

直拉式单晶硅生长炉超导磁体研究

吴小四¹, 朱银锋¹, 唐梦雨¹, 郑旭¹, Mohmmmed Mun ELseed Hassaan^{2, 3}

(1. 安徽建筑大学 机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601;
2. 中国科学院 合肥物质科学研究院等离子体所, 安徽 合肥 230031;
3. 中国科学技术大学 核科学技术学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 高集成度芯片发展使半导体行业对硅单晶材料提出尺寸与质量的要求。直拉法(Cz法)可生成大尺寸硅单晶, 但生长中产生热对流, 边界层不稳定, 晶体易生杂质。因磁场对导电熔体内对流有抑制效果, 通过外加磁场可提高生成大尺寸晶体的品质。基于现有研究结果提出了一种用于单晶炉的瓦状结构超导磁体, 确定线圈结构参数、导体类型、屏蔽体厚度及磁芯高度, 使其满足大尺寸、高品质单晶硅生长所需的磁场强度(约0.5T)及磁场位型, 从而降低漏磁。借助数值分析优化超导磁体结构参数, 有望为后续的MCZ硅单晶生长工艺参数提供参考。

关键词: 超导磁体; 磁场直拉法; 导体; 结构参数; 匝数排布; 磁场强度

中图分类号: TP15

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)03-067-07

Study on Superconducting Magnet for Czochralski Single Crystal Silicon Growth Furnace

WU Xiaosi¹, ZHU Yinfeng¹, TANG Mengyu¹, ZHEN Xu¹, Mohmmmed Mun ELseed Hassaan^{2, 3}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230601, China)

Abstract: With the development of highly integrated chips, the semiconductor industry is placing higher demands on the size and quality of silicon single crystal materials. CZ method can produce large-size silicon single crystals, but the thermal convection generated during growth caused unstable boundary layer and the crystals are prone to impurities. Since the magnetic field has a suppressive effect on convection in the conductive melt, the quality of the generated large-size crystals can be improved by applying a magnetic field. Based on the existing researches, a tile-shaped superconducting magnet for a single crystal furnace is proposed. The structural parameters of the coil, conductor type, shield thickness and magnetic core height are determined to meet the magnetic field strength (about 0.5 T) and magnetic field pattern required for the growth of large-size, high-quality single crystal silicon, thus reducing magnetic leakage. The optimization of the superconducting magnet structure parameters by numerical analysis is expected to provide references for the subsequent MCZ silicon single crystal growth process parameters.

Keywords: superconducting magnet; Czochralski method; conductor; structural parameters; turns arrangement; magnetic field intensity

收稿日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51877001); 安徽省高等学校自然科学研究重点项目(KJ2019A0789)

作者简介: 吴小四(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 数字化设计与制造;

朱银锋(1973-), 教授, 博士, 主要研究方向: 低温高压绝缘技术、计算机辅助三维设计及多物理场耦合数值模拟。

为满足集成电路的发展,对硅单晶材料提出了“大尺寸、高品质”的要求^[1]。因晶圆直径越大,芯片成本越低,伴随着大直径硅单晶的发展,投料量增加,大熔体严重对流成为制约高品质单晶生成的关键问题。人们发现,太空微重力和磁场可以有效抑制熔体对流,但微重力下晶体生成费用高,工艺复杂且周期长。磁场下生长晶体,当场强足够时,熔体内宏观对流均受洛伦兹力作用得到有效抑制。因此,外加磁场成为抑制熔体对流和提高晶体品质的有效手段^[2]。基于现有单晶硅磁场研究结果,提出一种用于单晶炉的新型瓦状超导磁体,满足坩埚壁处最低场强 0.5T 的物理设计指标,并通过数值分析确定线圈具体结构和关键参数。

1 直拉法及磁场

直拉法(Cz法)是指在坩埚内熔融多晶硅原料,借助籽晶旋转提升引晶。由于其设备、工艺简单,生产效率高,可节约硅原料,降低成本。市场上 80% 以上的单晶硅都由直拉法生产。由于用坩埚做容器且内部存在对流,随着生成单晶尺寸的加大,热对流、温度梯度均匀性越发难以控制,通过加入磁场使导电熔体受洛伦兹力的作用,可减缓甚至消除对流生产高质量单晶硅。图 1 为不同的磁场分布。

垂直磁场由于结构原因无法消除主要对流,很少被采用。水平磁场的磁场分量方向垂直于坩埚壁主要热对流与部分强迫对流,可有效抑制运动,且保持生长界面平整性,降低生长条纹。CUSP 磁场因其对称性,熔体的流动和传热性更为均匀,因此对于垂直与 CUSP 磁场的研究一直在齐头并进^[3]。国内如西安理工大学较早实现磁场应用硅单晶生

产和拉晶实验,主要产品为 6–8in 普及型,面向太阳能光伏电池硅片市场;国外如美国的 KAYEX 公司和德国的 CGS 公司,主要产品为 8–16in,适应超大规模集成电路和半导体级别的单晶硅棒,在大直径高品质单晶生长的磁场领域占垄断地位,最具代表性。因超导磁体低功耗、高场强优点,可有效应用于晶体生长系统中。由于当前对大尺寸高品质单晶的高需求,未来超导磁体必将全面应用于晶体生长设备。

2 超导磁体设计

电磁设计是磁体应用过程中的基础性工作,根据物理设计目标要求对磁体几何形状及性能进行设计,通过磁场计算使其达到质优价廉的总体目标^[4]。对超导磁体的关键参数研究,涉及超导体及参数、线圈结构与优化、磁屏蔽体厚度、磁芯以及电感储能等的计算。

2.1 导体选择

2.1.1 基本特性

在超导磁体中导体的主要作用为承载电流与产生磁场,要满足高强度机械应力、降低发热的高电导率、便于绕制的延展率、缩短冷却时间的高热导率以及在超导磁体失超过程中及时转移焦耳热^[5],故导体一般选用导热率及硬度较好的铜为基底稳定材料。

NbTi 超导体材料因耐用、成本低、易于加工而应用广泛。而复合型超导线材 NbTi/Cu 有圆线、扁带、镶嵌式扁带结构,如图 2 所示。根据磁体系统需求,选择不同结构的线材。NbTi/Cu 扁带在磁体绕制时排列整齐,间隙小,相比圆线磁场更均匀,铜超比在 4–10 之间,一般用于稳定且安全的低场

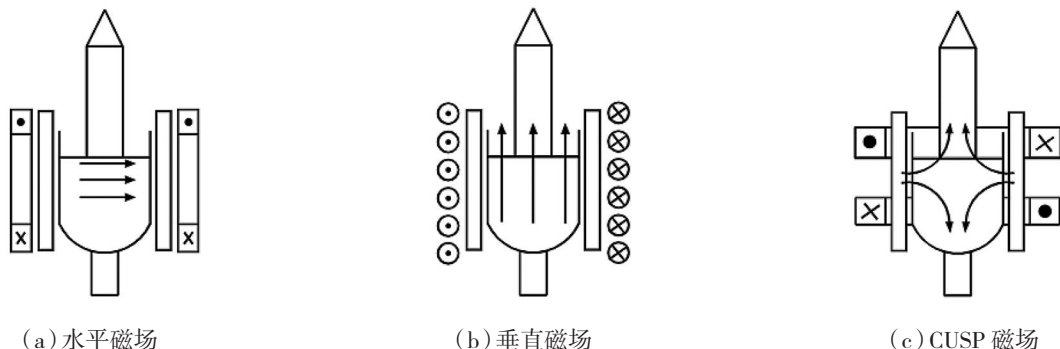


图 1 外加磁场示意图

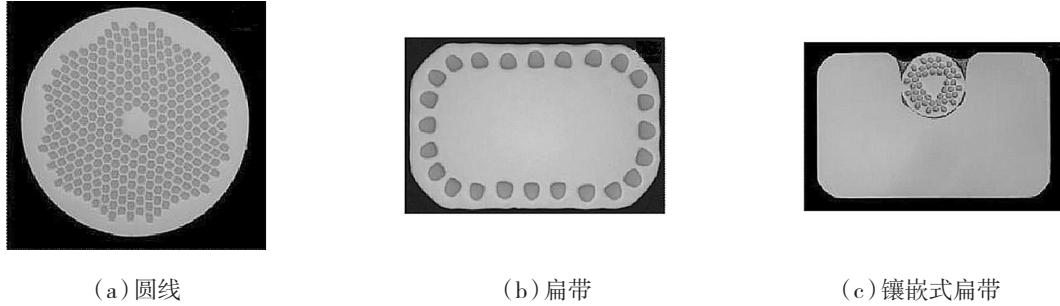


图2 超导线材的三种不同截面

强 ($< 3\text{T}$) 磁体。圆线因低铜超比 ($\text{Cu}/\text{Sc} < 3$), 场强高电流大, 主要用于 NMR 谱仪及高能物理磁体。而镶嵌式扁带一般铜超比大 (> 10), 超导导线通过锡焊与铜槽结合, 可根据要求调节铜槽结构, 设定超导芯丝, 通用性和生产效率较高, 应用最为广泛。

以牛津公司生产的镶嵌式扁带高铜超比 NbTi/Cu 超导体开展单晶硅磁场的研究, 文献 [6] 介绍 NbTi/Cu 的临界电流密度 J_c 与场强 B 的关系, 可依据下列公式:

$$T_c = 9.8 \times \left(1 - \frac{B_m}{14.5} \right)^{0.59} \quad (1)$$

$$J_c = \frac{(5.25 - 0.5 \times B_m) \times 10^9}{(1 + f)} \quad (2)$$

若 $B_m = 4\text{T}$, 则由式 (1) 和式 (2) 可得, $T_c = 8.036\text{ K}$, $J_c = 1.47 \times 10^9\text{ A/m}^2$ 。

2.1.2 参数

由于磁体装置属低电压、大电流、大功耗设备, 在满足场强设计要求的基础上还需考虑功耗, 由此确定合适的电流大小和线圈导线面积是关键。

由物理学知识可得单个线圈功率的计算公式:

$$P = I^2 R = 2\pi\rho \frac{rN}{S} I^2 = K \left(\frac{IN}{S} \right) \quad (3)$$

式中: ρ 为电阻率, r 为半径, N 为匝数, S 为导线面积, I 为电流。其中令 ρr 为 K , 从公式 (3) 可得 P 与 IN 、 I/S 之间为正比例关系, 其中 IN 为安匝数, I/S 为导线的电流密度。确定磁场后, 则可确定安匝数, 根据单晶炉的空间和安匝数 IN 的具体情况, 综合考虑导线面积、电流大小、匝数。选 NbTi/Cu 矩形镶嵌式扁带超导导线的截面积为 3.2 mm^2 , 额定

工作电流为 150 A , 匝数 $9\,000$ 匝作为安匝配合。超导体的截面图如 3 所示。

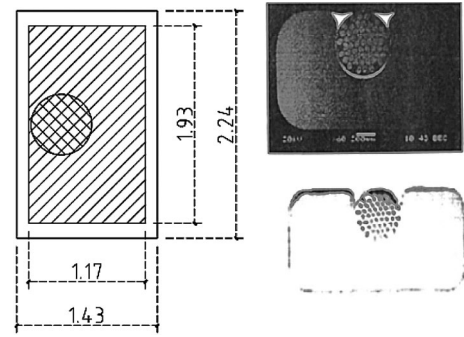


图3 超导体截面

2.2 线圈结构及参数

为配合单晶炉使用, 使磁体易于调节、所占空间位置更小, 提出了一种整体呈圆弧瓦状线圈, 采用 NbTi/Cu 复合矩形线密绕而成。线圈由两条载流直导线与两个弯道弧形构成瓦状, 其内任一点空间磁场可视为直导线部分与弯道弧形部分产生的磁场矢量和。

空间直导线内任一点 P 产生的磁场可由 Biot-Savart 定律计算 [7]:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi d} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (4)$$

式中: μ_0 为磁导率 ($4\pi \times 10^{-7}\text{ H}\cdot\text{m}$); I 为电流, 单位 A ; d 为线间距离, 单位 mm ; θ_1 、 θ_2 为线与点 P 、线端点连线之间的夹角。设导线长为 $2a$, 两条线距离为 $2b$, 它们之间的对称中心为原点, 可得:

$$d = \sqrt{Z^2 + (b-y)^2} \quad (5)$$

$$\cos\theta_1 = \frac{a+x}{\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} \quad (6)$$

$$\cos \theta_2 = -\frac{a-x}{\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} \quad (7)$$

由此可得,一条直导线在 P 点产生的磁场为:

$$B_{11} = \frac{\mu_0 I (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{4\pi \sqrt{(b-y)^2 + Z^2}} \quad (8)$$

同理,线圈对称的另一条导线在 P 点产生磁场为 B_{12} ,则 $B_1=B_{11}+B_{12}$ 即为线圈直线部分在 P 点产生的磁场大小。

圆弧线圈中电流元在空间任一点 P 产生的磁场可分解为与坐标轴平行及垂直的分量。由毕奥萨伐尔定律可得单一圆弧线圈在 P 点产生的磁场:

$$B_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl}{r_1^2} \sin \theta = \frac{\mu_0 I Z b}{4r_1^3} \quad (9)$$

式中: r_1 为 P 点与其中一条弯道的距离,且:

$$r_1 = \sqrt{Z^2 + \left(a-x + \sqrt{b^2 - y^2}\right)^2} \quad (10)$$

同理可得另一侧弯道磁场分布。进行矢量叠加可得到弯道部分在空间 P 点产生的磁场,即为: $B_2=B_{21}+B_{22}$,则整个瓦型线圈内部的磁场为 B_2 与 B_1

的矢量之和。根据磁场数学模型,结合赫姆霍兹线圈产生高均匀场强的尺寸关系(线圈半径等于线圈间中心距)与单晶炉结构尺寸约束,由系统容量预估出初值,初定弯道内弧半径为 1050 mm,直导线段距离 1200 mm。

3 磁场分析

为了验证线圈结构设计的合理性,借助数值分析获得坩埚区域的磁场分布,并通过软件对磁场结构参数进行分析优化。

3.1 建立模型

磁体主要包括线圈和中心坩埚部分,依据初值参数建模,切分处理形成规整六面体网格,如图 4(a)、(b)所示。坩埚硅溶体与线圈的相对磁导率为 1,加载电流为 $150 \times 9\,000$,如图 4(c)所示。

3.2 结构优化

3.2.1 磁场结构对场强的影响

在导体直流电 150 A、匝数 9 000 的条件下,分别计算一对瓦状线圈与两对瓦状线圈正交式结构和非正交式结构的磁场,研究初值参数相同前提下,哪种结构最有利于抑制坩埚内的熔体对流。三维模拟模型如图 5 所示,具体数值求解结果见表 1。

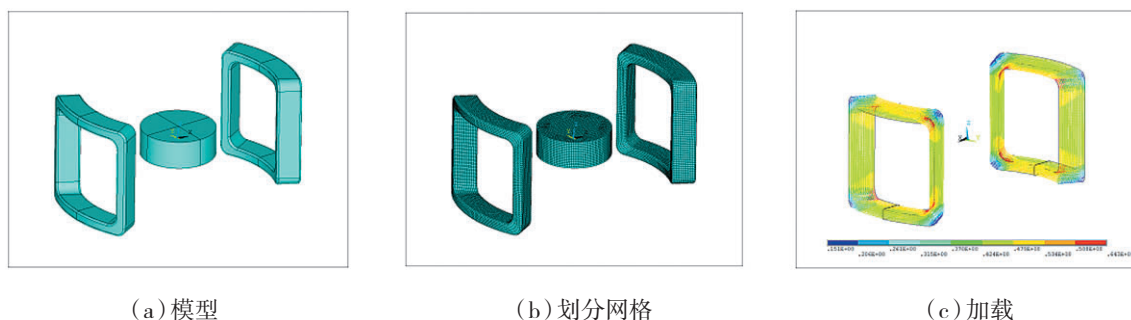


图 4 磁场计算模型



图 5 磁场三维结构图

表 1 结构对磁场的影响

项目	电流 (A)	匝数	磁场强度 (T)
一对瓦状线圈	150	9 000	0.42
两对正交瓦状线圈	150	9 000	0.57
两对非正交瓦状线圈	150	9 000	0.61

从表 1 可以看出,在结构参数相同的情况下,线圈对数增加,场强变大。为满足物理设计目标,选择两对线圈。两对线圈时,非正交式结构产生的场强值更大,提高了 7%。因为非正交式结构磁场由一个线圈与另外线圈的一部分矢量叠加,大于由一个线圈的电磁效应生成的正交式结构磁场。单晶生长系统中磁场的作用是抑制熔体对流,场强越大,抑制效果越佳,则生长的晶体品质越高。故非正交式结构更能有效抑制对流,结构优越性更佳。

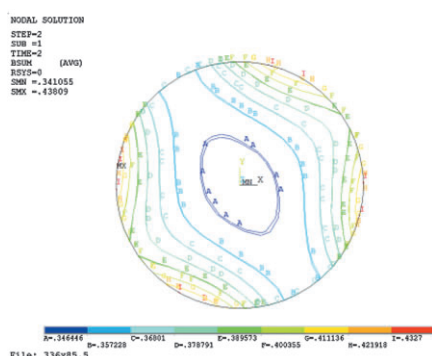
3.2.2 线圈截面结构对场强的影响

选取非正交式瓦状线圈结构,给定直流电 150 A、匝数 9 000,通过分析线圈截面不同的纵横匝数排布对磁场强度的影响,进而优化线圈截面尺寸,得到坩埚区域的磁场强度分布情况如图 6 所示,具体数值如表 2 所示。

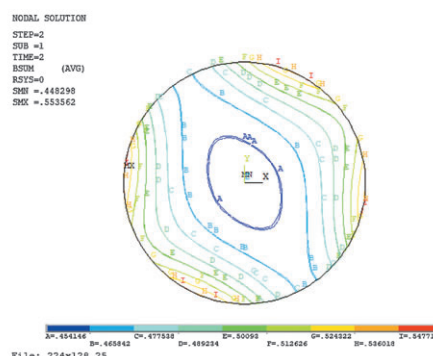
表 2 匝数排布对磁场的影响

匝数排布	150 × 60	100 × 90	90 × 100	50 × 180
线圈截面 (高 × 宽)	336 × 85.5	224 × 128.25	201.6 × 142.5	112 × 256.5
磁场强度	0.34–0.43	0.44–0.55	0.46–0.57	0.51–0.61
磁场相对 变化率	0.26	0.25	0.24	0.19

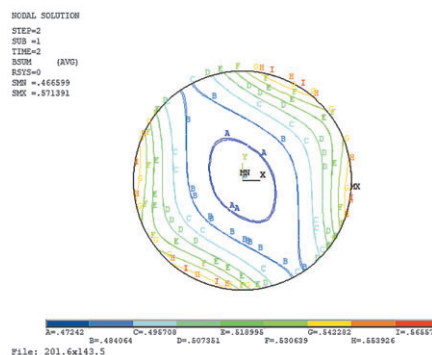
根据表 2 计算结果可以看出,场强 B 随不同纵横向绕线层数而变化。当匝数排布为 50×180 (线圈截面的尺寸为 112×256.5) 时,坩埚中心处最低场强值达 0.5T,且坩埚区域磁场的相对变化率最低,均匀性最好,因单匝线圈对场强 B 的影响因素主要包括距离和角度两者。线圈纵向匝数更靠近坩埚内壁面,产生的 B 值大,但每匝线圈在水平方向角度变大,产生的水平方向分量 B 值减小,反之横向匝数变化。场强 B 也随距离和角度的变化而变化^[8]。为确认如何排布此新型瓦状结构线圈最为合理,本节对比了不同排布下的数值求解结果,选取匝数排布为 50×180 ,线圈截面尺寸为 112×256.5 mm,直流电为 150 A,匝数 9 000 的非正交式瓦状线圈结构作为最终优化参数。



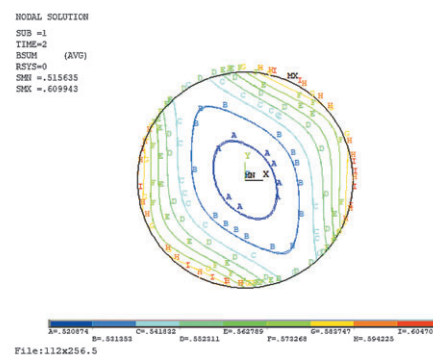
(a) 匝数排布 150 × 60 时的磁场强度等值线图



(b) 匝数排布 100 × 90 时的磁场强度等值线图



(c) 匝数排布 90 × 100 时的磁场强度等值线图



(d) 匝数排布 50 × 180 时的磁场强度等值线图

图 6 磁场强度分布等值线图

3.2.3 磁屏蔽体厚度对漏磁的影响

根据线圈圆弧形结构采用圆筒形磁屏蔽体,包括上下环形盖和侧壁。选取导磁性良好的 DT4E 型纯铁材料减小磁体漏磁及对周围电磁设备和人的影响。屏蔽体厚度可降低漏磁,但过厚会加大成本与体积,在选取厚度时应综合考虑磁体磁通量大小、线圈空间体积和材料生产成本等因素^[9]。通过数值求解计算,分析厚度与漏磁的影响,得到厚度与场外 50 mm 处漏磁之间的关系,如图 7 所示。

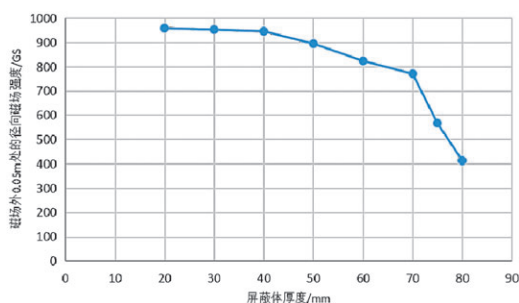


图 7 屏蔽体厚度与磁场外 0.05 m 处磁场强度

由图 7 可知,厚度增加,漏磁强度降低。在综合考虑各因素的基础上,以中心场强大于 5000GS、侧屏蔽体外 50 mm 处的场强小于 600GS 为标准,最终确定屏蔽体厚度为 75 mm。

3.2.4 磁芯高度对坩埚场强的影响

磁屏蔽体厚度增加可提高内部场强,鉴于设计的磁体结构尺寸大,75 mm 厚的磁屏蔽体对坩埚场强的影响甚微。为有效提高坩埚区域场强,给线圈加入 DT4E 型纯铁磁芯,磁芯相离的一端通过磁屏蔽体侧壁连接构成磁回路。磁芯横截面积越大,场强越高,本节选定磁芯内弧半径 850 mm,外弧半径即磁屏蔽体侧壁内径 1 400 mm,优化磁芯高度。作为大尺寸组件,尺寸过小会限制磁通量,过大会增加成本,只有在磁通量接近饱和时认定为合适尺寸。磁路结构如图 8,数值分析结果如图 9。根据场强数值增势趋于饱和,最终选取磁芯高度为 400 mm。

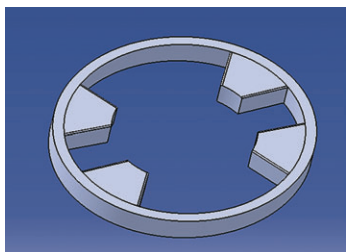


图 8 磁路结构图

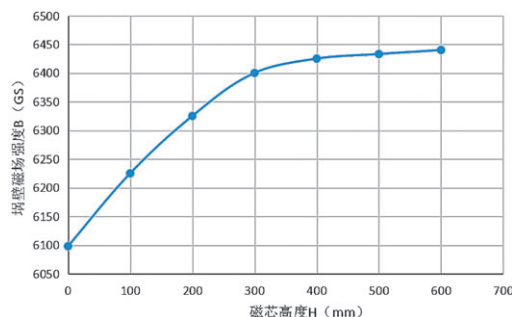


图 9 磁芯高度与坩埚磁场强度变化图

3.3 电感与储能

载流线圈中电磁参数电感大小是指通过线圈的磁通磁链与磁场回路的电流正比比值,它的计算结果是分析和工艺参数优化的基础。由于电感使磁场具有能量,能量分布于整个磁场空间。借助数值求解软件查看磁体储能,线圈的总能量为 $0.326\ 57 \times 10^6$ (J),通过线圈电感与线圈总能量的关系可得瓦状线圈的电感值为 29 H。

综上所述,单晶炉外加磁体的主要结构参数以及在正常运行过程中电磁参数的相关计算结果如表 3 所示。

表 3 磁体线圈结构参数与运行中的主要电磁参数

线圈弯道内弧半径 (mm)	1 050
线圈弯道外弧半径 (mm)	1 306.5
弯道圆弧弧度 (°)	58
直导线段距离 (mm)	1 200
线圈数量	4
非正交式夹角 (°)	118
磁体最高场强 Bmax (弯角处) (T)	3
运行电流 Iop (A)	150
线圈所受最大电动力 (N)	1 214
中心区域的磁场 (T)	0.5
线圈电感 / 储能 (H/J)	29 H/32.6 KJ

(注:不加非线性电磁材料)

4 磁场数值分析

图 10 为优化结构内部的磁感应强度矢量分布。DT4E 电工纯铁磁芯使磁通量集中于磁路中,有效降低磁损耗、增强内部场强。单晶生长系统中坩埚区域的磁场分布情况是磁体最为关键的部分,包括坩埚边、坩埚中心、液面下适当距离处的磁场强度及均匀度。图 11 是坩埚区域内场强矢量俯视图,整体呈水平且强度均匀的横向磁场,磁力线垂直于

晶体生长轴。由磁效应及安培定律知,线圈与坩埚边最为贴近,场强最大。随着距离加大,空气磁阻增强,场强逐渐变小,至中心处最小。

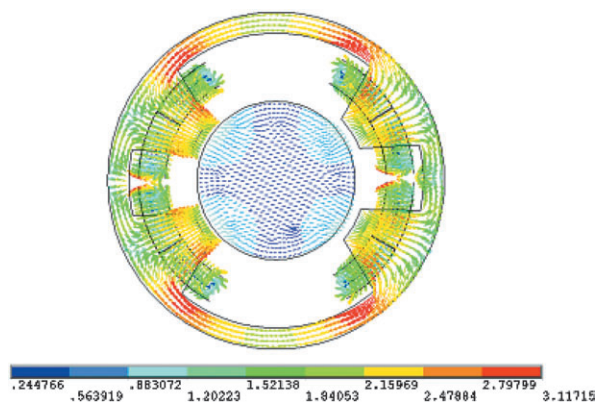


图 10 整个模型磁场强度矢量分布

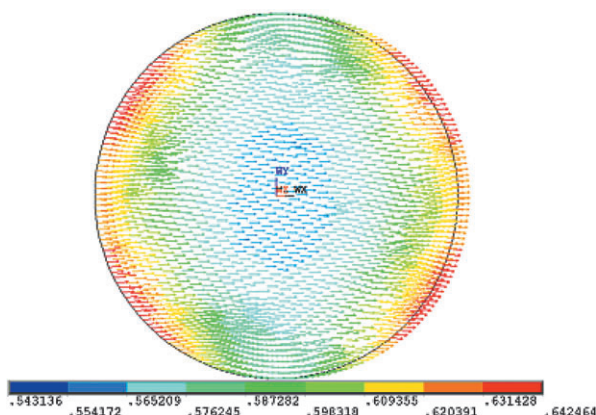


图 11 坩埚区域磁场强度矢量分布俯视图

以上从场强矢量图定性分析磁场分布,下面在坩埚区域定义出两条关键路径,定量分析磁场的具体分布,并对比有无磁芯下的场强大小。以坩埚中心为原点,在坐标轴上定义出两条路径,X轴两边各取 400 mm,磁场强度设为 BX,在 Z 轴上下各取一段距离场强为 BZ,分析各路径上磁感应强度的分布。

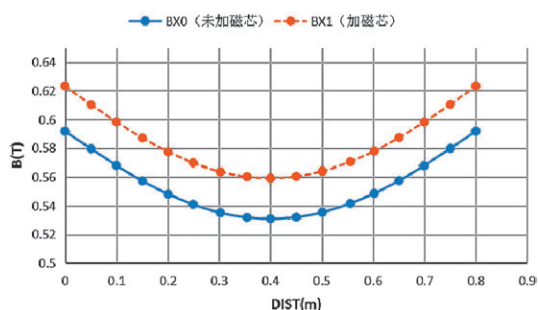


图 12 X 轴坩埚区域磁场强度分布曲线

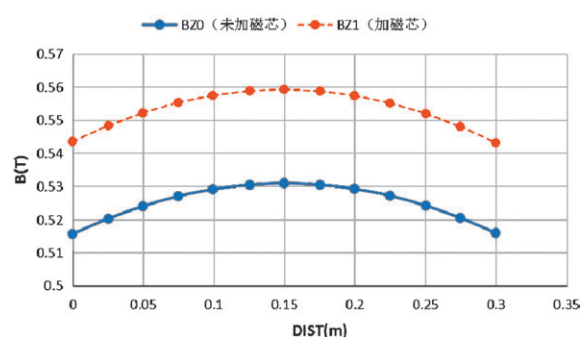


图 13 Z 轴坩埚区域磁场强度分布曲线

在图 12 中,坐标横轴代表 X 轴上定义的路径,总长度为 800 mm,中间 400 mm 处代表坩埚中心,0 mm 处和 800 mm 处代表 X 轴上坩埚边区域。从图中可明确看出:

- (1) B 关于原点中心对称;
- (2) 坩埚边区域 B 值最大,能有效抑制坩埚壁自下而上的自然对流,降低杂质氧。坩埚中心处 B 值最小,使得晶棒下的溶液搅拌,混合均匀,满足场强分布要求;
- (3) 磁场强度从坩埚边至坩埚中心线性减小;
- (4) 磁力线通过高导磁率磁芯,有效聚集引导磁感线提高内部场强,加磁芯后 X 轴上 B 接近等比例增长,增幅约 5.33%。由于磁场的对称性,Y 轴分布规律与 X 轴相似。

在图 13 中,坐标横轴代表 Z 轴上定义的路径,总长度为 300 mm,中间 150 mm 处代表坩埚中心处液面,0 mm 处和 300 mm 处代表液面上下区域。从图中可明确看出:

- (1) B 关于原点中心对称;
- (2) 坩埚中心液面处 B 值最大,液面上下大约 50 mm 区域内 B 值变化相对两边区域变化平缓均匀,具有较高磁场均匀度,更有效抑制热对流,保证单晶硅纯度、杂质均匀度,提高晶体品质;
- (3) 随着距离的增大,磁场强度线性减小;
- (4) 同样在有磁芯情况下,Z 轴上内部场强可接近等比例增强,增幅约 5.28%。因硅熔体液面中心处的 B 值影响该处毛细对流对硅熔体内部氧的蒸发和晶体纵向均匀性,故要求 B 值尽可能小,所以一般磁场中心面取在坩埚中心液面下 30–50 mm。

(下转第 104 页)

- construction risk assessment[J]. Journal of Management in Engineering, 2000, 16(1): 59-69.
- [8] Grimsey D, Lewis M K. Evaluating the risks of public private partnerships for infrastructure projects[J]. International Journal of Project Management, 2002, 20(2): 107-118.
- [9] Loosemore M, Raftery J, Reilly C, et al. Risk Management in Projects[M]. Routledge, 2012.
- [10] Rashed A, Alam M M, Ibrahim Y B. Central public-private partnership (PPP) development facility for enhancing government obligation and efficiency in PPP project[J]. International Journal of Information Technology Project Management, 2020, 8(4): 66-77.
- [11] Alireza V, Mohammadreza Y, Zin R M, et al. An enhanced multi-objective optimization approach for risk allocation in public - private partnership projects: a case study of Malaysia[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2014, 41(2): 164-177.
- [12] 王军武, 余旭鹏. 考虑风险关联的轨道交通 PPP 项目风险分担演化博弈模型[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(9): 2391-2405.
- [13] 方宏伟, 李长洪, 纪洪广, 等. 基于粗糙商集的模糊隶属度集值统计算法[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(8): 959-965.
- [14] 敖慧, 朱茜, 朱玉洁. 农村基础设施 PPP 项目的风险分担[J]. 统计与决策, 2020, 36(8): 173-176.
- [15] 张波, 秦鲁豫. 无废城市法律问题研究[J]. 河北环境工程学院学报, 2021, 31(2): 72-76.
- [16] 郑凯方, 温宗国, 陈燕. “无废城市”建设推进政策及措施的国别比较研究[J]. 中国环境管理, 2020, 12(5): 48-57.
- [17] Li B, Akintoye A, Edwards P J, et al. Perceptions of positive and negative factors influencing the attractiveness of PPP/PFI procurement for construction projects in the UK[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2005, 12(2): 125-148.
- [18] 温宗国. “无废”理念及“无废城市”建设[J]. 资源再生, 2020(10): 58-61.

(上接第 73 页)

5 结论

提出一种用于直拉单晶炉的外加新型超导磁体, 通过数值分析得出如下结论:

(1) 该新型瓦状线圈整体呈圆弧形, 且易于调节, 所占空间位置更小, 采用 NbTi/Cu 复合矩形线密绕而成, 满足单晶硅生长所需的磁场强度 (最低 0.5T) 及分布要求。

(2) 借助数值分析确定瓦状线圈的结构及匝数排布, 磁屏蔽体厚度、磁芯高度与磁场强度的关系, 选定超导线圈安匝数为 $150 \times 9\ 000$ 、匝数排布为 50×180 、圆筒形磁屏蔽体厚度为 75 mm、磁芯高度为 400 mm 的非正交式结构, 坩埚区域磁场均匀度达到 8.5%, 满足单晶炉磁场基本要求。

(3) 分析结果显示磁芯能够有效增强坩埚区域内部场强。X/Y 轴场强在中心处最小, 坩埚边处最大; Z 轴场强在中心处最大, 在固液面上下一定区域内变化平缓均匀。实际使用中磁场中心面一般取坩埚中心液面下 30-50 mm。

参考文献:

- [1] 孙姝. 单晶硅生长技术及氧缺陷控制方法[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2015(10): 272.
- [2] 滕冉. 大直径硅单晶的制备与数值分析[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2017.
- [3] 王伟, 朱浩, 王力, 等. 地面与微重力环境下冷原子量子磁性的精密测量[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(7): 87-104.
- [4] 杨亦霖, 丁先庚, 李瑾. 传导冷却型匀场超导磁体的研制[J]. 低温与超导, 2020, 48(10): 45-48.
- [5] 刘旭峰, 杜世俊, 叶民友. 聚变堆用 Nb₃Sn 超导磁体设计分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(8): 1183-1187.
- [6] 何宇新. 极低温-高压/高应变率下 Nb₃Sn 材料的力学响应分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [7] 邝向军. 任意四边形载流线圈的空间磁场计算[J]. 大学物理, 2017, 36(4): 28-31.
- [8] 侯东斌. 超导磁场的结构设计及优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [9] Fujita S, Hiruma S, Igarashi H. Time-domain analysis of magnetically shielded wire coils using homogenized finite-element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(2): 1-4.