

一种热量补偿结构在多晶硅定向凝固设备中的应用研究

朱徐立, 洪永强

(厦门大学机电系, 厦门 361005)

摘要: 定向凝固(DS)是冶金法提纯太阳能级多晶硅的重要工艺环节。以保证垂直的晶体生长方向,维持良好的固液相界面形态为目的,设计了一种带有热量补偿结构的多晶硅定向凝固设备,用以替代常规设备的侧壁加热装置,在满足工艺要求的同时达到节能减排、降低成本的目标。进行理论分析和数值模拟来阐述原理与设计结构,对优化凝固工艺、设备结构、控制方法提供了理论依据与技术支持。

关键词: 多晶硅; 定向凝固; 固液相界面; 热量补偿; 数值模拟

中图分类号: O78

文献标识码: A

文章编号: 1000-985X(2014)07-1626-09

Study on Application of Heat Compensation Structure in Polycrystalline Silicon Directional Solidification Equipment

ZHU Xu-li, HONG Yong-qiang

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

(Received 30 December 2013, accepted 25 April 2014)

Abstract: Directional solidification (DS) is an important technological link of manufacturing solar grade (6N) polycrystalline silicon by metallurgy. In order to ensure the vertical direction of crystal growth, maintain a good solid-liquid interface shape, the directional solidification equipment of polycrystalline silicon with heat compensation cavity structure was designed for replacing the lateral heating device of the conventional equipment, which meets the process requirements, saves power and reduces cost at the same time. The principle was illustrated and the structure was designed by the theoretical analysis and numerical simulation. It provides theoretical basis and technical support in the optimization of solidification process, equipment structure and control method.

Key words: polycrystalline silicon; directional solidification; solid-liquid phase interface; heat compensation; numerical simulation

1 引言

定向凝固法(DS)是冶金法提纯6N级多晶硅铸锭的关键工艺。液态硅在坩埚中自下而上逐层定向凝固,杂质伴随固液相界面向上推进累积至硅铸锭顶层,达到除杂提纯的目的。晶枝自上而下垂直生长,固液相界面保持水平上升是保证除杂效率最大化的关键^[1]。在生产应用中,无论采取 Bridgman 法或热交换法

收稿日期: 2013-12-30; 修订日期: 2014-04-25

基金项目: 福建省高校产学研合作科技重大项目(2012H6023)

作者简介: 朱徐立(1984-),男,福建省人,博士研究生。E-mail: 19920120153876@stu.xmu.edu.cn

通讯作者: 洪永强,教授。E-mail: hongyq@xmu.edu.cn

(HEM) 进行定向凝固, 因提纯设备性能、控制方法的差异和局限, 固液相界面往往呈现不同形态, 影响硅铸锭的纯度^[2]。因此, 准确的热场控制和良好的固液相界面形态的是保证提纯质量的关键。为实现此目标, 本研究设计了带有热量补偿结构的多晶硅定向凝固设备来达到工艺要求, 旨在解决定向凝固全过程中晶枝生长方向偏离、固液相界面内凹等铸锭常见缺陷, 并达到节能减排的低碳目的。

2 设备模型与问题描述

理想中多晶硅定向凝固的热量流动方向为垂直向下(温度梯度垂直向上), 此时固液相界面保持水平状态。但由于盛放硅液的坩埚侧壁或多或少会存在热交换情况^[3], 使水平方向上存在温度梯度分量, 导致固液相界面的形态各异。规模化生产中, 纯度较差的硅铸锭大部分都出现了图 1 所示情况: 由于坩埚侧壁存在热损失, 在同一水平高度上, 靠近侧壁的硅液先于处在中心的硅液凝固, 造成长晶偏离竖直方向, 固液相界面呈现凹型^[4], 将导致提纯质量大幅下降。

Bridgman 法与 HEM 的共同点是在坩埚侧壁四周放置加热场(大部分设备还进行顶部加热), 对硅液进行加热保温。这样既可以对坩埚内的硅均匀加热, 还能调节坩埚侧壁热交换量, 改善长晶质量^[5]。但侧壁的加热装置提高了定向凝固设备的复杂性和造价, HEM 还需要在坩埚底部通水冷却, 无疑更增加了能耗^[6]。意大利的 Dughiero 等^[7]在坩埚和侧壁感应线圈之间加入绝热罩, 台北的 Li 等^[8]设计了坩埚底部的氩气室来取代 HEM 的水冷装置, 这些研究的目的均为提高热场效率、节约电能。

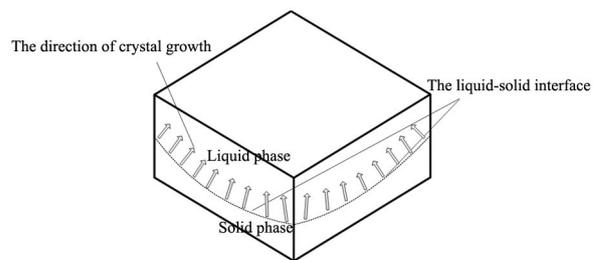


图 1 内凹型固液相界面

Fig. 1 Concave solid-liquid phase interface

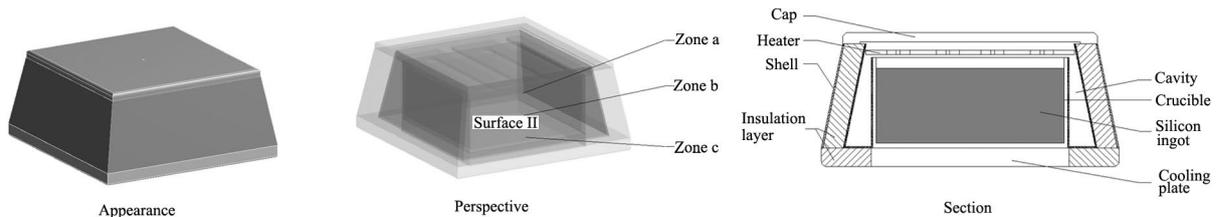


图 2 带热量补偿结构的定向凝固设备

Fig. 2 Direction solidification equipment with heat compensation structure

为了调节控制坩埚侧壁热量交换量, 同时降低能耗, 本研究提出一种带热量补偿腔体结构的定向凝固设备(图 2), 围绕安装于坩埚四周。在腔体内, 将顶部加热器、硅液上表面和坩埚侧壁散发的热量耦合(图 3), 目的是补偿侧壁散失的热量, 使侧壁水平方向损失的热量减少为 0 或成为负值, 等同于侧壁绝热或对其加热。这种结构充分利用了顶部小面积加热器和硅液的凝固潜热来补偿侧壁损失的热量, 可以替代 Bridgman 法和 HEM 的侧壁加热装置, 大幅降低能耗和设备复杂程度, 并且能通过腔体选材和设计, 获得长晶所需的最佳固液相界面形态。

3 设计原理分析

如图 4 所示, 由于设备完全对称, 故取设备半剖面建立坐标系进行分析, 坐标系中 δ 所示长度为硅铸锭半宽(m), H 所示长度为硅铸锭高度(m)。

腔体内, 面 II (坩埚侧壁) x 轴方向的热流密度 φ_{II} 流向有三种情况:

- (1) 当 $\varphi_{II} > 0$ 时, 热流密度沿 x 轴正方向传播, 即硅铸锭侧壁损失热量;

- (2) 当 $\varphi_{II} = 0$ 时 x 轴方向上没有热交换, 热流密度为 0;
- (3) 当 $\varphi_{II} < 0$ 时, 热流密度沿 x 轴负方向传播, 即硅铸锭侧壁吸收热量。

情况 (1) 会造成固液相界面呈现内凹形态(图 1), 严重影响提纯质量, 因此, 热量补偿腔体的设计目的应满足情况 (2) 与 (3), 这样就需要对腔体的形状和内部壁面的发射率进行设计和选择。

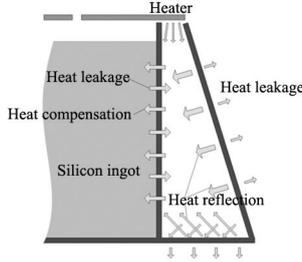


图 3 腔体内热辐射

Fig. 3 Heat radiation coupling in the cavity

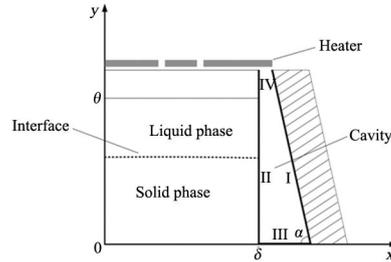


图 4 热量补偿结构设备剖面模型

Fig. 4 Model of heat compensation equipment section

由于腔体近似封闭, 腔体各内表面符合灰体辐射传热定律^[9], 如式 (1):

$$\begin{cases} \varphi_i = \varepsilon_i (\sigma T_i^4 - \sum_{j=1}^N \bar{F}_{ij} J_j) \\ J_j = \varepsilon_j \sigma T_j^4 + (1 - \varepsilon_j) \sum_{i=1}^N \bar{F}_{ij} J_i \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中 φ 为面热流密度 (W/m^2) J 为腔体内表面有效热辐射密度 (W/m^2) ε 为热辐射发射率 (无量纲) σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 \bar{F} 为腔体角系数 (无量纲) T 为腔体内表面温度 (K)。因此 φ_{II} 的值可以由腔体 4 个内表面 I ~ IV 的温度、发射率和角系数表示, 即:

$$\begin{cases} \varphi_I = \varepsilon_I (\sigma T_I^4 - \bar{F}_{11} J_I - \bar{F}_{12} J_{II} - \bar{F}_{13} J_{III} - \bar{F}_{14} J_{IV}) \\ \varphi_{II} = \varepsilon_{II} (\sigma T_{II}^4 - \bar{F}_{21} J_I - \bar{F}_{22} J_{II} - \bar{F}_{23} J_{III} - \bar{F}_{24} J_{IV}) \\ \varphi_{III} = \varepsilon_{III} (\sigma T_{III}^4 - \bar{F}_{31} J_I - \bar{F}_{32} J_{II} - \bar{F}_{33} J_{III} - \bar{F}_{34} J_{IV}) \\ \varphi_{IV} = \varepsilon_{IV} (\sigma T_{IV}^4 - \bar{F}_{41} J_I - \bar{F}_{42} J_{II} - \bar{F}_{43} J_{III} - \bar{F}_{44} J_{IV}) \\ J_I = \varepsilon_I \sigma T_I^4 + (1 - \varepsilon_I) (\bar{F}_{11} J_I + \bar{F}_{12} J_{II} + \bar{F}_{13} J_{III} + \bar{F}_{14} J_{IV}) \\ J_{II} = \varepsilon_{II} \sigma T_{II}^4 + (1 - \varepsilon_{II}) (\bar{F}_{21} J_I + \bar{F}_{22} J_{II} + \bar{F}_{23} J_{III} + \bar{F}_{24} J_{IV}) \\ J_{III} = \varepsilon_{III} \sigma T_{III}^4 + (1 - \varepsilon_{III}) (\bar{F}_{31} J_I + \bar{F}_{32} J_{II} + \bar{F}_{33} J_{III} + \bar{F}_{34} J_{IV}) \\ J_{IV} = \varepsilon_{IV} \sigma T_{IV}^4 + (1 - \varepsilon_{IV}) (\bar{F}_{41} J_I + \bar{F}_{42} J_{II} + \bar{F}_{43} J_{III} + \bar{F}_{44} J_{IV}) \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中 $T_I \sim T_{IV}$ 可测, 解此方程组。由于 φ_{II} 的表达式十分冗长, 可将 φ_{II} 表示为发射率 ε 和角系数 \bar{F} 的函数:

$$\varphi_{II} = f(\varepsilon, \bar{F}) \quad (3)$$

令 $\varphi_{II} \leq 0$, 这是一个含有发射率 ε 和角系数 \bar{F} 的 20 维解空间, 将式 (3) 转化为式 (4):

$$\varphi_{II} = f(\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{III}, \varepsilon_{IV}, \bar{F}_{11}, \bar{F}_{12}, \bar{F}_{13}, \bar{F}_{14}, \bar{F}_{21}, \bar{F}_{22}, \bar{F}_{23}, \bar{F}_{24}, \bar{F}_{31}, \bar{F}_{32}, \bar{F}_{33}, \bar{F}_{34}, \bar{F}_{41}, \bar{F}_{42}, \bar{F}_{43}, \bar{F}_{44}) \quad (4)$$

式 (2) 中, 腔体内各个面相互间的角系数满足如下关系^[10] (式 5、6):

$$\begin{cases} \bar{F}_{11} + \bar{F}_{12} + \bar{F}_{13} + \bar{F}_{14} = 1 \\ \bar{F}_{21} + \bar{F}_{22} + \bar{F}_{23} + \bar{F}_{24} = 1 \\ \bar{F}_{31} + \bar{F}_{32} + \bar{F}_{33} + \bar{F}_{34} = 1 \\ \bar{F}_{41} + \bar{F}_{42} + \bar{F}_{43} + \bar{F}_{44} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{F}_{11} = \bar{F}_{22} = \bar{F}_{33} = \bar{F}_{44} = 0 \tag{6}$$

因此解空间降为 12 维,如式(7):

$$\varphi_{II} = f(\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{III}, \varepsilon_{IV}, \bar{F}_{12}, \bar{F}_{13}, \bar{F}_{21}, \bar{F}_{23}, \bar{F}_{31}, \bar{F}_{32}, \bar{F}_{41}, \bar{F}_{42}) \tag{7}$$

ε 值由腔体内表面材料性质和粗糙度确定,坩埚尺寸确定后, \bar{F} 值仅随腔体内角 α ($^\circ$) (图 4) 的改变而变化。在解空间内,寻找最优的 ε 和 \bar{F} 的组合,使之符合工程的实际要求。为了便于确定式(7)中各待定参数值,可以进行各参数对 φ_{II} 取值的敏感性分析^[11],取敏感性最高(即 φ_{II} 对其变化率最大)的 ε_{III} 和(内角 α) 优先进行分析。可将 φ_{II} 值可表示为:

$$\varphi_{II} = g(\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{III}, \varepsilon_{IV}, \alpha) \tag{8}$$

由于存在多个待定参数,采用试算法确定其值: $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{IV}$ 的值根据腔体内衬材料种类(章节 4.1)以及工程可加工范围内暂定 α 在 $55^\circ \sim 85^\circ$ 范围取值,这样,式(8)中仅含 ε_{III} 和 α 两个待定参数。式(8)可变换为:

$$\varphi_{II} = h(\varepsilon_{III}, \alpha) \tag{9}$$

利用 Matlab 软件绘制式(9)的函数曲面,如图 5 所示, x 轴为 ε_{III} (无量纲), y 轴为 α ($^\circ$), z 轴代表 ε_{II} (W/m^2) 值。通过在曲面上取点,可确定一系列 ε_{III} 和 α 的取值组合,使 $\varphi_{II} \leq 0$ 。再将这一系列中任意一组 ε_{III} 和 α 值重新代入式(8),确定 $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{IV}$ 的函数关系后求得多组取值范围内的 $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{IV}$ 值。将此步骤重复进行多次,可得到多组满足 $\varphi_{II} \leq 0$ 要求的 $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{III}, \varepsilon_{IV}, \alpha$ 组合。因表达式冗长,计算量较大,通过在 Excel 软件内编写 VB 程序来进行试算。

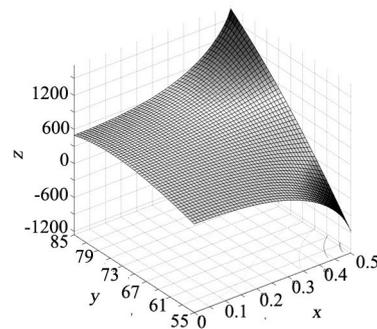


图 5 φ_{II} 与 $\varepsilon_{III}, \alpha$ 函数关系曲面
Fig. 5 Relationship between φ_{II} and $\varepsilon_{III}, \alpha$

如上所述,可以确定一系列 ε 和 \bar{F} 的组合,使 $\varphi_{II} \leq 0$ 。这些数据可用于数值模拟和工程应用参考。例

如,式(10)、(11)为一组解空间内的发射率和角系数,使 $\varphi_{II} = 0$:

$$\varepsilon_I = 0.092, \varepsilon_{II} = 0.8, \varepsilon_{III} = 0.23, \varepsilon_{IV} = 0.9 \tag{10}$$

$$\begin{cases} \bar{F}_{11} = 0, \bar{F}_{12} = \frac{1}{2}, \bar{F}_{13} = \frac{1}{3}, \bar{F}_{16} = \frac{1}{6} \\ \bar{F}_{21} = \frac{1}{2}, \bar{F}_{22} = 0, \bar{F}_{23} = \frac{3}{10}, \bar{F}_{24} = \frac{2}{10} \\ \bar{F}_{31} = \frac{5}{9}, \bar{F}_{32} = \frac{1}{3}, \bar{F}_{33} = 0, \bar{F}_{34} = \frac{1}{9} \\ \bar{F}_{41} = \frac{5}{11}, \bar{F}_{42} = \frac{4}{11}, \bar{F}_{43} = \frac{2}{11}, \bar{F}_{44} = 0 \end{cases} \tag{11}$$

根据发射率 ε 可以对腔体内表面进行选材和加工,角系数 \bar{F} 则确定了腔体形状。由于对设备进行二维分析存在局限性与误差,热量补偿结构的各参数还需借助数值模拟进行修正。

4 数值模拟

4.1 网格划分与边界条件

利用数值模拟软件对晶体生长进行仿真已经成为理论分析的重要手段。滕冉、戴小林等利用数值模拟对硅定向凝固设备的热屏障进行了优化设计^[12],并分析了晶体生长过程中固液相界面形状的变化^[13]。本研究采用界面友好的分析软件 Ansys workbench 中的 Thermal 模块和 Fluent 模块进行数值模拟,其中, Thermal 模块包括稳态(Static)和瞬态(Transient)分析,稳态模块用于建立设备初始温度场,瞬态模块用于分析多晶硅凝固情况; Fluent 模块用于分析凝固过程中硅液的内部对流情况。

首先对设备材料进行定义: 硅的密度和导热系数 λ 为温度的函数, 采取非线性定义; 坩埚为石英陶瓷坩埚; 热量补偿腔体内衬石墨板、SiC、氧化物陶瓷三种热学材料; 腔体外侧覆盖有保温层, 保温层采用耐火砖及膨胀珍珠岩; 热量补偿腔体顶部设有石墨加热器, 加热器置于坩埚正上方, 并延伸至腔体上部, 高于腔体顶部开口, 功率可调; 散热板采用耐高温导热材料; 根据章节 3 角系数的计算结果, 内角 α 取值范围为 $73^\circ \sim 78^\circ$ 。

其次, 对模型划分网格: Thermal 模块中 Physics Preference 设置为 Mechanical, 网格类型采用六面体 (Hex Dominant); Fluent 模块中网格划分策略 (Method) 为四面体 (Tetrahedrons), 包围域采用膨胀 (Inflation) 型, 其依附表面 (Boundary) 为域侧包围, 设置边界层 (Layers) 最大层数为 4 层, 第一边界层厚度 (First Layer Thickness) 控制在 40 mm, 生长率 (Growth Rate) 为 1.2, 生成非结构化网格后转换为多面体网格 (Polyhedra), 以提高网格质量和计算精度。

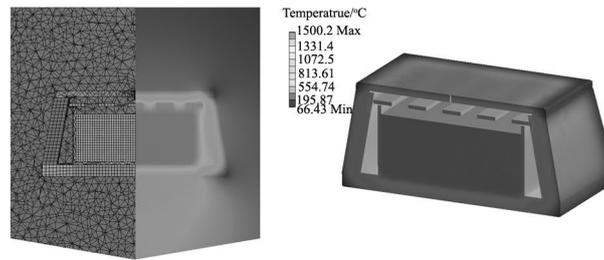


图6 网格划分与热场云图

Fig. 6 Grid and thermal field

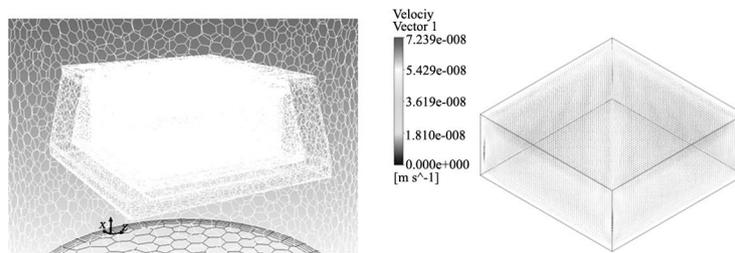


图7 网格划分与硅液流场

Fig. 7 Grid and flow field

最后, 对边界条件赋值: 按照常规定向凝固设备的经验数据, 定向凝固总时间设定为 25 h; 液态硅初始温度为 1500°C ; 顶部加热器初始温度为 1450°C ; 坩埚底部散热板表面采用气体强制对流散热, 初始流速为 3.5 m/s ; 加热器功率和散热速率曲线采用章节 5 中所提及的边界条件 '1', Thermal 模块边界条件采用表格 (Tabular) 输入, Fluent 的边界条件采用 UDF 定义, 开启重力 (Gravity)、能量 (Energy)、湍流动能方程与扩散方程 (k- ϵ 方程)、热辐射 (Radiation)、凝固与熔化 (Solidification&Melting) 五个模型 (Models)。图 6 为 Thermal 模块网格划分及凝固初始时刻系统达到热平衡的热场剖面, 图 7 则为 Fluent 中网格包围域与凝固初始硅液流场:

4.2 模拟结果

图 8 所对应的是凝固初始时刻系统达到热平衡时, 图 2 中坩埚侧壁面 surface II 的热流密度分布。a, b, c 分别对应壁面的三个采样点, 代表侧壁顶、中、下三个区域。采用热量补偿结构之后, 在坩埚侧壁的大部分区域, 热流密度在 $33.4 \sim 200\text{ W/m}^2$ 区间之内, 相对于容器底部散热时的热流密度 (10^4 W/m^2) 的数量级, 坩

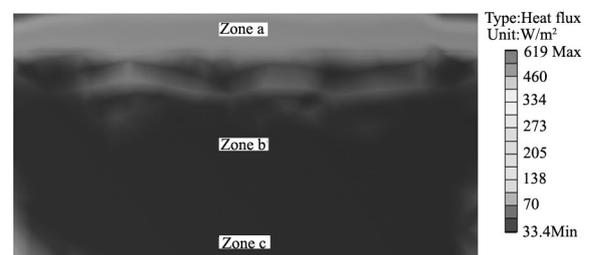


图8 坩埚侧壁热流密度分布

Fig. 8 Heat flux distribution through lateral wall of crucible

坩埚侧壁可视为接近绝热, 热量补偿结构发挥了作用。但在采样点 a 所代表的上部区域, 热量损失大于 600 W/m^2 , 造成此现象的原因将于章节 5 阐明。

定向凝固全过程为 25 h (90000 s)。对凝固初期(2 h), 中期(5 h, 10 h, 15 h), 末期(20 h, 22 h, 25 h) 的硅铸锭固液相界面(图 9) 及硅液流场(图 10) 进行分析:

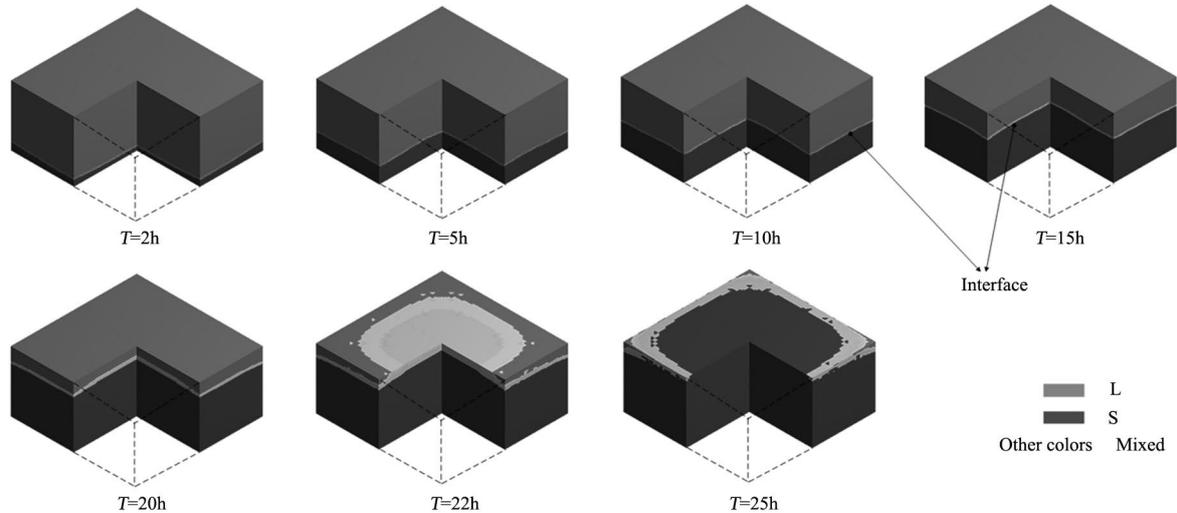


图 9 固液相界面

Fig. 9 The solid-liquid interface in the DS

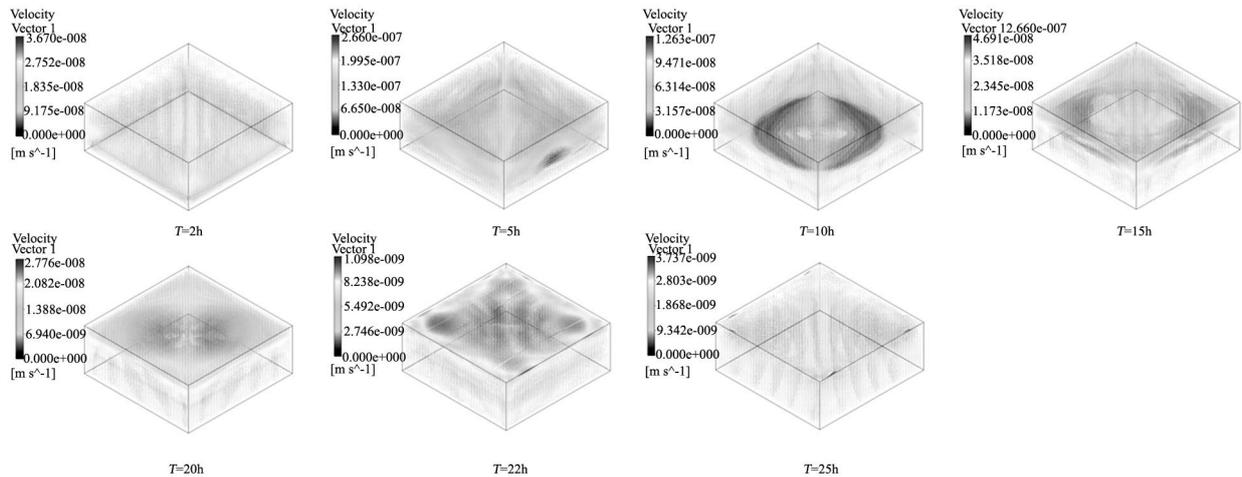


图 10 硅液流场

Fig. 10 The flow field in the DS

5 结果与讨论

通过章节 4 的数值模拟, 在硅凝固全程的大部分时间范围内, 热量补偿结构都发挥了作用, 使容器侧壁近似于理想绝热状态。随着凝固的进行, 硅液的流动区域逐渐减小, 在凝固全程中热对流较为均匀对称, 界面基本保持水平并微微上鼓, 这对杂质的提纯是很有利的^[14]。图 11 ~ 13 为坩埚侧壁 a, b, c 三个采样点在凝固全过程的热流密度变化曲线, 由图 12 和图 13 可以看出, b 与 c 两采样点所代表的侧壁中下部, 在凝固全程中热流密度变化范围为 $-33.32 \sim 245.81 \text{ W/m}^2$, 近似于绝热状态, 达到设计要求。

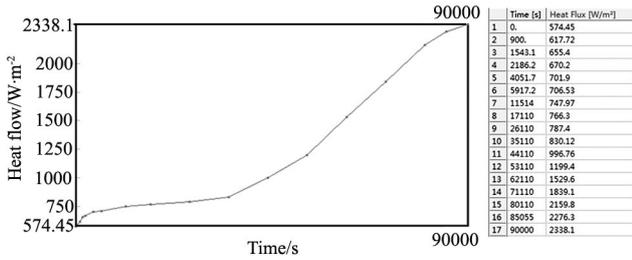


图 11 采样点 a 热流密度变化曲线
Fig. 11 The curve of heat flux in zone a

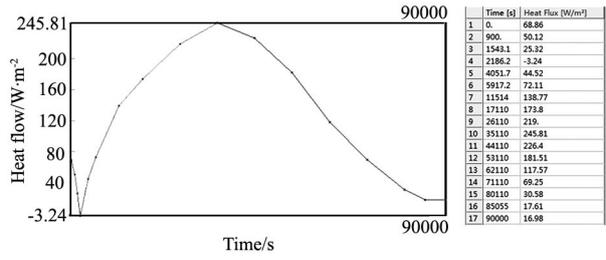


图 12 采样点 b 热流密度变化曲线
Fig. 12 The curve of heat flux in zone b

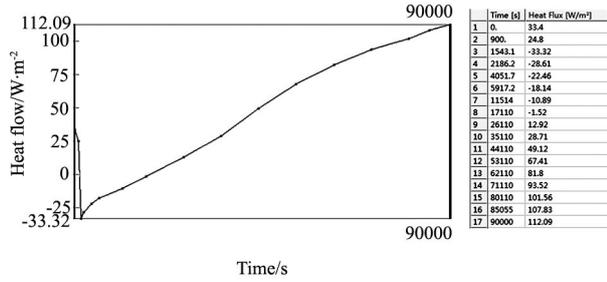


图 13 采样点 c 热流密度变化曲线
Fig. 13 The curve of heat flux in zone c

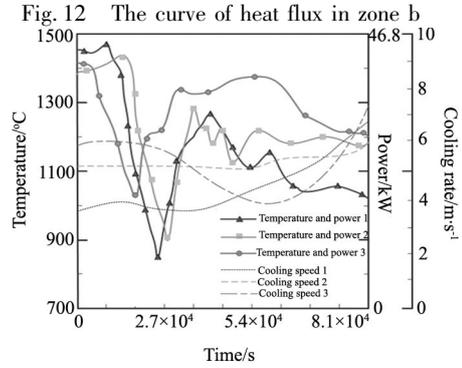


图 14 三种热边界条件
Fig. 14 Three kinds of thermal boundary conditions

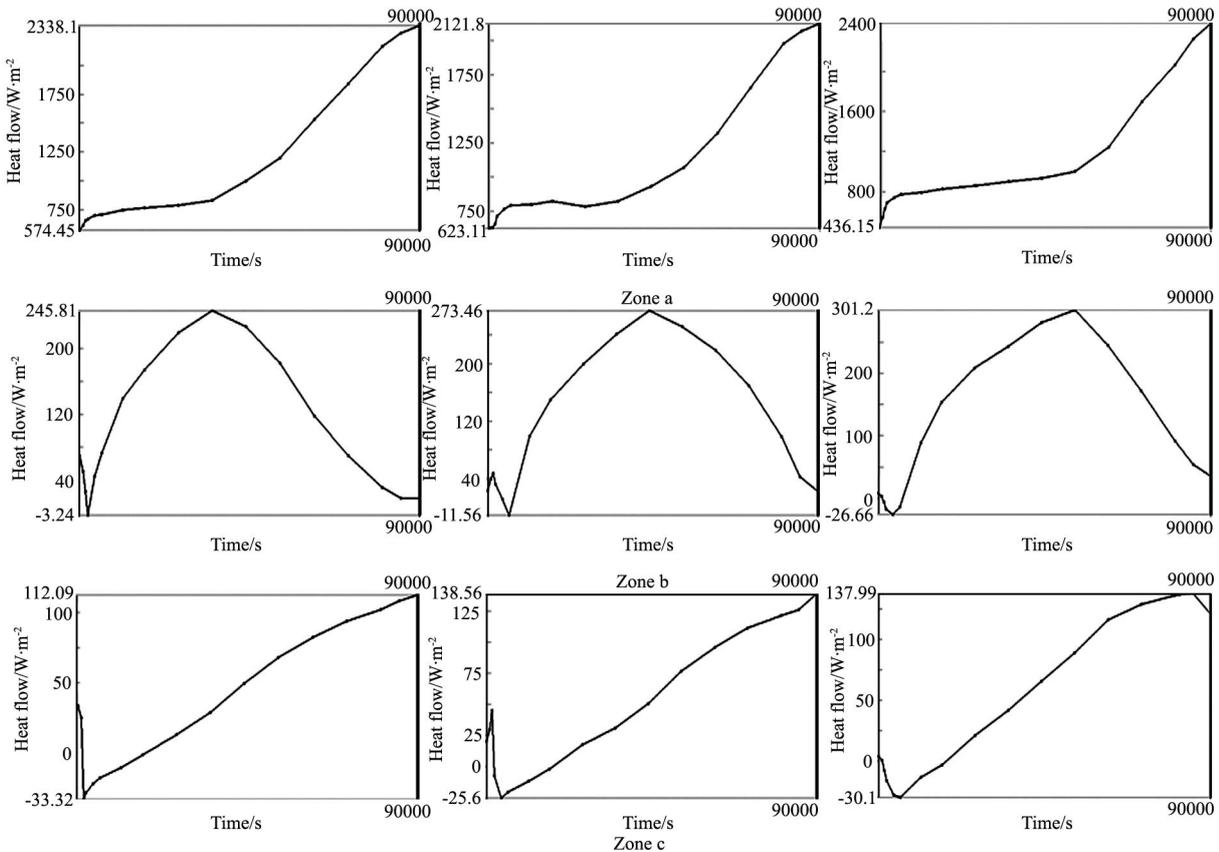


图 15 三种热边界条件下采样点 a, b, c 的热流密度变化曲线
Fig. 15 The heat flux curves of zone a, b, c in three kinds of thermal boundary conditions

而图 11 所代表的侧壁顶部热流密度变化情况 随着定向凝固的进行 热流密度由 574.45 W/m^2 增大至 2338.1 W/m^2 造成了图 9 中 $T=22 \text{ h}$ 与 $T=25 \text{ h}$ 时刻铸锭顶部固液相不均匀混合的状况。其原因由于热量补偿结构靠近顶端的部分 几何特征已不明显 且靠近顶部加热器 失去热量补偿效果。但由于凝固已接近尾声 顶部已多是杂质 对整个铸锭的提纯质量几乎不造成影响。

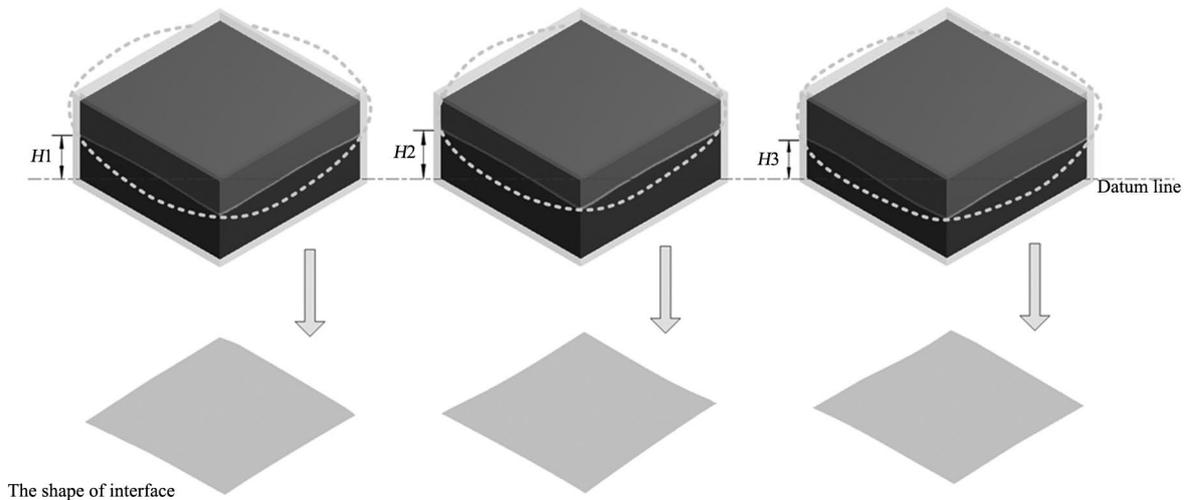


图 16 三种热边界条件下固液相界面分布 ($T = 15 \text{ h}$)

Fig. 16 The solid-liquid interface distribution in three kinds of thermal boundary conditions ($T = 15 \text{ h}$)

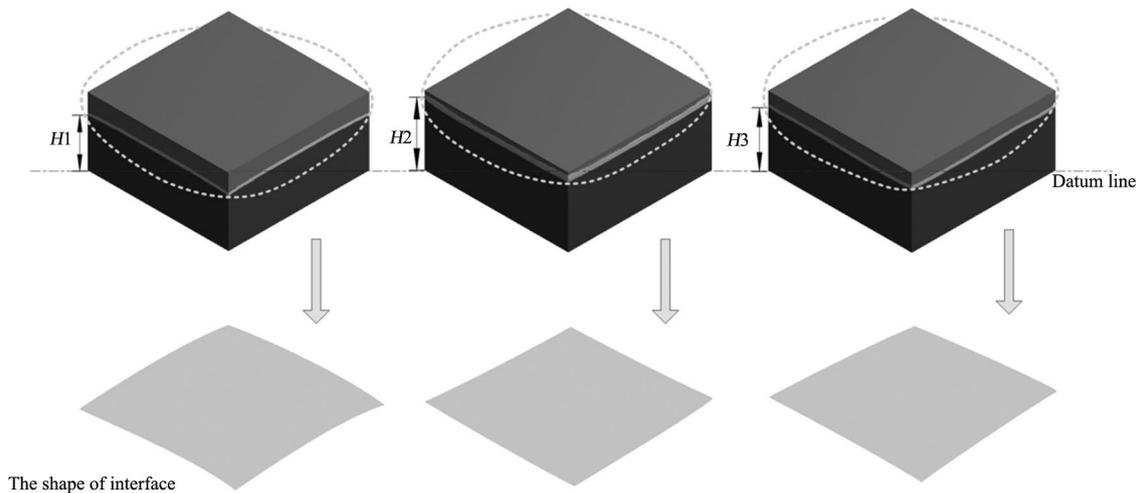


图 17 三种热边界条件下固液相界面分布 ($T = 20 \text{ h}$)

Fig. 17 The solid-liquid interface distribution in three kinds of thermal boundary conditions ($T = 20 \text{ h}$)

在工程应用范围内适当改变顶部加热器的功率输出和坩埚底部散热速率 图 14 为三种不同加热功率及散热速度曲线 其中包含了章节 4 中数值模拟所采用的边界条件“1”。图 15 则展示了在“1”、“2”、“3”三种不同热边界条件下 坩埚侧壁的热流密度变化的情况:

改变边界条件后 坩埚侧壁上 a b c 三个采样点的热流密度变化曲线均发生变化 但总体形态走向基本一致 且上下限均保持同一量级的范围之内: $a \in [436.1, 2480]$ $b \in [-26.66, 301.2]$ $c \in [-33.32, 138.56]$ 表明了热量补偿结构在不同工况下的通用性。同时 在不同热边界条件下 硅铸锭固液相界面形态基本一致 均保持水平 仅有界面推进高度的差异。以 $T = 15 \text{ h}$ 固液相界面分布情况为例 如图 16 所示,

三者固液相界面形态相似,仅存在高度差别($H_2 > H_1 > H_3$);当 $T = 20$ h(图 17)时,高度发生改变($H_2 > H_3 > H_1$)。这表明,边界条件的改变对固液面形态影响较小,而更多影响凝固速率的快慢。因此,热量补偿结构降低了固液相界面形态受热场条件影响的敏感性。

6 结 论

在冶金法制备太阳能级(6N级)多晶硅的定向凝固过程中,Bridgman法与HEM的设备均需在坩埚上部与侧壁加持加热装置,增加了能耗与造价。而采用热量补偿结构的定向凝固设备,仅需在坩埚上部加持热源,采用腔体结构来替代常规侧壁加热装置,利用接近真空的腔体内表面热量的反射和耦合,使坩埚侧壁流失和补充的热量接近等值,等同于对侧壁进行保温或加热。

通过对多晶硅热场、定向凝固过程的理论分析和数值模拟,论证了带有热量补偿结构的定向凝固设备可以维持良好的固液相界面形态,能满足定向凝固的工艺条件,并达到节能、降低造价的目的,对设计多晶硅凝固工艺、设备结构、控制方法提供了理论依据与技术支持。特别是得到加热器功率和散热速率等边界条件的改变主要影响固液相界面的推进速率,而对界面形态影响较小的结论,对降低热场控制难度与精度,减少设备中传感器数量具有重要的实践价值。

参 考 文 献

- [1] Dadzis K, Niemietz K, Pätzold O, et al. Non-Isothermal Model Experiments and Numerical Simulations for Directional Solidification of Multicrystalline Silicon in a Traveling Magnetic Field[J]. *Journal of Crystal Growth* 2013 **372**: 145-156.
- [2] Zhu D, Ming L, Huang M, et al. Seed-Assisted Growth of High-Quality Multi-Crystalline Silicon in Directional Solidification[J]. *Journal of Crystal Growth* 2014 **386**: 52-56.
- [3] Zheng L, Ma X, Hu D, et al. Mechanism and Modeling of Silicon Carbide Formation and Engulfment in Industrial Silicon Directional Solidification Growth[J]. *Journal of Crystal Growth* 2011 **318**(1): 313-317.
- [4] Li Z, Liu L, Liu X, et al. Heat Transfer in an Industrial Directional Solidification Furnace with Multi-Heaters for Silicon Ingots[J]. *Journal of Crystal Growth* 2014 **385**: 9-15.
- [5] Tan Y, Ren S, Shi S, et al. Removal of Aluminum and Calcium in Multicrystalline Silicon by Vacuum Induction Melting and Directional Solidification[J]. *Vacuum* 2014 **99**: 272-276.
- [6] Wong Y T, Hsu C, Lan C W. Development of Grain Structures of Multi-Crystalline Silicon from Randomly Orientated Seeds in Directional Solidification[J]. *Journal of Crystal Growth* 2014 **387**: 10-15.
- [7] Dughiero F, Forzan M, Ciscato D, et al. Multi-Crystalline Silicon Ingots Growth with an Innovative Induction Heating Directional Solidification Furnace[C]. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 2011 37th IEEE. IEEE 2011: 2151-2156.
- [8] Li T F, Huang H C, Tsai H W, et al. An Enhanced Cooling Design in Directional Solidification for High Quality Multi-Crystalline Solar Silicon[J]. *Journal of Crystal Growth* 2012 **340**(1): 202-208.
- [9] Bianchi A M, Fautrelle Y, Etay J. Transferts Thermiques[M]. PPUR Presses Polytechniques 2004: 286-287.
- [10] Bianchi A M, Fautrelle Y, Etay J. Transferts Thermiques[M]. PPUR Presses Polytechniques 2004: 284.
- [11] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版) 2008 **1**: 004.
Cai Y, Xing Y, Hu D. Sensitivity Analysis Reviews[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)* 2008(1): 9-16.
- [12] 滕冉, 戴小林, 徐文婷, 等. 热屏优化对大直径单晶硅生长影响的数值模拟[J]. 人工晶体学报 2012 **41**(1): 238-242.
Teng R, Dai X L, Xu W T, et al. Numerical Simulation on Effect of Heat-Shield Optimization on the Growth of Large-Diameter Silicon Single Crystal[J]. *Journal of Synthetic Crystals* 2012 **41**(1): 238-242.
- [13] 滕冉, 戴小林, 肖清华, 等. 大直径单晶硅生长过程中固/液界面形状及熔体流动的数值分析[J]. 人工晶体学报 2013 **42**(4): 611-615.
Teng R, Dai X L, Xiao Q H, et al. Numerical Simulation of Melt/Crystal Interface and Melt Flow during Large Diameter Single Silicon Crystal Growth[J]. *Journal of Synthetic Crystals* 2013 **42**(4): 611-615.
- [14] 谭毅, 孙世海, 董伟, 等. 多晶硅定向凝固过程中固-液界面特性研究[J]. 材料工程 2012 (8): 33-38.
Tan Y, Sun S H, Dong W, et al. Research of Solid-Liquid Interface Property during Directional Solidification Process for Multicrystalline Silicon[J]. *Material Engineering*, 2012 (8): 33-38.