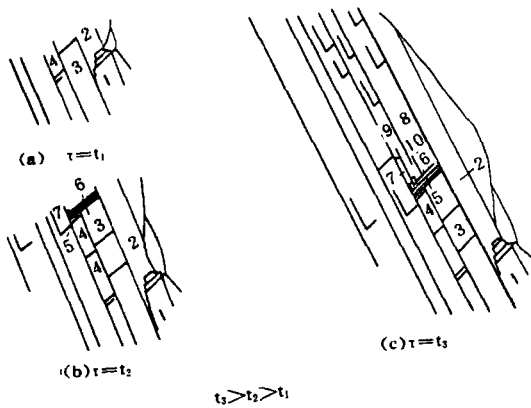


图5 加Sr变质共晶硅生长及孪晶形成示意图

有沿{111}面吸附生长的特征。合金加Sr变质后, 共晶硅中出现了未变质硅中根本不存在的横向孪晶, 显然它的产生与Sr有关。

对于加Sr变质后, 共晶硅中孪晶主要是在生长尖端的{111}面产生的, 其产生模型如图6所示。由于Sr变质, 共晶硅生长过冷增大, 在共晶硅生长尖端{111}面可以由硅原子在孪晶位置吸附生长而形成孪晶, 同时由于“杂质诱发孪晶”机制产生孪晶对热力学要求降低, 所以, 加Sr后孪晶密度要较未加变质剂多得多, 并可以产生两个或两个以上{111}系孪晶。随着生长速度增大, 共晶硅生长驱动力增大, 生长界面趋于粗糙化, 生长尖端的{111}面上被吸附原子增多, 使{111}面上台阶密度增大, 以至于硅原子在{111}面上形核的机会减少, 同时, 杂质原子强迫硅原子错过规则的密排位置落入另一密排位置毕竟还需要一定能量。如果台阶密度较大、运动速度较快, 硅原子没有必要领先在另一密排位置来使台阶继续向前移动。在该杂质原子附近的其它台阶就会推移到该杂质原子处而淹没了该杂质原子, 于是该材料工程

杂质原子失去了“诱发”孪晶的能力。所以生长速度增加导致生长过冷增大, 对于孪晶产生有两方面的影响, 有助于硅原子在生长尖端{111}面上的孪晶生核, 从而增大孪晶密度; 另一方面, 使台阶密度增大, 运动速度增高, 杂质不能诱发孪晶, 从而使孪晶密度降低; 两方面综合作用的结果, 使得加Sr变质共晶硅中孪晶密度随生长速度增大而增加, 生长速度增大到某一值后又随之而减少, 直至消失。

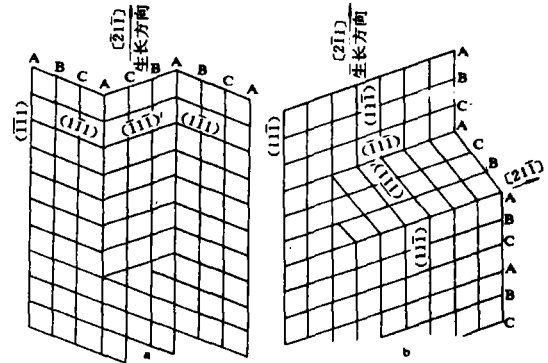


图6 共晶硅中孪晶的形成
(a)纵向微孪晶; (b)横向微孪晶

四、结论

1. 加Sr变质, 共晶硅中含有高密度孪晶, 且常有二个以上的孪晶系启动。随生长速度增大, 孪晶密度增加, 当生长速度达到某一值后, 孪晶密度又随之减少。
2. 加Sr变质后, 共晶硅的择优生长方向仍为 $\langle 2\bar{1}1 \rangle$ 方向。
3. 加Sr变质后, 共晶硅微观结构可视为由许多亚晶粒组成, 亚晶界为微孪晶, 在生长过程中各亚晶粒既独立生长又相互影响。

参考文献 (略)