

磁场微重力效应的研究*

张 雯†

(河北工业大学材料学院, 天津 300130)

(2007 年 7 月 22 日收到, 2008 年 9 月 22 日收到修改稿)

将导电的液体置于磁场中,使导电液体中浮力驱动的自然对流减弱甚至消失,在导电液体中制造出了二级微重力效应,将这种情况称为磁场微重力效应.通过研究导电液体自然对流驱动力的无量纲 Grashof 数的变化,发现微重力效应的水平可以用公式 $g_m = (\beta_0/\beta_m \chi \nu_0/\nu_m) g_0$ 计算,如果略去一次项,则可用 $g_m = (\nu_0/\nu_m) g_0$ 来估算.测量研究了不同磁场条件下硅熔体的磁黏度,估算不同磁场强度对应的磁场微重力水平后,发现估算结果与实验结果基本符合.

关键词: 磁场, 二级微重力效应, Grashof 数, 微重力水平

PACC: 4190, 6620, 8160C

1. 引 言

硅单晶材料是电子工业最基础的材料.随着集成电路技术水平的提高,提高单晶质量降低单晶成本已经成为硅单晶工业生产追求的首要目标.因此,许多晶体生长方法得到了应用,其中最有效的提高单晶质量的方法是空间的微重力生长方法和引入磁场的磁场晶体生长方法^[1,2].

空间的微重力材料生长实验表明^[3,4],在微重力生长条件下,由于熔体中浮力驱动的自然对流减弱或者消失,熔体流动处于扩散控制状态,有利于晶体的稳定生长,生长出的晶体具有结构完整性好、杂质分布均匀可控等优点^[5,6].可以认为,空间的微重力环境是最理想的晶体生长环境^[7].如果采用其他方法在熔体中制造出一级或者二级微重力效应,例如利用外加的磁场、电场或者电磁场,使熔体的流动阻力增大(宏观上表现为熔体黏度的增加)^[8,9],也可以达到抑制熔体中热对流的目的,这在某种程度上相当于获得了微重力条件——磁场微重力条件.因此,根据相应的实验数据,可以估算不同磁场条件对应的磁场微重力水平.如果理论研究和实验研究都能验证这种磁场微重力条件,那么就可以方便地获得一种不受时间和空间限制、成本较低、重力水平可以

调整的微重力环境,实现固相材料的地面微重力制造.

本文研究了磁场条件与微重力效应的关系,测量研究了硅熔体在水平磁场中的磁黏度,并估算了硅熔体中不同磁场强度对应的微重力水平.

2. 实 验

2.1. 实验装置

根据磁场对熔体性能影响的研究结果知道,受磁场影响最显著的性能是黏度,因此本文测量研究了水平磁场中硅熔体的黏度.测量装置如图 1 所示,该测量装置是经改造后的黏度仪,使用原日本公司生产的黏度仪的测量系统(回转振动法),新配置了快速密封升温炉和魔环水平磁场,提供连续可调节的水平均匀磁场,磁场强度范围为 0.002—0.276 T.

采用回转振动法测量硅熔体在水平磁场中的黏度时,装有硅熔体的坩埚需要在水平磁场中转动,如果坩埚是导体,就会受到磁场的作用,从而影响黏度的测量结果,因此必须使用不导电的坩埚.我们设计了悬吊式氧化铝质坩埚和吊杆(图 2),坩埚和吊杆均由高纯氧化铝陶瓷制成,20 和 1000 °C 时其电导率分别为 10^{-6} 和 $10^{-4} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$.可以认为,该坩埚能有效

* 河北省自然科学基金(批准号:503054)和河北工业大学博士科研启动基金资助的课题.

† E-mail: zhangwen@hebut.edu.cn

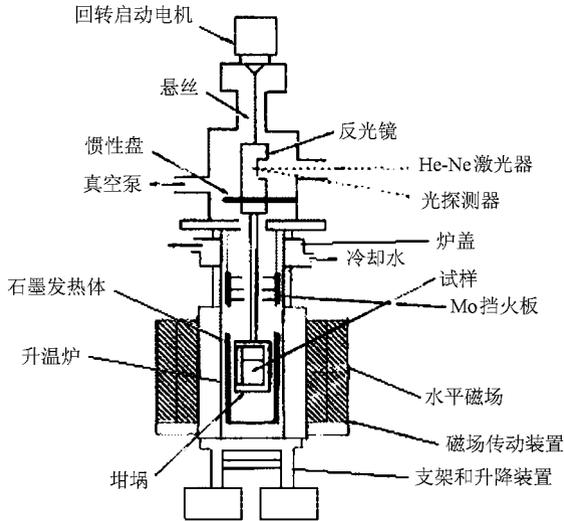


图1 带水平磁场的磁黏度测量装置

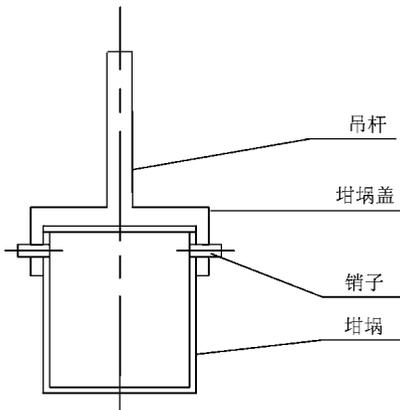


图2 高纯氧化铝坩埚

地避免磁场对测量结果的影响。

2.2. 实验方法

2.2.1. 测量样品的制备

将从大块硅单晶上切割下的圆柱状硅单晶装入氧化铝坩埚中,连接好坩埚上端杆部和黏度测量装置的悬吊系统,然后将磁场调节到最弱(0.022 T),密封测量装置,抽真空到 5 Pa,通高纯氩气到 10^5 Pa,通电开始升温,升温速度控制在 5—10 °C/min,升温到 1590 °C 保温 2 h,形成均匀的硅熔体。

2.2.2. 磁黏度的测量

按照温度由高到低、磁场由弱到强的顺序,依次测量硅熔体在不同温度、不同磁场条件下的黏度,每到一个新的温度点,都需要保温 0.5 h 以上。

3. 结果与讨论

3.1. 微重力条件下熔体的物理特征

根据太空微重力晶体生长实验,奚日升^[10]总结出微重力条件下熔体的主要物理特征:(1)熔体内部的静压力消失(一级微重力效应);(2)浮力引起的异相沉浮消失(二级微重力效应);(3)相对于重力而言的次级力(如表面张力)显露出来,并对熔体的对流产生重要的影响(二级微重力效应)。在这三个物理特征中,影响固体析晶或冷凝行为的主要因素是浮力引起的异相沉浮消失(二级微重力效应)。当熔体中出现二级微重力效应时,熔体中没有宏观对流,熔体受扩散控制,因此,没法在熔体中制造出一级或者二级微重力效应,就可以认为熔体处于某种程度的微重力场中。

3.2. 影响熔体自然对流的状态参数

熔体自然对流的主要原因是熔体中存在着对流驱动力,该驱动力的大小可用无量纲 Grashof 数 Gr 表征,即

$$Gr = g\beta\Delta T b^3/\nu^2, \quad (1)$$

其中 β 为熔体的热膨胀系数, ΔT 为熔体中的温度差; b 为坩埚的特征尺寸(坩埚半径), g 为重力加速度, ν 为熔体的运动黏滞系数(简称黏度)。

对于硅熔体, Gr 为浮升力与黏性力之比的一种度量,它是描述自然对流的一个准则数。 Gr 增大,表明浮升力作用也相应增大,它反映了自然对流中流动强度对换热强度(重力作用)的影响。如果某种影响因素导致 Gr 降低,可以认为是减弱了浮力引起的异相沉浮,当 Gr 的降低是由磁场引起时,我们称这种情况为磁场微重力效应。

3.3. 磁场条件与微重力效应的关系

在熔体中引入磁场后,由于熔体受到洛伦兹力的作用,熔体的流动方向发生改变,熔体间的内摩擦力增加,宏观的效果是增加了熔体的磁黏滞力,从而减弱了熔体的流动^[11]。根据(1)式可以发现,磁场的引入可导致熔体的 Grashof 数 Gr 降低,其效果等同于熔体所在环境重力水平的降低。

$$Gr_m = g_0\beta_m\Delta T b^3/\nu_m^2, \quad (2)$$

$$Gr_1 = g_m\beta_0\Delta T b^3/\nu_0^2. \quad (3)$$

其中 Gr_m 为磁场作用下的 Grashof 数, Gr_t 为实际 Grashof 数.

而

$$Gr_m = Gr_t$$

即

$$g_m = (\beta_0/\beta_m)(\nu_0/\nu_m)g_0. \quad (4)$$

由于熔体的热膨胀系数基本上只与温度有关, 因此我们认为磁场条件下熔体的热膨胀系数与无磁场条件下相近. 略去(4)式中的一次项 β , 则有

$$g_m = (\nu_0/\nu_m)g_0. \quad (5)$$

由(5)式可知, 熔体黏度的变化等同于熔体所处重力水平的变化, 可以认为黏度的增加等同于熔体所处重力水平的降低(二级微重力效应). 此时, 熔体的流动状态等同于相应微重力水平下熔体的流动, 熔体处于微重力状态. 因此, 只要测量得到硅熔体在不同磁场条件下的黏度, 就可以估算出相应的微重力水平.

3.4. 不同磁场强度对应的微重力水平

对不同磁场条件下硅熔体磁黏度的测量结果(表1)表明, 随着磁场强度的增加, 硅熔体的磁黏度也增加. 黏度增加的宏观效果是熔体中的浮沉作用(自然对流)减弱, 因此可以认为, 磁场的引入导致硅熔体中产生了重力水平降低的效应.

表1 硅熔体在不同磁场强度下的黏度测量结果(单位为 $10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$)

温度/K	0T	0.022T	0.045T	0.068T	0.091T	0.153T
1963	0.533		2.000		5.716	14.892
1933	0.649		2.554		6.976	20.617
1913	0.950		3.332		9.593	26.246
1883	1.042	1.615	3.167	5.709	9.693	27.978
1863	0.931	1.688	3.478	6.445	10.816	
1843	1.075	1.883	3.313	6.332	10.567	
1823	1.281	1.815	3.420	6.665	10.572	
1803	1.317	1.926	3.633	6.915	10.995	
1783	1.421	1.889	3.599	6.975	10.964	
1763	1.498	1.932	3.841	6.923		
1743	1.457	1.814	3.756	7.111		
1723	1.390	1.508	3.311	6.115		
1703	0.758	0.837	2.112	3.695		
1693	0.574	0.778	1.654	2.653		

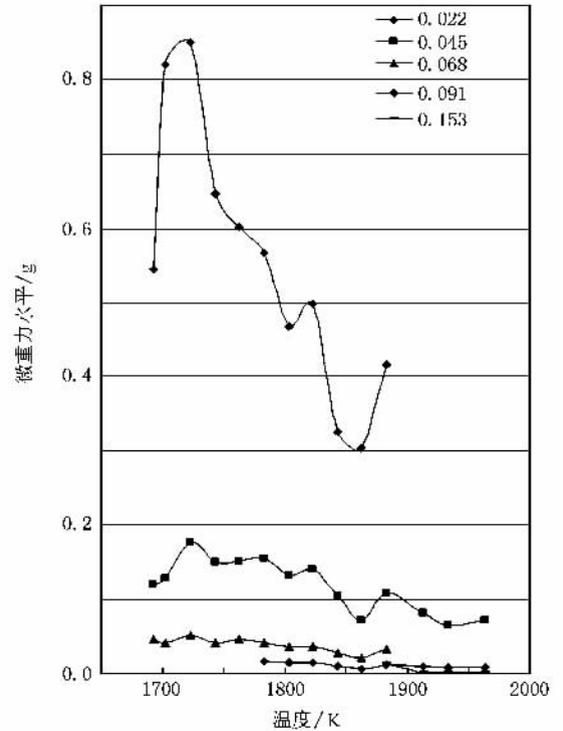


图3 磁场微重力水平与磁场强度的关系

微重力水平, 结果如图3所示. 由图3可以看出, 在同一磁场条件、不同温度下计算得到的微重力水平并不完全一致. 在磁场强度较低的条件, 计算得到的磁场微重力水平差异较大, 但随着磁场强度的增加, 磁场微重力水平差异减小. 例如, 当磁场强度为 0.022 T 时, 对应的磁场微重力水平为 $0.304g_0$ — $0.849g_0$, 最高值是最低值的 2.79 倍. 当磁场强度增加到 0.068 T 时, 对应的磁场微重力水平为 $0.021g_0$ — $0.052g_0$, 最高值是最低值的 2.48 倍, 仍有较大差异. 当磁场强度增加到 0.153 T 时, 对应的磁场微重力水平为 $0.0010g_0$ — $0.0013g_0$, 最高值是最低值的 1.3 倍, 差异已经非常小. 考虑利用(5)式计算时略去了一次项热膨胀系数, 而计算值的差异也在同一数量级上且随着温度的增加而呈降低的趋势, 因此可以认为, 计算结果的差异是由于略去了一次项热膨胀系数所造成.

根据水平磁场对导电熔体流动状态的影响机理^[12]可以发现, 在水平磁场条件下硅熔体的纵向热膨胀受到了抑制, 磁场强度越高, 这种抑制作用越大, 温度越高, 这种抑制作用也越强烈. 因此在水平磁场中, 硅熔体磁热膨胀系数应该是减小的, 并且温度越高、磁场越强, 该系数减小越明显. 硅熔体的横向热膨胀则不受磁场抑制, 水平磁场对硅熔体磁热

我们按(5)式计算了不同磁场强度对应的磁场

膨胀系数的影响并不太明显.因此,略去热膨胀系数项(取 $\beta_0/\beta_m = 1$)得到的(5)式与(4)式的差异不大.在硅熔体中引入水平磁场,能够产生磁场微重力效应,该微重力效应的水平,可以用(5)式进行估算.

如果能够测量得到硅熔体在水平磁场中的热膨胀系数,则计算结果可能会更加准确,即(4)式为微重力水平的准确计算公式.

根据(5)式计算得到,当磁场强度为 0.1 T 时,对应的磁场微重力水平为 $10^{-2} g_0$,这与文献 [13] 的结果一致,文献 [13] 在磁场条件下直拉硅晶体生长实验中发现,当磁场强度为 0.1 T 就能达到抑制熔体流动(微重力水平低于 $10^{-2} g_0$)的目的.当磁场强度为 0.153 T 时,计算得到的微重力水平为 $10^{-3} g_0$,这与文献 [14] 的实验结果相符.文献 [14] 指出,当磁场强度达到 0.14 T 时能够使硅单晶的生长更容易、质量更好.这进一步表明,在适当的磁场作用下可以

获得磁场微重力效果.由(5)式计算得到的结果与实验结果基本相符,说明(5)式的近似是合理的,所得结果基本准确.

4. 结 论

1) 硅熔体在磁场作用下等同于熔体所处重力水平的降低,得到磁场微重力条件.

2) 熔体重力水平的降低与磁场强度有确定的数值关系,该磁场微重力水平可以用准确公式计算,也可用近似公式估算.

3) 根据磁场微重力的计算公式,可以设计新的产生微重力效应的装置.通过测量研究不同导电液体在不同磁场中的黏度,获得在不同导电液体中出现微重力效应的磁场条件,从而制造出地面条件的微重力环境,实现地面条件下材料的微重力生长.

-
- [1] Xu Y S, Liu C C, Wang H Y, Sun W Z, Zhang W 2003 *J. Microelectron. Eng.* **66** 542
- [2] Benz K W, Croll A 1998 *Mater. Sci. Forum* (Switzerland) **272** 109
- [3] Wang J T, Ge P W 2000 *Physics* **29** 665 (in Chinese) [王景涛、葛培文 2000 物理 **29** 665]
- [4] Sugahara A, Ogawa T, Fujii K, Ohyama T, Nakata J 2006 *Physica B* **376** 146
- [5] Zhang F Q, Chen N F, Wu J L, Zhong X R, Lin L Y 2004 *Chin. J. Space Sci.* **24** 455 (in Chinese) [张富强、陈诺夫、吴金良、钟兴儒、林兰英 2004 空间科学学报 **24** 455]
- [6] Ruiz X 2007 *J. Cryst. Growth* **303** 262
- [7] Matisak P, Zhao A X, Narayanan R, Fripp A L 1997 *J. Cryst. Growth* **174** 90
- [8] Kang J Y, Shinrrro T 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 324 (in Chinese) [康俊勇、户泽慎一郎 1996 物理学报 **45** 324]
- [9] Pang X J, Wang Q, Wang C J, Wang Y Q, Li Y B, He J C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5129 (in Chinese) [庞雪君、王强、王春江、王亚勤、李亚彬、赫冀成 2006 物理学报 **55** 5129]
- [10] Xi R S 2002 *Chin. J. Space Sci.* **22** 346 (in Chinese) [奚日升 2002 空间科学学报 **22** 346]
- [11] Quettier L, Vincent-Viry O, Maiffert A, Juster F P 2003 *Euro. Phys. J.* **22** 69
- [12] Zhang W 2005 *J. Synthetic Cryst.* **34** 525 (in Chinese) [张雯 2005 人工晶体学报 **34** 525]
- [13] Wang Q, Wang E G, He Y C 2003 *Mater. Sci. Eng.* **21** 590 (in Chinese) [王强、王恩刚、赫冀成 2003 材料科学与工程学报 **21** 590]
- [14] Zhang W L, Sun J S, Zhang E H, Li J X, Wu X S, Gao S L, Hu Y Q, Liu J Q 2001 *Chin. J. Mater. Res.* **15** 455 (in Chinese) [张维连、孙军生、张恩怀、李嘉席、吴小双、高树良、胡元庆、刘俊奇 2001 材料研究学报 **15** 455]

Micro-gravity effect in a magnetic field^{*}

Zhang Wen[†]

(College of Materials , Hebei University of Technology , Tianjin 300130 , China)

(Received 22 July 2007 ; revised manuscript received 22 September 2008)

Abstract

The magnetic field micro-gravity effect is the phenomenon that a secondary micro-gravity is produced when a magnetic field is introduced into an electric-conducting liquid , leading to the decline or extinction of the natural convection driven by buoyancy . The effect level could be described by the formula $g_m = (\beta_0 / \beta_m \sqrt{\nu_0 / \nu_m})^2 g_0$, according to the change of Grashof number . If neglecting β changes , the formula is simplified to $g_m = (\nu_0 / \nu_m)^2 g_0$, by which the effect levels corresponding to different horizontal magnetic field strengths were estimated on the basis of the measurement of the viscosities of silicon melt under different conditions of the magnetic field . The results showed that the estimated results agree with the experimental data .

Keywords : magnetic field , secondary micro-gravity effect , Grashof number , micro-gravity level

PACC : 4190 , 6620 , 8160C

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province , China (Grant No. 503054) and the Scientific Research Foundation for Doctors of the Hebei University of Technology , China .

[†] E-mail : zhangwen@hebut.edu.cn