

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.022

高频加热线圈台阶对区熔炉磁场的影响*

曹建伟,傅林坚,沈文杰,朱亮,张俊,石刚,欧阳鹏根,叶欣,邱敏秀
(浙江晶盛机电股份有限公司,浙江上虞312300)

摘要:区熔法是生长单晶硅的重要方法之一,针对区熔法生长单晶硅过程因多晶硅熔化表面热量不均匀而出现“冷针”的问题,利用有限元法对生长区熔硅单晶进行了数值模拟。区熔法生长单晶硅采用高频感应加热,高频加热线圈是区熔炉最为关键的部件之一,线圈的结构、尺寸直接影响到磁场及焦耳热的分布及熔区形状。基于此,建立了有台阶线圈和无台阶线圈下的两种模型,对比了两种模型下熔区附近磁场分布和焦耳热分布,着重分析了高频加热线圈的台阶对磁场及焦耳热分布的影响。研究表明,高频加热线圈的结构会直接影响到熔区附近磁场的分布,进而影响熔区生成的焦耳热分布,线圈台阶可使磁场在熔区附近分布得更均匀,从而有效地解决了“冷针”问题。

关键词:区熔法;线圈台阶;数值模拟

中图分类号:TN30;TM924.5

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)11-1397-04

Effects of high-frequency coil step on distribution of magnetic field in float-zone furnace

CAO Jian-wei, FU Lin-jian, SHEN Wen-jie, ZHU Liang, ZHANG Jun, SHI Gang,
OUYANG Peng-gen, YE Xin, QIU Min-xiu
(Zhejiang Jingsheng M&E Co., Ltd., Shangyu 312300, China)

Abstract: Float zone(FZ) method is one of the most important methods of growing monocrystalline silicon. Aiming at the problem of “cold needle” which is caused by the uneven heat distribution on the melt surface of polycrystalline silicon during the process of growing monocrystalline silicon by FZ method, a numerical simulation of growing monocrystalline silicon was made by using the finite element method. The coil models with step and without step were built to analyze the magnetic field distribution and joule heat distribution around the melting zone. The results indicate that the structure of high-frequency heating coil directly affects the distribution of the magnetic field around the melting zone, and then affects the distribution of generated joule heat. The step of the high frequency heating coil would result in a more uniform distribution of the magnetic field near the melting zone, and effectively solve the problem of “cold needle”.

Key words: float zone(FZ) method; coil step; numerical simulation

0 引言

区别于传统的直拉法(CZ)生长硅晶,区熔硅单晶采用区熔法(也叫针眼法)原理生长硅晶:利用高频感应加热原理,直接对高纯多晶棒料局部加热并熔化,下轴的籽晶通过线圈中心孔与多晶棒熔接并生长出单晶。由于在整个拉晶过程中硅晶不与外界接触,容易

获得高纯度、高完整性、低缺陷的晶棒,被广泛应用于制作高压整流器、高压晶体管、晶体晶闸管等高压大功率器件和探测器、RF 无线通信芯片等领域。区熔法生长硅晶的过程中,保持熔区的稳定性是关键,随着单晶直径的增大,熔区越不稳定,生长单晶越困难,提高单晶生长的成功率已成为人们追求的目标。

高频加热线圈是区熔炉最为关键的部件之一,线

收稿日期:2013-05-31

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX02706)

作者简介:曹建伟(1978-),男,浙江杭州人,博士,主要从事机电一体化方面的研究. E-mail:caojianwei@jsjd.cc

圈的结构、尺寸直接影响到磁场及焦耳热的分布及熔区形状^[14]。现在使用的加热线圈多为单匝盘型线圈,在加热时由于圆环效应电流密度在线圈内径处最大,这样产生的磁场在晶体熔区的“腰部”最为集中,在多晶硅融化表面靠近中心处产生的焦耳热也最多,而靠近外表面处产生的焦耳热最少,这样一来整个多晶硅融化表面的径向温度分布很不均匀,在多晶硅融化表面靠近外表面处由于过冷会产生“冷针”^[5-8],俗称尖刺,尖刺过长与线圈接触会产生打火现象,通常出现这种情况将导致高频电源停止工作。

本研究主要讨论线圈台阶对区熔炉磁场分布的影响,针对无台阶加热线圈和有台阶加热线圈在加热过程中产生的磁场进行有限元仿真,从而更直观地了解线圈台阶对磁场分布的影响规律,为优化线圈结构及改善晶体生长工艺提供理论基础。

1 区熔炉磁场数学模型

区熔单晶炉是靠感应加热来生长晶体的,当在加热线圈内通有高频交变电流时,由电磁感应定律可知会在线圈周围产生相同频率的高频磁场,磁力线穿过多晶棒,从而会在晶体内产生电涡流,这种涡流效应会产生很大的焦耳热,由集肤效应可知这部分焦耳热的绝大部分都在晶体表面产生,然后通过热传导的方式来加热晶体内部^[9]。感应加热过程可用电磁感应定律和焦耳定律描述:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$Q = i^2 Rt \quad (2)$$

式中, ϕ —磁通量, t —时间, Q —生成的焦耳热, i —电流强度, R —电阻。

假设笔者研究的区熔炉磁场为轴对称模型,从麦克斯韦方程组出发^[10],引入辅助量矢量磁位 A ,用 A 的旋度表示磁感应强度 B ,可推导出在柱坐标系下用于求解区熔炉磁场分布的偏微分方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} = -J \quad (3)$$

式中: J —传导电流密度矢量。

对应的边界条件为^[11]:

$$\begin{cases} A = 0 \text{ (表面 7)} \\ A = C/r \text{ (表面 8)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: C —由感应电流决定的值。

其余表面为自然边界条件,边界划分如图 1 所示。

2 区熔炉磁场数值模拟

在磁场有限元分析中,线圈结构如图 2 所示,有台

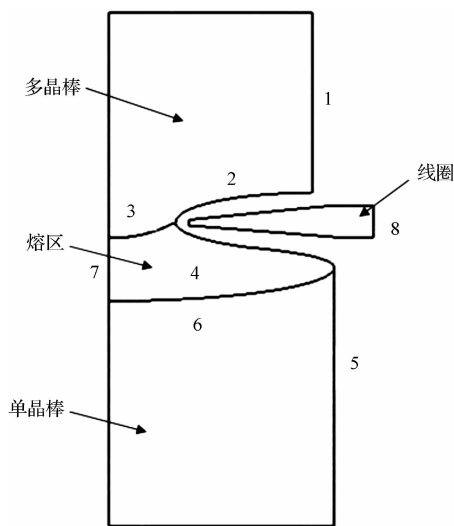
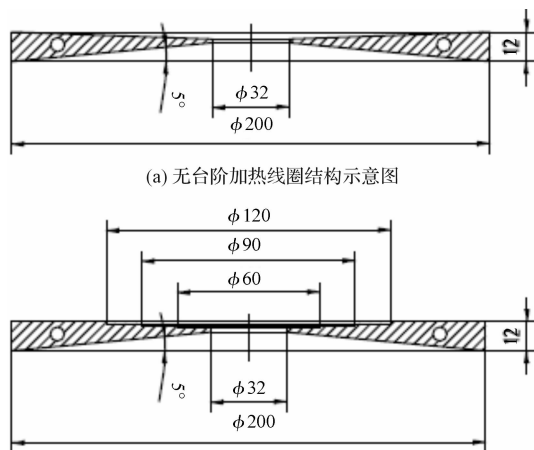


图 1 模型边界示意图

阶加热线圈的每个台阶的高度为 1 mm。



(a) 无台阶加热线圈结构示意图
(b) 有台阶加热线圈结构示意图
图 2 两种加热线圈结构

以生长直径 6 英寸的区熔单晶硅为例,本研究取多晶硅长度 150 mm,单晶硅长度 200 mm,建立包括单晶硅、多晶硅、熔区、线圈、反射环及氩气氛围等面,该模型是典型的轴对称模型,可只建立 1/2 的二维区域,无台阶加热线圈和有台阶加热线圈模型如图 3 所示。

在谐波磁场分析中,本研究选取 Plane13 作为单元类型。所有面都定义为 plane13 单元,单元设置里选择轴对称。材料属性包括相对磁导率、电阻率、导热率等。除了磁性物质,所有物质的相对磁导率都为 1;硅的熔点为 $T_0 = 1\ 685\ \text{K}$;液态硅(即熔区)的电阻率为 $0.83 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{m}$,固态硅(包括多晶硅和单晶硅)的电阻率为 $2 \times 10^{-4}\ \Omega \cdot \text{m}$,铜线圈及反射环的电阻率为 $1.75 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$;液态硅的导热率为 $67\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,固态硅随温度变化的导热率(单位: $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)为^[10]:

$$\lambda = 22 \times \left(4.495 - 7.222 \frac{T}{T_0} + 3.728 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \right) \quad (5)$$

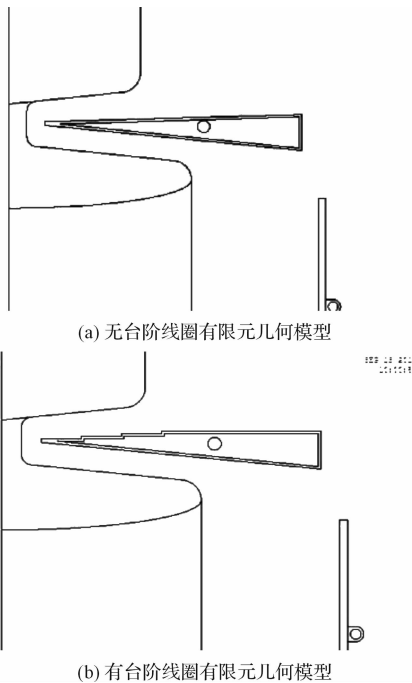


图 3 两种模型有限元几何模型

高频电源的频率为 2.5 MHz,线圈电流为 1 000 A,本研究将线圈电流换算成电流密度载荷施加到模型中,然后在模型中心施加磁力线平行边界条件,即 $AZ = 0$;磁力线垂直边界条件系统自动满足。载荷和边界条件施加完成后开始求解,在后处理中查看磁力线分布图,分别如图 4 所示。

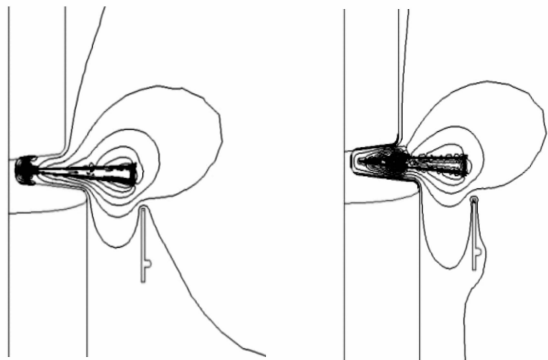


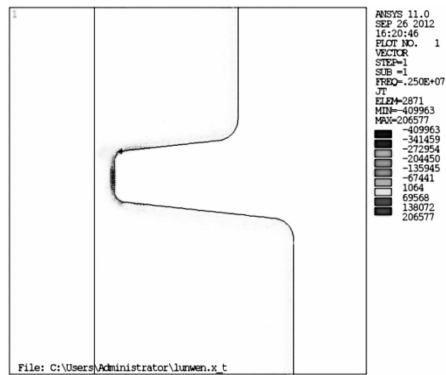
图 4 两种模型磁力线分布图

从以上两种磁力线分布图中可以清晰地看到,在无台阶加热线圈模型下的求解结果中,磁力线最密集的地方在熔区“腰”部,而多晶硅棒融化表面和熔区自由表面处的磁力线分布较稀疏;在有台阶加热线圈模型下的求解结果中,磁力线在多晶硅融化表面、腰部及熔区自由表面处分布更平均。

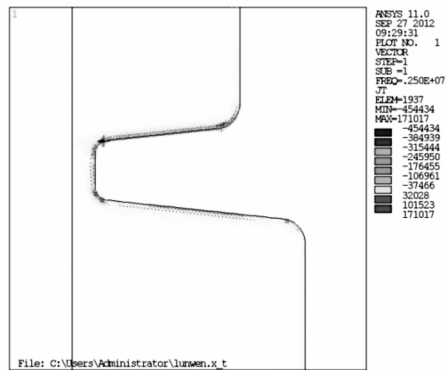
3 仿真数据分析

本研究单独选择多晶棒、熔区和单晶棒,用矢量绘图的方式查看涡流密度的分布,两种模型涡流密度分

布图如图 5 所示。



(a) 无台阶加热线圈涡流密度分布图



(b) 有台阶加热线圈涡流密度分布图

图 5 两种模型涡流密度分布图

从涡流密度分布图中可看出:使用无台阶加热线圈产生的涡流都集中在熔区上方很细的“腰”部,而使用有台阶加热线圈产生的涡流密度在多晶融化表面和熔区自由表面分布较均匀。

本研究在两个模型中分别沿着多晶硅融化表面和熔区自由表面定义两条路径,路径方向为沿着径向,由晶体中心指向晶体外表面。为了方便对比,笔者将路径上焦耳热的数据提取出来,然后在同一坐标系绘制出来,可得到使用两种不同加热线圈多晶硅融化表面生成焦耳热分布曲线,多晶融化表面生成焦耳热分布曲线如图 6 所示。

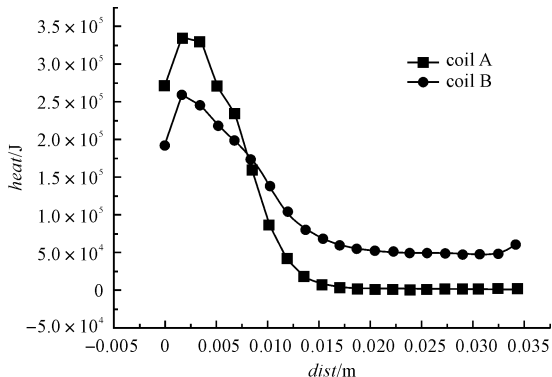


图 6 多晶融化表面生成焦耳热分布曲线

图 6 中,曲线 coil A 表示使用无台阶加热线圈的

生成焦耳热,曲线 coil B 表示使用有台阶加热线圈的生成焦耳热。对比这两条曲线,coil A 的峰值更大,最小值趋于零,变化陡峭,说明生成的焦耳热分布很不均匀;coil B 的峰值相对较小,曲线更平缓,生成的焦耳热相对于 coil A 来说更均匀一些。

同理,生成的焦耳热沿着熔区自由表面的分布情况如图 7 所示。

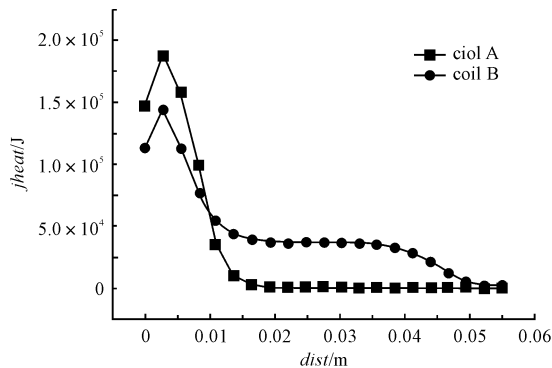


图 7 熔区自由表面生成焦耳热分布曲线

观察图 7 可以发现前半段的分布与图 6 中的两条曲线大致相同,只是使用有台阶加热线圈的 coil B 曲线在最后还有一个减小过程,这是与台阶位置有关的,一般最后一级台阶的直径与多晶硅棒的直径大致相同,所以曲线这种走势也是可以预料的。

分析图 6 和图 7 中的曲线,可得出如下结论:使用无台阶加热线圈时,生成的焦耳热都集中在靠近晶体中心位置,而靠近晶体外径部分,生成的焦耳热很少,这种剧烈变化的焦耳热分布将导致在多晶硅融化表面靠近外径的部位产生尖刺,这种尖刺的危害很大,一旦与加热线圈接触将造成线圈打火,设备停机;使用有台阶加热线圈时,生成的焦耳热在多晶棒融化表面更平均一些,这对避免产生尖刺有很大的帮助。

4 结束语

本研究通过有限元法对生长区熔硅单晶进行了数值模拟,分析了高频加热线圈台阶对熔区附近磁场分布的影响。通过对比仿真得到的磁力线分布、涡流密度分布和生成的焦耳热分布图,可得出结论:①线圈台阶影响了感应磁场的分布,使磁场在熔区附近分布地更均匀;②根据实际晶体生长情况发现,通过使用有台

阶加热线圈有效地解决了在多晶硅融化表面出现“冷针”的问题。

参考文献 (References):

- [1] 庞炳远,闫 萍. 区熔法硅单晶生长的磁场仿真计算 [C]//第十五届全国化合物半导体、微波器件和光电器件学术会议. 广州:[出版者不详],2008:933-936.
- [2] KOHNO H, TANAHASHI T. Finite element simulation of single crystal growth process using GSMAC method [J]. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, 2002,149(1):359-371.
- [3] LI K, HU W R. Numerical simulation of magnetic field design for damping thermocapillary convection in a floating half-zone[J]. **Journal of Crystal Growth**,2001,222(3):677-684.
- [4] LAN C W, YEH B C. Three-dimensional simulation of heat flow, segregation, and zone shape in floating-zone silicon growth under axial and transversal magnetic fields [J]. **Journal of Crystal Growth**,2004,262(1-4):59-71.
- [5] HÄRKÖNEN V. The effect of an electrical field on the radiation tolerance of float zone and magnetic Czochralski silicon particle detectors[J]. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**,2011,637(1):95-99.
- [6] ROST H J, MENZEL R. Float-zone silicon crystal growth at reduced RF frequencies[J]. **Journal of Crystal Growth**, 2012,360(1):43-46.
- [7] HERMANN R, VINZELBERG H, BEHR G. Magnetic field controlled floating-zone crystal growth and properties of RuAl single crystal[J]. **Journal of Crystal Growth**,2008,310(1):4286-4289.
- [8] YU Hai-qi, ZHU Miao-yong. Numerical simulation of the effects of electromagnetic brake and argon gas injection on the three-dimensional multiphase flow and heat transfer in slab continuous casting mold [J]. **ISIJ International**, 2008,48(5):584-591.
- [9] 吴永霞,张 甲. 大型汽轮发电机端部磁场数值分析[J]. **机电工程**,2012,29(3):249-253.
- [10] 成 涛,合 焯,陈小安,等. 基于有限元的异步电主轴电机电磁场分析和参数优化[J]. **机械**,2013,40(2):1-5,8.
- [11] MIHLBAUER A, MUIZNIKES A. Interface shape, heat transfer and fluid flow in the floating zone growth of large silicon crystals with the needle-eye technique[J]. **Journal of Crystal Growth**,1995,151(1-2):66-79.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

曹建伟,傅林坚,沈文杰,等. 高频加热线圈台阶对区熔炉磁场的影响[J]. **机电工程**,2013,30(11):1397-1400.

CAO Jian-wei, FU Lin-jian, SHEN Wen-jie, et al. Effects of high-frequency coil step on distribution of magnetic field in float-zone furnace[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2013,30(11):1397-1400.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>