DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2019.02.024

# 磁场作用下硅晶体生长的应用研究现状

饶森林<sup>1,2</sup>,张发云<sup>1,2</sup>,罗玉峰<sup>3,4</sup>,熊含梦<sup>2</sup>,李云明<sup>1,2</sup>,胡云<sup>1,2</sup>,章娟<sup>1</sup>

(1.新余学院 新能源科学与工程学院,江西 新余 338004;2.江西省高等学校硅材料重点实验室,江西 新余 338004;3.南 昌大学 机电工程学院,江西 南昌 330031;4.华东交通大学,江西 南昌 330031)

摘 要:针对静态磁场和非静态磁场在硅晶体生长中的应用研究现状,综述了磁场对硅晶体生长过程中熔体流动、 固液界面形态、杂质含量及分布的影响,重点对比分析了静态磁场与非静态磁场的特点。总结了该应用当前存在的问题,并对未来的技术发展进行了展望。

关键词:磁场;晶体硅;固液界面;熔体流动

中图分类号: TN304

文章编号:1000-8365(2019)02-0229-06

# Application and Research Status on Silicon Crystal Growth Under Magnetic Field

文献标识码:A

RAO Senlin<sup>1,2</sup>, ZHANG Fayun<sup>1,2</sup>, LUO Yufeng<sup>3,4</sup>, XIONG Hanmeng<sup>2</sup>, LI Yunming<sup>1,2</sup> HU Yun<sup>1,2</sup>, ZHANG Juan<sup>1</sup>

(1. School of New Energy Science and Engineering, Xinyu College, Xinyu 338004, China; 2. Key Laboratory of University in Jiangxi for Silicon Materials, Xinyu 338004, China; 3. School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 4. East China Jiaotong University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In view of the application of static and non-static magnetic fields on the growth of silicon crystals, the effects of magnetic field on melt flow, solid-liquid interface morphology, impurity content and distribution in the process of silicon crystal growth are covered. The characteristics of static and non-static magnetic fields were emphatically compared and analyzed. The existing problems in the application were summarized, and the development trends in this field were prospected.

Key words: magnetic field; silicon crystal; solid liquid interface; melt flowing

晶体硅太阳电池由于转换效率高、工艺稳定而 被广泛应用。然而在硅晶体生长过程中,熔体流动 的影响至关重要。若熔体流动过快,一方面,会加剧 对坩埚内壁面的冲刷,导致坩埚内壁面的杂质粒子 快速进入熔体内部,如果杂质在熔体内部分布不均 匀或未能及时排除,将影响硅晶体内的杂质含量及 分布;另一方面,还会造成固液界面的波动,从而影 响硅晶体生长过程中的固液界面形态,进而降低晶

- 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51664047);江西省高等 学校科技落地计划面上项目(KJLD12050);江西省科技 支撑计划面上项目(20123BBE50116);江西省教育厅 科学技术研究项目(GJJ161200、GJJ161199)
- 作者简介: 饶森林(1988-), 江西东乡人, 硕士, 讲师. 研究方向: 硅晶体定向生长的仿真模拟. 电话: 13979009204, E-mail:rsl0124@163.com

通讯作者:张发云(1967-),江西吉安人,博士,教授,硕士生导师. 研究方向:为硅晶体生长工艺的研发. E-mail:zfyabc@126.com 体硅太阳电池的质量和光电转换效率。磁场辅助硅 晶体生长技术是控制硅熔体中热对流的一种有效方 法。在 20 世纪 80 年代初,日本首次把横向和轴向磁 场技术运用在单晶硅的制备上,该项技术也在 20 世 纪 80 年代中期在国内开始介绍流传,不久就有了 国内学者的实验研究报道<sup>[1]</sup>,2000 年后又有河北工 业大学学者提供了相关实验研究报道。近年来这 方面的研究也陆续增多,磁场辅助应用从单晶硅晶 体生长到多晶硅生长,从模拟计算到实验研究,多种 不同类型的磁场辅助应用也相继被研究,本文将介 绍磁场对硅晶体生长过程中熔体流动、固液界面 形态、杂质含量及分布的影响,并对未来的技术发 展进行展望。

## 1 磁场的类型及作用原理

目前,磁场在晶体硅生长中的应用研究可以分为:静态磁场、非静态磁场两大类。静态磁场是指磁 场方向与大小均保持不变的磁场,包括轴向磁场、横 向磁场及勾型磁场等;非静态磁场是指磁场大小、方

收稿日期:2018-08-07

向或者两者均随着时间的变化而产生变化的磁场。 与静态磁场相比,非静态磁场的应用更为广泛,且 在多晶硅晶体生长中应用较多,包括行波磁场、交 变磁场、旋转磁场及复合电场磁场等。硅熔体的热 对流和流速主要取决于磁场产生的洛伦兹力,因此 磁场在硅晶体生长中的作用原理主要有两种:一是 通过影响硅熔体运动来影响晶体硅的长晶过程及 晶体结构;二是通过对杂质运动产生作用来影响杂 质在晶体硅中的分布。晶体硅生长过程中硅熔体界 面处存在较厚滞流层,杂质运动从对流搅拌为主变 为受扩散动力学支配,使熔体冲刷坩埚内壁后发生 的石英溶解速度以及将溶解氧带入熔体和固液界 处的速度降低。

# 2 静态磁场的应用

#### 2.1 轴向磁场

轴向磁场的磁通密度如图 1(a),因此有时又称 为纵向或垂直磁场。根据左手法则,硅熔体受到的 洛伦兹力如图 1(b),由图可见,轴向磁场主要可以抑 制水平方向的熔体流动和固液界面形态,提高硅熔 体的粘滞性。

Cen 等<sup>12</sup>模拟了轴向磁场下单晶硅生长,发现磁 场产生的洛伦兹力主要为水平方向,因此水平流动 会被抑制,此外还会影响熔体的固液界面。Vizman 等<sup>13</sup>模拟也发现,可以通过控制磁场强度来调节熔 体的固液界面。Peng 等<sup>14</sup>采用数值模拟的方法,研究 了常规重力条件下熔体内部的热毛细-浮力对流。

结果表明,轴向磁场能够有效地抑制熔体内部的流 动和温度波动。为了进一步研究磁场对热毛细-浮力 的影响,饶朏等5对轴向磁场作用下的热毛细对流 现象进行了研究,结果发现,轴向磁场对熔体内的 热毛细对流抑制作用要优于横向磁场,但在抑制 浮力对流方面要差于横向磁场。李友荣等阿研究了 轴向磁场对硅单晶生长的影响,结果表明,随着 磁场强度的增加,固液界面平均氧浓度会下降。 罗玉峰等四在多晶硅数值仿真过程中加入亥姆霍茨 (Helmholtz)线圈产生的轴向磁场,获得了轴向磁场 下多晶硅定向生长阶段的温度场和流场分布。从图 2可知,施加轴向磁场后熔体的热对流受到了抑制, 使得等温线变得更为平坦,可使凸形的固液界面向 平面状过渡。刘志辉等18通过实验和模拟的手段,结 果表明加入 0.1T 的轴向磁场后,获得了较平坦的熔 体固液界面。目前,虽然轴线磁场作用于硅晶体生长 的研究不仅有模拟研究还有实验研究,但大多处于 0.1T 数量级别以下,作用机理也有待于研究。

#### 2.2 横向磁场

横向磁场的磁通密度如图 3(a)所示,因此又叫 水平磁场。熔体受到的洛伦兹力如图 3(b)所示,由图 可知,横向磁场可以使得竖直或纵向方向上的熔体 流动受到抑制,减小温度的波动。

Chen 等<sup>[9]</sup>在单晶硅模拟时加入不同强度的磁场 后发现,在高强度磁场下,所有的涡流都会消失,但 流动方向会随着磁场强度的变化而发生变化。研究 还表明,在磁场的影响下,相同处的温度会在一个小





图 2 轴向磁场下多晶硅结晶阶段的温度场分布

Fig.2 Distribution of temperature field in polycrystalline silicon during axial magnetic field





(b)洛伦兹力分布

图 3 横向磁场的磁感线及洛伦兹力分布 Fig.3 Magnetic induction line and Lorenz force distribution in transverse magnetic field

范围内波动。Tanasie 等<sup>[10]</sup>对多晶硅铸锭过程模拟得 出,当加入 B=0.2T 的横向磁场时可以显著地抑制 熔体流动。为了进一步研究横向磁场的影响,研究 还发现,横向磁场可以减小固液界面的变形,但与 轴向磁场相比,加入横向磁场的界面形状则稍微不 对称,这是由于熔体流动中的非对称流动模式造成 的。Liu 等四采用模拟的方法研究表明,在磁场 0.2T 的横向磁场影响下,更高的拉晶速率可以获得更加 均匀和平直的固液界面。横向磁场不仅会对熔体的 流动和固液界面产生影响,还能影响熔体中氧的分 布, Collet 等[12]通过模拟发现, 晶体硅中的氧浓度对 横向磁场非常敏感,在0.5T的磁场强度下,坩埚和 晶体的旋转与没有旋转的情况下相比会产生明显 的影响。Kakimoto等[13]模拟研究发现,横向磁场对 点缺陷(如空位和间隙原子)的形成有重要的影响。 目前,横向磁场主要集中在模拟研究,实验研究还 很少见,这可能与炉子本身的结构有关。

#### 2.3 勾型磁场

轴向磁场和横向磁场的磁感线都是单一方向, 它们仅对与磁感线方向垂直或成一定角度的熔体 起抑制作用,对与磁感线平行的熔体不起任何抑制 作用,而勾形磁场可以同时产生轴向和径向方向的 磁场分量,所以又称为尖角磁场,如图 4(a)。从图中 还可以发现,勾形磁场的磁感线分布是以线圈中心 轴线及中心面上下对称的非均匀磁场。因此勾形磁 场对轴向和径向方向的熔体均有抑制作用,如图4 (b)。从图 4 中还可以发现, 勾形磁场在晶体生长界 面处为横向磁场,而在熔体内部主要为轴向磁场。

邹勇等[14]在微重力环境下区熔法硅单晶生长中 发现,轴向磁场可有效抑制熔体的径向流动,但难



以有效抑制轴向对流,而勾型磁场则可以达到更好 的控制熔体对流的效果。罗玉峰等155模拟研究发现, 当施加于熔体上的磁场逐渐增加时,熔体的最高流 速会逐渐减小。Wang 等<sup>[16]</sup>在模拟单晶硅生长时发 现,当线圈和自由界面的距离为 0.35 mm 时,固液界 面处氧的浓度为最小值,研究还发现,在勾型磁场作 用下的固液界面比较平滑,但其中心区域较无磁场 时整体向 z 轴正向偏移,这样利于高质量晶体的生 长。常麟等<sup>[17]</sup>对单晶硅模拟和实验时也发现,随着通 电线圈距离和半径的增大,熔体固液界面的氧浓度 会逐渐降低。总体而言,勾形磁场对熔体流动的效果 更加明显,可以通过调节磁场与自由界面的位置来 改变磁场在熔体中的分布,进而控制熔体流动和固 液界面波动,但是理论分析还不够完善,有待进一步 的深入研究。

综上所述,静态磁场在单晶硅晶体生长中应用 更为广泛,而在多晶硅上应用较少,且大多主要集中 在模拟研究上,实验开展和作用机理的研究还不够。 以上三种磁场都可以抑制熔体的流动, 控制氧的浓 度,调节固液界面等,但轴向磁场可以更好地控制熔 体内的热毛细对流和固液界面形态,横向磁场可以 使点缺陷达到最小,而勾型磁场则能够更好地控制 氧浓度和熔体对流。

#### 非静态磁场的应用 3

### 3.1 行波磁场

行波磁场使硅熔体产生对称的子午线方向的洛 伦兹力场,如图5所示,行波磁场可同时产生径向分 量 Br 和轴向分量 Bz, 洛仑兹力的大小主要取决于 径向的磁场强度 Br。如图 5(b)所示,当行波磁场引





(a)磁感线分布 图 4 勾形磁场的磁感线及洛伦兹力分布 Fig.4 Magnetic induction line and Lorenz force distribution in cusp magnetic field



(a)工作原理图



图 5 行波磁场示意图

# Fig.5 Schematic diagram of traveling magnetic field

起的洛仑兹力方向向上时,硅熔体中将产生一个对称的向上的子午线流;当引起的洛仑兹力方向向下时,硅熔体中会产生一个对称的向下的子午线流<sup>[18]</sup>。 行波磁场也是通过洛伦兹力对熔体产生抑制 作用。

Kiessling 等<sup>[19]</sup>实验研究发现,行波磁场能够减 少多晶硅铸锭过程中扩散边界层的厚度,还能调节 固液界面的形状和形态。Yu<sup>[20]</sup>等发现,与未加磁场 相比,行波磁场对多晶硅定向凝固阶段的熔体流动 模式和热场有显著的影响,向上的行波磁场强化了 热浮力作用,易使固液界面下凹;但是向下的磁场 削弱了热浮力,使得固液界面有上凸。因此,可以通 过调节磁场的参数使界面变得平缓或微凸。Vizman 等[21]对多晶硅生长过程模拟发现,低的温度梯度能 降低熔体流动对固液界面形状的影响,加入行波磁 场后会产生洛伦兹力,洛伦兹力对熔体对流的影响 占主导地位。Kader 等<sup>[22]</sup>运用新的布里奇曼法来研 究晶体硅的生长过程,研究发现,行波磁场的加入 可以控制熔体的对流,从而使得熔体中的金属元素 均匀化或分离,这样可以增加杂质对熔体的偏析。 Cablea 等<sup>[2]</sup>采用模拟加实验的方法研究也发现,在 多晶硅定向凝固过程中,行波磁场可提高熔体对杂 质的分凝能力。Tomzig 等[24]研究表明,在晶体硅生 长过程,行波磁场的加入会改变硅锭中轴向氧浓度 的含量,磁场方向不同,氧浓度的含量大小也不同。 Dadzis 等<sup>[25]</sup>采用三维模拟发现,在没有熔体流动和 平滑的固液界面中,最大的碳浓度位于界面处。目 前,行波磁场开始应用于硅晶体生长,而行波磁场 本身对硅晶体生长过程的影响是一个较为复杂的 过程,有待于进一步深入研究。

#### 3.2 交变磁场

交变磁场是指大小和方法都随时间变化的磁场。交变磁场最早应用于金属"悬浮融熔",主要集中于交变磁场下的熔体流动、固液界面的波动,而 在硅晶体生长中的应用较少。最近,Chen等<sup>[26]</sup>研究 发现,加入交变磁场后,熔体中间区域的电磁力由 熔体外部指向内部,底部和顶部区域由内部指向外 部,电磁力先增大,达到顶峰时随磁通密度的变化而 减小。熔体流速先随着电磁力的增加而增加,之后逐 渐减小并趋近于一个稳定状态。冯孝燕等四利用模 拟软件得出多晶硅熔体边角处的电磁力最大, 越往 中间越小。而较强的电磁力作用于液面四角,引起了 液面的波动。通过实验研究表明,硅锭外表面的四个 角点出现了隆起结构,从而验证了模拟结果。Dropka 等[28]研究表明交变磁场可以使熔体的循环更加均匀 化,熔体的流动足够把溶解的杂质析出,从而达到除 杂目的和减少硅锭中缺陷的目的。Cablea 等<sup>[29]</sup>在多 晶硅铸锭过程中添加磁场时发现,交变磁场改变了 扩散层中金属原子的传输机理,减少了硅熔体中扩 散层的厚度,从而增强了杂质的分凝效应。Liu 等[30] 证明了交变磁场可以将铸锭过程中 99%的金属杂 质去除,尤其是铁杂质,能够降到 0.05×10<sup>4%</sup>以下, 其搅拌过程如图 6 所示。



图 6 交变磁场下硅熔体中的流场分布 Fig.6 Flow field distribution in silicon melt under alternating magnetic field

#### 3.3 旋转磁场

图 7 为旋转磁场的磁力线俯视图<sup>[43]</sup>。旋转磁场 的产生原理与行波磁场是相同的,行波磁场也是根 据三相异步电机改变而来的,如图 8 所示。在旋转磁 场作用下,硅熔体可以产生和磁场方向一致的旋转 运动。在硅晶体生长过程中添加旋转磁场的主要目 的是用来搅拌熔体和调节固液界面。

Kakimoto<sup>[31]</sup>发现 Cz 法中旋转磁场是一种具有



图 7 旋转磁场磁力线俯视图 Fig.7 Magnetic field line overlook diagram of rotating magnetic field



图 8 行波磁场发生器示意图 Fig.8 A schematic diagram of a traveling magnetic field generator

发展前景的控制流动的方法,当磁通密度和频率增加时,熔体的流动模式会发生改变。Dropka等<sup>[32]</sup>通过对多晶硅定向生长模拟得到,旋转磁场产生的洛伦兹力密度与行波磁场产生的密度有很大差异,电磁力在中心熔体区域存在最大值。因为太强的磁场强度会对中心的熔融区会带来杂质富集的危险。 Popescu等<sup>[33]</sup>对多晶硅定向凝固过程进行三维模拟发现,旋转磁场可以增强熔体的对流,来减少杂质向坩埚中心聚集,从而实现了熔体中杂质的均匀化。Dold等<sup>[34]</sup>在Fz法的实验中发现,毛细驱动对流基本上是被磁场控制着,在磁场作用下掺杂剂浓度的波动减少,固液界面形状稍微平坦但效果不明显。在模拟中,磁场诱导了高方位流动,最大流速出现在自由熔体表面。

#### 3.4 复合电场磁场

不论静态磁场还是非静态磁场,在晶体生长过 程中都只采用了单一的磁场方式,其作用有一定的 局限性,难于满足晶体生长的需要。为了更好地控 制硅熔体,有些研究者对两种或两种以上的复合磁 场进行了研究,目前研究较多的为复合电场磁场和 双频磁场。Wang等<sup>[35]</sup>采用复合电场磁场生长单晶硅 时研究发现,电场与轴向或勾形磁场的结合可以有 效地控制熔体的流动。Tanasie等<sup>[10]</sup>研究也发现,轴 向磁场和电场的结合,对熔体的流动、固液界面的 形状和翘曲度都有一定的潜在控制作用。Vizman 等<sup>13</sup>研究了电场磁场结合的方法对多晶硅定向生长 的影响时发现,低的电流值对硅熔体的搅拌和固液 界面形状有利,但电流值过高容易增加固液界面的 翘曲度,并出现w型的固液界面,因此不利于提高 硅晶体的质量。Dropka等<sup>136</sup>对双频磁场进行了研 究,结果表明,当采用高频(600 Hz)和低频(20 Hz) 的旋转磁场进行结合作用时,坩埚壁位置的熔体流 动较小而中心区域较大。

综上所述,与静态磁场相比,非静态磁场在硅晶体生长过程中的应用还较少,理论研究还不够,以上几类非静态磁场对硅熔体的流场、杂质分布和固液界面等有一定的控制和调节作用,其中交变磁场可以有效减小扩散边界层的厚度,增强杂质的分凝效应,但强度不能太大;向上的行波磁场强化了热浮力作用,易使固液界面下凹;但是向下的磁场削弱了热浮力,使得固液界面有上凸;旋转磁场对界面的影响不是很明显。

虽然复合电场磁场在晶体硅中的应用研究还不 够,如何选择合适的电场磁场组合还有待进一步研 究,但由于复合电场磁场结合了不同电场和磁场的 优势,相信将来复合电场磁场在晶体硅生长中的应 用会越来越多,各种更加复杂和更加合理的复合电 场磁场也会不断出现。

# 4 结束语

磁场在晶体硅中已经得到了较多的应用,并且 取得了一系列研究进展和科研成果。在晶体硅生长 过程中,磁场的加入会对硅熔体产生很多影响,如抑 制熔体的对流、调节固液界面形态、控制熔体中的杂质 含量等。磁场辅助晶体硅生长研究从 20 世纪 80 年代 就已经开始,但是近期研究中一些显著的效果大都局 限在模拟计算中,实验研究的力度还有待加强,尤其是 磁场的作用机理、磁场在多晶硅生长中的应用、磁场对 硅晶体生长过程中应力的影响研究还较少,仍需进一 步的发展和研究,为工业化生产制备出高质量硅晶体 做好铺垫。不论静态磁场还是非静态磁场,在晶体生长 过程中都只采用了单一的磁场方式,其作用有一定的 局限性,难于满足晶体生长的需要,而复合电场磁场结 合了不同电场和磁场的优势,相信将来复合电场磁场 在晶体硅生长中的应用会越来越多,各种更加复杂和 更加合理的复合电场磁场也会不断出现。

#### 参考文献:

[1] 宋大有,褚祥康,周禧,等.纵向磁场拉制硅单晶的工艺研究[J].

上海有色金属,1988(3):18-20.

- [2] Cen X, Li Y S, Zhan J. Three dimensional simulation of melt flow in Czochralski crystal growth with steady magnetic fields[J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 340(1):135-141.
- [3] Vizman D, Tanasie C. Novel method for melt flow control in unidirectional solidification of multi-crystalline silicon [J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 372(2):1-8.
- [4] Peng L, Gong H. Effects of static magnetic fields on melt flow in detached solidification [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(3):936-943.
- [5] 饶朏,彭岚,张全壮. 轴向磁场对环形浅液池内硅熔体热毛细对 流的影响[J]. 人工晶体学报,2016,45(6):1465-1470,1476.
- [6] 李友荣,余长军,吴双应,等. 轴向磁场对硅单晶 Czochralski 生 长过程的影响[J]. 材料研究学报,2005(3):249-254.
- [7] 罗玉峰,袁文佳,张发云,等.轴向磁场下多晶硅铸造过程的仿 真模拟[J].铸造技术,2013,34(1):61-64.
- [8] 刘志辉,罗玉峰,饶森林,等.轴向磁场下多晶硅定向凝固研究
  [J].热加工工艺,2018,47(1):88-91,95.
- [9] Chen X, Zhan J M, Li Y S, et al. Large eddy simulation of industrial Czochralski Si crystal growth under transverse magnetic field[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 389(2):60-67.
- [10] Tanasie C, Vizman D, Friedrich J. Numerical study of the influence of different types of magnetic fields on the interface shape in directional solidification of multi-crystalline silicon ingots [J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 318(1): 293-297.
- [11] Liu L, Kakimoto K. Partly three-dimensional global modeling of a silicon Czochralski furnace. I. Principles, formulation and implementation of the model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(21-22): 4481-4491.
- [12] Collet Y, Magotte O, Van den Bogaert N, et al. Effective simulation of the effect of a transverse magnetic field (TMF) in Czochralski Silicon growth [J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 360: 18-24. [13] Kakimoto K, Gao B, Liu X, et al. Growth of semiconductor silicon crystals [C]// International Summer School on Crystal Growth. 2016:273-285.
- [14] 邹勇,张银,唐硕捷,等.微重力下静态磁场对浮区法硅单晶生 长的影响[J].人工晶体学报,2015,44(9):2343-2349.
- [15] 罗玉峰,刘杰,张发云,等.勾形磁场下多晶硅定向凝固模拟与 分析[J].人工晶体学报,2016,45(1):110-114,127.
- [16] Wang Y, Xu W, Dai X, et al. Numerical simulation of effects of cusp magnetic field on oxygen concentration of 300 mm CZ-Si[J]. Rare Metals, 2012, 31(5): 494-499.
- [17] 常麟,周旗钢,戴小林,等. CUSP 磁场对直拉硅单晶氧浓度分布 影响的数值模拟[J]. 稀有金属,2011,35(6):909-915.
- [18] 王雷,沈军,王灵水,等.行波磁场在晶体生长过程中的研究进 展[J].材料导报,2011,25(11):5-10.
- [19] Kiessling F M, Bü llesfeld F, Dropka N, et al. Characterization of mc-Si directionally solidified in travelling magnetic fields[J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 360(1):81-86.
- [20] Qinghua Yu, Lijun Liu, Zaoyang Li, Peng Su.Global simulations of heat transfer in directional solidification of multi-crystalline silicon ingots under a traveling magnetic field [J]. Journal of Crystal Growth, 401 (2014) 285-290.
- [21] Vizman D, Dadzis K, Friedrich J. Numerical parameter studies of

3D melt flow and interface shape for directional solidification of silicon in a traveling magnetic field [J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 381: 169-178.

- [22] Kader, Zaidat, Mircea, et al. Impact of the Travelling Magnetic Field on the Metallic Impurities During the Crystallization of Photovoltaic Silicon [J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2012, 156(s1):243-247.
- [23] Cablea M, Zaidat K, Gagnoud A, et al. Directional solidification of silicon under the influence of travelling magnetic field [J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 401(23):883-887.
- [24] Tomzig E, Virbulis J, Ammon W V, et al. Application of dynamic and combined magnetic fields in the 300mm silicon single-crystal growth[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2002, 5 (2):347-351.
- [25] Dadzis K, Vizman D, Friedrich J. Unsteady coupled 3D calculations of melt flow, interface shape, and species transport for directional solidification of silicon in a traveling magnetic field [J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 367(10):77-87.
- [26] Guo-Jun C, Yong-Jie Z, Yuan-Sheng Y. Modelling the unsteady melt flow under a pulsed magnetic field [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(12): 124703.
- [27] 冯孝燕,王琤,赵波,等.交变磁场中硅熔液的电磁力有限元分析[J].人工晶体学报,2013(8):1702-1706.
- [28] Dropka N, Frank-Rotsch C, Rudolph P. Comparison of stirring efficiency of various non-steady magnetic fields during unidirectional solidification of large silicon melts [J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 365(4):64-72.
- [29] Cablea M, Zaidat K, Gagnoud A, et al. Multi-crystalline silicon solidification under controlled forced convection[J]. Journal of Crystal Growth, 2015, 417(21):44-50.
- [30] Li P, Ren S, Jiang D, et al. Effect of alternating magnetic field on the removal of metal impurities in silicon ingot by directional solidification[J]. Journal of Crystal Growth, 2016, 437:14-19.
- [31] Kakimoto K. Effects of rotating magnetic fields on temperature and oxygen distributions in silicon melt [J]. Journal of Crystal Growth, 2002, s237-239:1785-1790.
- [32] Dropka N, Frank-Rotsch C, Rudolph P. Numerical study on stirring of large silicon melts by Carousel magnetic fields [J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 354(1):1-8.
- [33] Popescu A, Vizman D. Numerical study of the influence of melt convection on the crucible dissolution rate in a silicon directional solidification process [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2011, 54(25-26):5540-5544.
- [34] Dold P, Cröll A, Lichtensteiger M, et al. Floating zone growth of silicon in magnetic fields: IV. Rotating magnetic fields[J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 231(s1-2):95-106.
- [35] Wang W, Watanabe M, Hibiya T, et al. Three-Dimensional Simulation of Silicon Melt Flow in Electromagnetic Czochralski Crystal Growth [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2000, 39(2A): 372-377.
- [36] Dropka N, Miller W, Rehse U, et al. Numerical study on improved mixing in silicon melts by double-frequency TMF [J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 318(1):275-279.