离心机环境对锡熔体热对流及温度脉动的影响*

郑 云 马文驹 陶 锋 薛明伦
(中国科学院力学研究所,北京 100080)
周伯骏 林兰英
(中国科学院半导体研究所,北京 100083)

关键词 晶体生长、热对流、Coriolis 力、温度脉动

晶体材料在现代科学技术中有着重要的应用,为获得高质量的半导体晶体材料,人们做了大量的工作. 研究发现,在晶体生长过程中,熔体中存在的强迫对流和自然对流等流动对加速传热传质有利,但非定常的对流引起温度脉动会造成晶体缺陷,产生杂质条纹[1,2]. 随着航天事业的发展,人们开始利用卫星、飞船进行微重力条件下材料制备的研究,并取得一些成果,但成本非常昂贵. 与此相反,德国的 Muller[3,4]首先从超重角度来考虑这个问题,1980 年,他们在离心机上做了垂直 Bridgman 方法的晶体生长,以高离心力来模拟超重力. 实验发现,在一定条件下,离心机上生长出来的晶体,其杂质条纹被有效地抑制了. 在我国,1988 年,由力学所和半导体所合作,用水平 Bridgman 法制备出世界上第一根超重条件下生长的砷化镓单晶,杂质条纹也得到一定的改善[5]. 在离心机上生长单晶与空间生长相比,可大大降低成本. 为了深入研究这一问题,我们以锡为介质,其 Pr 数接近半导体晶体材料的 Pr 数,用水平舟法,在大型离心机上进行实验,发现离心力和 Coriolis 力对熔体流动有很大影响.

1 实 验 方 法

横截面为半圆形的石英舟内放有锡熔体,舟长 80mm,横截面半径为 10mm,舟内锡熔体深 8mm,并安装有 3 个直径为 1mm 的测温热偶. 石英舟置于筒形加热炉内的中轴位置,锡熔体处于一个纵向温度梯度的作用下. 加热炉通过轴承安装于臂长 7m 的大型离心机的臂端,使舟底始终保持指向重力和离心力之合力的方向. 热偶信号经放大并通过离心机滑环,由 A/D 采集数据和记录仪记录温度变化. 纵向温度梯度由热偶 1 和热偶 3 测出,温度脉动记录始终由热偶 2 测得. 实验装置如图 1、图 2 所示.

在实验中,先升高炉温,直至舟内熔体的温度梯度为 16K/cm,然后稳定炉内温度,测出在离心机不转($\omega=0$),离心机正转($\omega>0$,即离心机转向和熔体中自然对流方向相同)和反转($\omega<0$,离心机转向和熔体中自然对流方向相反)的条件下熔体的温度脉动情况.

1993-02-11 收稿,1993-07-05 收修改稿.
* 中国科学院重点科研项目和国家自然科学基金资助项目.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

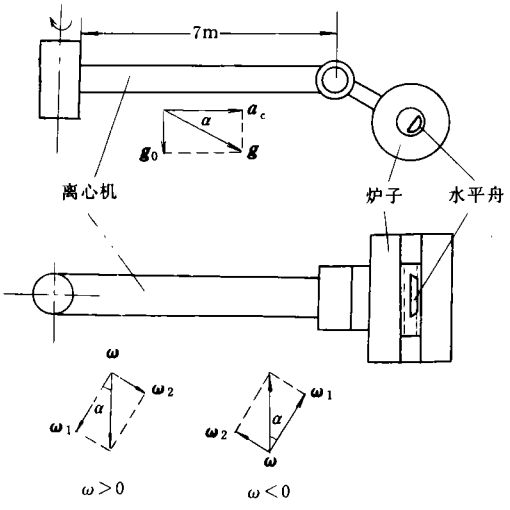

图 1　实验装置图

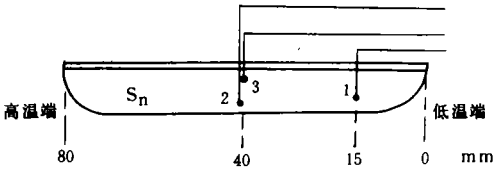

图 2　水平舟示意图

2 结 果 和 讨 论

在升温过程中，当离心机不转时，随着温度梯度 G_T 增大，锡熔体中温度从无脉动到周期性脉动，后为无规则脉动，幅值明显增大. 当温度梯度约为 16K/cm 时，脉动幅值约±1K，离心机转动后，两种旋转方式(正转与反转)都提高了 g($g=\sqrt{a_c^2+g_0^2}$，其中 a_c 是离心加速度，g_0 是重力加速度)，加强了熔体中的对流，促进熔体中传热传质的进行，测得温度梯度都是降低的；但温度脉动变化趋势却截然不同：

1)离心机正转时，测得一组温度脉动曲线，见图 3(a). 当 $a_c>1g_0$ 时，温度脉动幅值 δT 几乎不变，$\delta T\approx 0.2$K，比 $a_c=0$ 时的脉动值大大降低.

2)离心机反转时，温度脉动曲线见图 3(b). 脉动幅值 δT 随 a_c 增大而增大，同时脉动频率也增加. 当 $a_c>1g_0$ 时，δT 值比离心机不转时增大.

不论离心机正转还是反转，对于同一个 a_c 值，熔体受到的离心力都是一样的，但 Coriolis 力方向却相反.

单位质量熔体质点受到 Coriolis 力

$$\boldsymbol{F}_c=2\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{\omega}, \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{\omega}$ 是离心机转动角速度，$\boldsymbol{V}$ 是熔体质点的运动速度(相对于离心机)，角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 可以分解成垂直于 $\boldsymbol{g}$ 方向的 $\boldsymbol{\omega}_1$ 和平行于 $\boldsymbol{g}$ 方向的 $\boldsymbol{\omega}_2$(见图 1). 这样

$$\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{\omega}_1+\boldsymbol{\omega}_2,$$

得

$$\boldsymbol{F}_c=2\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{\omega}_1+2\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{\omega}_2=\boldsymbol{F}_{c_1}+\boldsymbol{F}_{c_1}. \tag{2}$$

当 $a_c>1g_0$ 时，$\mathbf{F}_{c_1}$起主要作用.

水平舟内熔体的流动主要是由水平温差引起的自然对流，流动状态由 Grashoff 数决定，

$$G_r=\frac{\beta L^4}{\upsilon^2}gG_T, \tag{3}$$

其中β是体积膨胀系数，L是舟的长度，υ是运动粘性系数，当G_r比较小时，熔体内流动如图4(a)所示，当G_r大到一定值，就会出现多个胞状环流，但这些胞状流动方向还是一致的(见图4

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

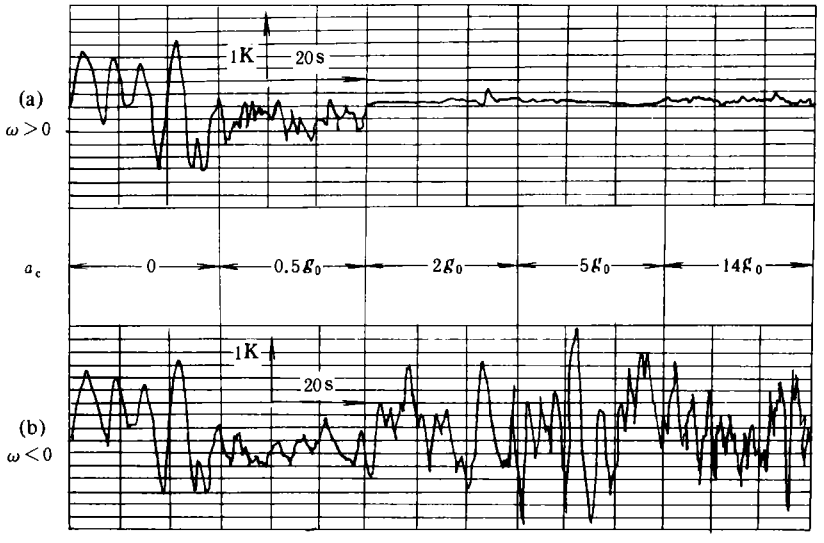

图 3 炉膛温度保持不变，不同离心机转速下的温度脉动记录
(a)为正转 $\omega>0$，(b)为反转 $\omega<0$

(b))．离心机正转时，F_{c_1}的作用是使胞内流线有向边界方向贴近的趋势，这对流动的稳定有利，所以温度脉动减小．当离心机反转时，F_{c_1}的作用是把涡往中心挤压，这会导致涡的破碎，使得流动更不稳定，温度脉动就会增大．

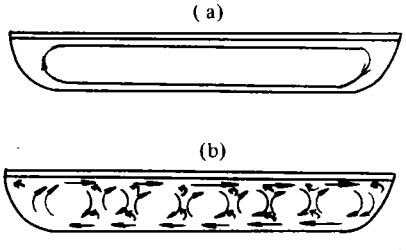

图 4 舟内熔体流动状态
(a)为 G_r 数较小时，(b)为 G_r 数较大时

在晶体生长过程中，晶体中杂质浓度 C_s 与熔体中杂质浓度 C_L 的关系是：

$$C_s=k_{有效}C_L,$$

$k_{有效}$是有效分凝系数：

$$k_{有效}=\frac{k_0}{k_0+(1-k_0)\exp(-\frac{u}{D}\delta)}, \quad (4)$$

其中 k_0 是平衡分凝系数，是常数，u 是晶体生长速度，D 是杂质在熔体中的扩散系数，δ 是边界层厚度．

生长界面附近熔体中的温度变化直接影响晶体生长速度 u，即影响 $k_{有效}$的值，也就影响了晶体中的杂质浓度 C_s．显然，剧烈的温度脉动会导致晶体中杂质分布不均匀，出现杂质条纹．所以，离心机正转时生长晶体，对晶体质量会有改善；反之，离心机反转时，对晶体生长不利．

3 结 论

本实验结果为我们提供了一个提示：在离心机环境中进行晶体生长，除了受到超重的影响外，还受到 Coriolis 力的影响．当离心机上进行水平定向凝固生长单晶时，若离心机的转动方

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

向与熔体内的热对流方向相同时，即熔体的高温端迎风时，熔体中温度脉动可以得到抑制，有利于生长无杂质条纹的单晶；反之，若离心机反向转动时，即熔体的低温端迎风时，熔体中存在较强的温度脉动，不利于单晶的均匀生长.

致谢　本实验是在航空航天部 511 研究所的离心机上进行的，在此表示感谢.

参　考　文　献

[1] 闵乃本，晶体生长的物理基础，第二章、第四章，上海科技出版社，1981.
[2] 马文驹、薛明伦，力学进展，1989，**19**：442－452.
[3] Muller, G., Neumann, G., *J. Grystal Growth*, 1982, **59**:548－556.
[4] Muller, G., Schmidt, E., Kyr, P., *J. Grystal Growth*, 1980, **49**:387－395.
[5] Lin Lan-ying Group, Xue Ming-lun Group, *J. Crystal Growth*, 1992, **119**:74－78.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net