

导电流体在水平磁场中的粘度^{*}

张 雯 刘彩池 王海云

(河北工业大学材料学院, 天津 300130)

摘要: 采用回转振荡法,在向导电流体所在空间引入水平可调永磁磁场的条件下,测量研究了导电流体——液态汞(20)的粘度.结果表明,液态汞的粘度随磁场强度的增大而增加,二者呈光滑的抛物线关系.液态汞在磁场中粘度增加的现象与磁场导致的固态导电物质的磁粘滞效应现象相似,可以用磁场对带电运动粒子的作用简单直观地解释液态汞在磁场中粘度增加的机理.这些研究成果为研究磁场直拉硅单晶生长提供了理论依据.

关键词: 液态汞; 粘度; 回转振荡法; 水平磁场; 磁场强度

PACC: 5120; 5275F; 6125

中图分类号: O657. 91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)09-1768-05

1 引言

硅单晶向大直径发展,投料量急剧增加,导致硅熔体的热对流加剧.为了抑制硅熔体中的有害热流动,通常要在熔体中引入磁场,磁场直拉硅技术已成为制造大直径单晶硅的常用手段^[1~3].由于导电熔体在磁场中运动时会受到洛仑兹力的阻滞作用,熔体的热对流^[2,3]受到抑制,因此,研究硅熔体与磁场的相互作用就显得十分重要.但由于硅单晶材料的熔点高,高温时硅熔体化学性质活泼,因此,对硅熔体的研究必须在高温高真空(或高纯惰性气体环境)的条件下进行,相关的硅熔体物性的测量已经取得了很多的成果^[4~6].但是,如果在硅熔体中引入磁场,进行磁场中硅熔体性能的研究,实验室实现的难度就非常大.所以,关于磁场直拉硅单晶生长过程中硅熔体与磁场相互作用的实验研究还未见报道,相应的磁场直拉硅技术中磁场对硅熔体的影响机理也一直没有得到实验验证.在此情况下,利用性能与硅熔体相近的液态材料,进行模拟磁场直拉硅晶体生长条件的研究工作,寻找相应的理论依据,就显得非常必要.

液态汞在 20 时的电阻率为 $9.7 \cdot \text{m}$,硅熔体在熔点附近的电阻率为 $8.1 \cdot \text{m}^{[7]}$,二者的电阻率比较接近.本文选择液态单质金属汞作为模拟研究

对象,使用可调的水平永磁磁场^[8]开展模拟研究工作,得到的结果可以说明一些磁场硅单晶生长的关键问题.

本文测量了液态汞(20)在磁场中粘度的变化情况,分析研究了磁场对液态汞的作用机理,为磁场直拉硅单晶生长提供了理论基础.

2 实验

2.1 实验装置

使用日本东京株式会社生产的高温低粘度测定装置(回转振荡法)^[4,5]对粘度进行测量;磁场采用永磁材料制作的由内外环磁场构成的能够提供连续可调节的水平均匀磁场的环形磁场,磁场强度在 0.003 ~ 0.276 T 范围内连续可调;使用不导电的悬吊式氧化铝坩埚.具体实验装置见图 1.

悬吊式氧化铝坩埚是我们特别设计应用于此种高温低粘度测定装置,且能在磁场中使用的坩埚,其内径为 29mm.高纯氧化铝在 1000 时电阻率为 $1 \times 10^8 \cdot \text{m}$,温度升高,电阻率有一定程度的降低,但在低于 1500 的温度范围内,高纯氧化铝仍然是绝缘材料.这避免了由于坩埚存在磁粘滞效应时对粘度测量的影响.

坩埚的悬吊材料和坩埚杆,主要是保证坩埚处

^{*}河北省自然科学基金(批准号:503054),教育部科学技术研究(批准号:205017),国家自然科学基金(批准号:50372016)资助项目

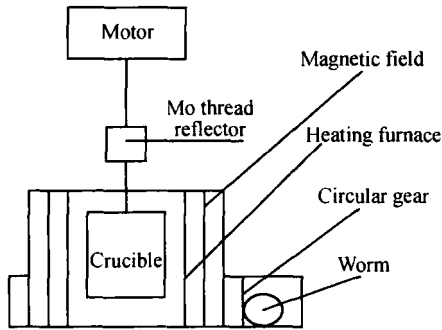


图 1 粘度测量装置示意图
Fig. 1 Sketch map of measure equipment

于合适的测量位置. 悬吊材料还担负着测量信号输出的任务. 坩埚杆的另一个作用是使处于磁场中的运动件不受磁粘滞效应的影响.

由于进行粘度测量时, 坩埚进行的是回转运动, 在坩埚内壁处, 待测液体的流动状态和硅单晶生长过程中坩转及晶转带动的硅熔体的流动状态相似^[1-3], 所以, 我们认为粘度测量时, 可以用被测液体的流动模拟大直径硅单晶生长过程中硅熔体的流动.

2.2 实验方法及过程

将液态汞装入氧化铝坩埚中, 连接坩埚和坩埚上盖, 再将坩埚盖上的坩埚杆与粘度测量仪器的悬吊系统连接起来. 然后将坩埚伸入到水平磁场中, 按照磁场强度由弱到强然后由强到弱的顺序进行粘度的测量, 每个测量点取三个数据. 将磁场调节到新的磁场强度位置后, 立即进行粘度的测量. 测量时的温度为室温 20 .

整个实验过程中, 由于是在 20 的条件下进行的, 液态汞在 20 的蒸气压约为 1.6Pa, 并且是被封闭在坩埚中的, 因此, 在整个实验过程中, 可以忽略汞蒸发的问题, 认为对实验结果也没有影响.

3 结果与讨论

在不同的磁场条件下, 测量了液态汞的粘度, 结果见表 1. 可以发现, 用本套粘度测量装置测得的液态汞的粘度是非常精确的, 液态汞的粘度随着外加磁场强度的增大而增大, 并且有一定的规律性.

由于液态汞是抗磁材料, 并且在进行粘度测量时, 使用的汞的量较少, 坩埚的空间尺寸也很小(直径小于 30mm), 因此, 可以忽略磁场在汞中的衰减,

认为汞所在处的磁场强度等于汞中的磁场强度.

表 1 液态汞在磁场中的粘度

Table 1 Viscosity of liquid Hg in the horizontal magnetic field

| Magnetic field strength / 10^{-4} T | Viscosity / (mPa · s) | Viscosity / (mPa · s) | Viscosity / (mPa · s) | Average viscosity / (mPa · s) |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 30 | 1.535 | 1.591 | 1.600 | 1.575 |
| 220 | 1.629 | 1.660 | 1.646 | 1.645 |
| 450 | 1.798 | 1.783 | 1.809 | 1.797 |
| 680 | 2.046 | 2.054 | 2.039 | 2.046 |
| 910 | 2.438 | 2.442 | 2.440 | 2.440 |
| 1130 | 2.950 | 2.953 | 2.955 | 2.953 |
| 1330 | 3.574 | 3.561 | 3.561 | 3.565 |
| 1530 | 4.252 | 4.268 | 4.262 | 4.261 |
| 1530 | 4.261 | 4.266 | 4.259 | 4.262 |
| 1330 | 3.557 | 3.552 | 3.567 | 3.559 |
| 1130 | 2.939 | 2.947 | 2.950 | 2.945 |
| 910 | 2.430 | 2.428 | 2.427 | 2.429 |
| 680 | 2.025 | 2.029 | 2.033 | 2.029 |
| 450 | 1.764 | 1.768 | 1.766 | 1.766 |
| 220 | 1.623 | 1.616 | 1.610 | 1.616 |
| 30 | 1.569 | 1.584 | 1.578 | 1.577 |

3.1 磁场的响应时间

测量液态汞的粘度时, 首先将磁场调节到需要的强度, 然后立即进行粘度的测量. 每个测试点至少要测量三个数据, 在数据没有较大偏差的情况下, 才能进行下一个点的测试, 每个数据点需要的测试时间约为 5min. 在这种情况下, 液态汞粘度的数据重复性非常好, 见表 1. 最大的粘度偏差值出现在磁场强度为 0.022T 时, 粘度值为 2.412mPa · s 和 2.457mPa · s, 相差仅为 0.045mPa · s, 与粘度平均值相比, 偏差为 1.8%, 大大小于粘度测量仪器的系统偏差 $\pm 3\%$. 因此, 可以认为, 磁场对液态汞的作用, 是在极短的时间内就完成的.

3.2 粘度与磁场强度的关系

由表 1 可以发现, 液态汞的粘度随磁场强度的增大而增大. 但是, 当磁场变化方式不同时, 即当磁场由弱到强变化和磁场由强到弱变化时, 同样的磁场强度下, 汞的粘度有一些差别, 弱磁场的条件下较为明显. 例如, 当磁场强度为 0.022T 时, 磁场由弱到强变化, 粘度为 1.645mPa · s, 而磁场由强到弱变化, 粘度为 1.616mPa · s, 偏差为 1.76%. 考虑磁场强度的改变是手动调节进行的, 这一偏差估计是由磁场强度的调节偏差造成的.

对表 1 中的数据进行数学拟合运算得到如下表达式:

$$\eta = \eta_0 + aB^2 \quad (1)$$

式中 η 为流体在磁场中的粘度; B 为磁场强度; η_0 为无磁场时流体的粘度; a 为与流体性能有关的常量.

可以由(1)式计算出汞在不同磁场中的粘度,其中 $\eta_0 = 1.575 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 为无磁场时汞的粘度, $a = 115$ 为与汞的性能有关的常量. 计算结果和实验数据(按磁场强度由弱到强的顺序测量)基本符合,见表 2.

表 2 粘度的计算值和测量值

Table 2 Calculated and experimental viscosity for the liquid Hg

| Magnetic field strength/ 10^{-4} T | Viscosity/ $(\text{mPa} \cdot \text{s})$ | |
|--|--|------------|
| | Experimental | Calculated |
| 30 | 1.575 | 1.576 |
| 220 | 1.645 | 1.631 |
| 450 | 1.797 | 1.808 |
| 680 | 2.046 | 2.107 |
| 910 | 2.440 | 2.527 |
| 1130 | 2.953 | 3.043 |
| 1330 | 3.565 | 3.609 |
| 1530 | 4.261 | 4.267 |

3.3 粘度随磁场强度的变化及机理

3.3.1 磁场粘度计算式的理论解析

当固态导电材料在磁场中运动时(运动方向不严格平行于磁力线的方向),固态导电材料的运动会受到磁粘滞效应的阻滞,即此时固态导电材料的运动和在具有一定粘度液体中的运动相似,此时等效的磁粘滞系数和固态导电材料的电导率、磁导率呈线性关系,与外加磁场的强度呈抛物线关系,即

$$\eta = A \mu B^2 / \sigma \quad (2)$$

(2)式和有效动力粘滞系数的表达式(3)非常相似^[9]

$$\eta_{\text{eff}} = (\mu B b)^2 / \sigma \quad (3)$$

式中 η_{eff} 为有效磁运动粘滞系数; σ 为电导率; μ 为磁导率; B 为磁感应强度; b 为特征长度; ρ 为密度.

将 3.2 中得到的粘度计算式(1)与(2)、(3)式相比较,我们得到的粘度计算式可以解释为:存在外加磁场的条件下,汞的粘度为汞的固有粘度与磁场作用产生的磁粘滞效应的叠加,而且磁场对液态导电材料的影响和对固态导电材料的影响是相似的.

3.3.2 磁场导致液态汞粘度增加的机理

汞在常温下是导电液体,根据 Ioffe 和 Rogel 的理论^[10],液态汞是由正负离子构成的,又由于汞是液态金属,因此可以认为,液态汞是由带一定正电荷的 Hg^{x+} 沉浸在电子气中构成的.由于 Hg^{x+} 的质量远远大于电子的质量,所以,液态汞的流动,可以看成是 Hg^{x+} 即带电粒子的流动.因此,根据带电粒子在磁场中的运动,来解释液态汞在磁场中粘度的变化是合理的.

采用回转振荡法测量液态汞的粘度时,坩埚的回转运动带动坩埚中的液态汞进行的是环绕坩埚中轴的回转运动,相当于 Hg^{x+} 在水平磁场中做环绕坩埚中轴的回转运动^[11].根据带电粒子在磁场中运动的规律可以得知,液态汞环绕坩埚中轴的回转运动,等同于 Hg^{x+} 做垂直于外加水平磁场的运动,运动的 Hg^{x+} 受磁场的作用,运动状态发生了改变,变成了与原回转运动垂直的运动.这种运动干扰了原来的环绕坩埚中轴的回转运动,增加了液态汞中发生湍流的几率,使处于层流状态的环绕坩埚中轴的回转运动的阻力增加,等效于增加了液态汞与坩埚内壁的摩擦力,使坩埚更快地停止转动,表现为液态汞粘度的增加.当外加水平磁场的强度增加时,这一干扰加强,液态汞与坩埚内壁的摩擦加剧,坩埚会更快地停止转动,表现为粘度的进一步增加.

3.4 在磁场直拉硅单晶生长中的拓展

由于高温硅熔体的导电性能与液态汞的导电性能相近,硅熔体的流动状态和受力状态^[1~3]与汞粘度测量时汞的流动状态相似(尤其是在坩埚内壁处的流动状态相似),因此,可以将液态汞在磁场中行为的解释推广到磁场直拉硅熔体中,用于描述磁场直拉硅技术中磁场对硅熔体的作用,从而预测磁场直拉硅技术中硅熔体粘度的变化趋势、磁场强度和方向对硅熔体的作用过程等.

根据汞在磁场中的变化可以认为,硅熔体中也存在带电的硅粒子,硅熔体的流动同样是带电硅粒子的流动,外加磁场对硅熔体中液流的作用,实际上是磁场对运动的带电硅粒子的作用.因此,可以推论,(1)在磁场直拉硅技术中,硅熔体的粘度会由于外加磁场的方向和强度的不同而发生变化,粘度变化的原因,不是硅熔体本质的改变造成的,而是硅熔体的流动状态被磁场改变而造成的;(2)根据磁场对液流的影响,可以认为,水平磁场增加了硅熔体中的有害热对流,不利于晶体的生长,但有利于杂质的扩

散和均匀分布,对晶体电性能的改善非常有益.

4 结论

通过以上研究和讨论,得到如下的结论:

(1) 液态汞(20)在磁场中的粘度随着外加水平磁场强度的增加而增加,二者呈光滑的抛物线关系,并可以用 $\eta = \eta_0 + aB^2$ 来表达. 由此式计算出的结果和实验结果完全符合.

(2) 液态汞在磁场中粘度增加的机理是:液态汞的流动实际上是带正电荷的 Hg^{x+} 的流动, Hg^{x+} 在磁场中流动时会受到磁场的作用,运动状态发生改变,这干扰了粘度测量时正常的汞的流动状态,使液态汞之间及液态汞与坩埚内壁间的阻力增大,从而表现为液态汞粘度的增加.

(3) 液态汞粘度的增加,与磁场强度的平方成比例关系,这和磁场对固态导电物质的磁粘滞效应是相似的.

(4) 将相应的结论应用到磁场直拉硅技术中,为磁场直拉硅技术提供理论依据.

参考文献

- [1] Zhang Guohu, Wu Zhiqiang, Fang Feng, et al. 300mm crystal silicon's growth technology. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(3):383 (in Chinese) [张果虎,吴志强,方锋等. 300mm 硅单晶的生长技术. 半导体学报, 2001, 22(3):383]
- [2] Zhang Weilian, Sun Junsheng, Zhang Enhuai, et al. Monocrystalline silicon and Ge-doped Si growth with ring permanent magnetic field. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(3):309 (in Chinese) [张维连,孙军生,张恩怀,等. 利用环形装置永磁场的直拉炉 (PMCZ) 生长单晶硅和掺锗硅单晶. 半导体学报, 2001, 22(3):309]
- [3] Han Yujie, Sun Tongnian. One introduce for the magnetic field Czochralski. Semiconductors Information, 1989, 1:25 (in Chinese) [韩玉杰,孙同年. 磁场拉晶技术简介. 半导体情报, 1989, 1:25]
- [4] Sato Y, Kameda Y, Nagasawa T, et al. Viscosity of molten silicon and the factors affecting measurement. J Cryst Growth, 2003, 249(3/4):404
- [5] Sasaki H, Tokizaki E, Huang X M, et al. Temperature dependence of the viscosity of molten silicon measured by the oscillating cup method. Jpn J Appl Phys, 1995, 34:3432
- [6] Lin Bochuan, Li Chao, Ban Heng, et al. Theory and simulation of a novel viscosity measurement method for high temperature semiconductor melt. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED, 2002, 258:749
- [7] Shimoji M. Liquid metals. Beijing: Science Press, 1987:137 [下地光雄. 液态金属. 北京: 科学出版社, 1987:137]
- [8] Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt materials. Nucl Instrum Methods, 1980, 169:1
- [9] Xu Yuesheng, Liu Caichi, Li Yangxian, et al. Growth of semiconductor crystals under the equivalent micro-gravity. Micro-electronic Engineering, 2003, 66:542
- [10] Ioffe A F, Regel A R. Progress in semiconductors. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1960, 4:237
- [11] Zhou Benmuo, Fang Baochun, Cheng Zhihua, et al. Investigation of the flow field structure controlling around a circular cylinder by means of electromagnetic forces. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2004, 18(1):10 (in Chinese) [周本谋, 范宝春, 陈志华, 等. 电磁力连续控制圆柱绕流态变化的研究. 流体力学实验与测量, 2004, 18(1):10]

Viscosity of Liquid Conductor in Horizontal Magnetic Field *

Zhang Wen , Liu Caichi , and Wang Haiyun

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

Abstracts : The viscosity of liquid Hg is studied in the horizontal permanent magnets magnetic field at 20 using the oscillating cup method. Experimental results show that the viscosity of the liquid Hg increases with the increase of magnetic field strength. The relationship of viscosity and magnetic field strength is parabolic. The viscosity increase of Hg in the magnetic field is similar to that of the solid conductor. The change in viscosity can be explained by the effect of magnetic field on the charged particles. These experimental results provide theoretical foundation for the growth of CZSi in the magnetic field.

Key words : liquid state Hg ; viscosity ; oscillating cup method ; horizontal permanent magnets magnetic field ; magnetic field strength

PACC : 5120 ; 5275F ; 6125

Article ID : 0253-4177(2005)09-1768-05

* Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. 503054) ,the Key Project of Chinese Ministry of Education (No. 205017) ,and the National Natural Science Foundation of China (No. 50372016)

Received 24 January 2005 ,revised manuscript received 4 March 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics