

文章编号: 1006-4710(2012)01-0013-07

非对称勾形磁场的三维优化设计与实现

焦尚彬, 刘丁

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 根据坩埚内熔体对流的类型和分布区域, 分析控制对流对勾形(cusp)磁场磁感应强度和磁场位形分布的要求, 提出了磁场优化设计目标。采用有限元三维(3D)建模法对cusp磁场进行了建模, 利用所建立的模型对比了对称结构和非对称结构对磁场位形分布的影响, 分析了在非对称cusp磁场线圈横向层数一定的情况下磁场纵向层数、屏蔽体厚度、上下线圈间距对磁感应强度、磁场位形、磁场功率的影响, 优化了磁场结构; 根据优化的结构参数制造了磁场并进行了实验测试, 结果表明非对称cusp磁场的位形分布与设计结果一致, 从而验证了3D优化建模方法的有效性。

关键词: 勾形磁场; 非对称结构; 三维模型; 结构优化

中图分类号: TP13

文献标志码: A

3D Optimization Design and Realization of the Asymmetric Cusp Magnetic Field

JIAO Shangbin, LIU Ding

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In this paper, the requirements of the intensity and distribution of cusp magnetic flux density to control the convection are analyzed according to the type and distribution area of this convection in crucible, on the basis of which the optimization design goal is proposed. The simulation model of cusp magnetic field is built by the finite element with three dimension (3D) modeling method. The established model is used to contrast the effect of symmetrical structure and asymmetric structure upon the magnetic field shape distribution and also to analyze the magnetic field longitudinal layers, shield body thickness and the effect of up-and-down coil distance upon magnetic flux density, magnetic field shape and magnetic field power in the case of the fixed horizontal layers of asymmetric cusp magnetic field coils, so as to optimize magnetic field structure. Magnetic field is generated in terms of optimized structure parameters, and also, the experimental test is conducted. The results indicate that asymmetric cusp magnetic field shape distribution is found to be in coincidence with the designed results whereby testing that 3D optimal modeling method is of validity.

Key words: cusp magnetic field; asymmetric structure; 3D model; structure optimization

直拉(CZ)法是工业生产单晶硅的重要方法。在生产中随着晶体直径的增大, 坩埚直径相应增大加热功率随之升高。因而大石英坩埚要比小石英坩埚承受更高的温度, 熔体内的热对流加剧, 石英坩埚和熔体硅的反应加剧, 产生更多的SiO。氧的浓度是决定硅片质量的重要因素之一, 在晶体生长中过多的氧会引起位错环、氧沉淀等热诱发缺陷。同时, 超大规模集成电路的发展要求减少硅单晶的缺陷和杂质含量, 提高氧、碳等杂质以及掺杂剂在晶体中分布的均匀性。晶体中氧的浓度及均匀性与熔体的流

动状态密切相关, 在晶体生长设备中施加磁场是减少大直径单晶硅生长中熔体内强烈对流的有效方法。研究发现, 轴向磁场破坏了直拉生长系统原有横向热对流的对称性^[1-6]引起了严重的径向分凝, 单晶棒出现生长条纹。具有非均匀磁力线分布的cusp磁场是解决上述问题的有效方案^[7]。

主炉室和坩埚直径不同的单晶炉cusp磁场结构参数有较大差异, 因此必须进行模拟计算优化结构参数以指导磁场的设计加工。文献[8]~[10]采用有限元二维(2D)建模进行结构优化取得了一定

收稿日期: 2011-09-12

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2009X02011001); 教育部科学技术研究重点项目基金资助项目(2012K0169)。

作者简介: 焦尚彬(1974-), 男, 四川宣汉人, 博士, 副教授。研究方向为智能状态检测、单晶炉磁场优化设计与控制。

E-mail: jiaoshangbin@xaut.edu.cn。

成果。但该方法是将平面某一点的磁感强度求出,推广认为其它与该点处于同一高度且半径相同的点的磁感应强度均相同,为了简化约束条件建模时不考虑磁场冷却水出口处屏蔽体开口对磁力线分布的影响,因而该方法存在一定缺陷。而有限元三维(3D)建模能够对磁场不同位置的点进行单独计算,可直观分析 cusp 磁场结构变化对磁力线分布及磁感应强度的影响。

本研究以 MCZ-120 型单晶炉为研究对象,在分析 cusp 磁场抑制对流原理的基础上确定了磁感应强度参数,采用有限元 3D 建模方法对 cusp 磁场进行了建模,分析了对称和非对称结构 cusp 磁场磁感应强度的分布规律,选择非对称 cusp 磁场结构进行结构优化,根据优化的结果试制了磁场并应用于生产 65~90 nm 线宽设计的 IC 级硅单晶,有效抑制了硅熔体的流动状况,改善了单晶的品质。

1 cusp 磁场抑制对流原理及磁场强度参数确定

在直拉硅单晶生长系统中,不均匀的热场、重力、自由表面张力及坩埚旋转和晶体旋转等因素造成的热对流、毛细对流、强迫对流对单晶质量起关键作用。这些对流形态相互作用使得硅熔体的流动现象变得相当复杂(特别是大尺寸单晶炉),不仅影响晶体/熔体界面的形状,而且会影响熔体及晶体内掺杂物的浓度分布,因而应对各种对流进行有效地控制^[11]。

硅熔体中的主要流动区域分布见图 1。晶体/熔体界面处的流动区为 I、坩埚/熔体界面处的流动区为 II、自由表面下的流动区为 III、熔体主流区域的流动区为 IV。其中区域 I 的流动非常重要,能将杂质从晶体中带走。减少这种流动将增加晶体的径向均匀性对晶体边界层的敏感性。为了保留此流动磁场在此区域的轴向分量 B_z 要尽量小。熔体内的氧主要是由坩埚的溶解扩散产生,磁场垂直于坩埚壁将抑制平行于坩埚壁的流动 II(热对流和坩埚旋转引起的强迫对流大致平行于坩埚壁),从而减小熔体对坩埚壁的冲刷减少对坩埚的溶解,降低晶体中氧的浓度。磁场施加于坩埚内侧壁熔体区域的径向分量 B_r 和坩埚底部的 B_z 要尽可能大。区域 III 中磁场径向分量减弱了垂直于坩埚侧壁的流动,导致自由面下方的水平流动减弱。而毛细对流的方向和磁场磁力线方向平行因而不被抑制,则从坩埚壁进入熔体中的氧有 99% 从自由表面以 SiO 的形式挥发被氩气带走,所以低氧熔体进入区域 I 和 IV;熔体

的主体区域 IV 是多种对流的相互渗透, B_r 和 B_z 能使各种流动缓慢地混合^[12]。因此 cusp 磁场施加于坩埚内侧壁熔体面区域的径向分量最大值 B_{rmax} 、坩埚底部轴向分量最大值 B_{zmax} 和自由面附近的轴向分量 B_{z0} 是磁感应强度的关键参数。cusp 磁场抑制熔体内的热对流的程度为^[12]:

$$H_a = \left(\frac{\delta}{\rho\nu} \right)^{\frac{1}{2}} (\mu H_0 d) \quad (1)$$

其中, ν 是导电系数, μ 是磁导率, H_0 是磁感应强度(T), d 是坩埚直径(cm)。

对于大部分的半导体和金属材料,有:

$$H_a = 260 H_0 d \quad (2)$$

当 H_a 值达到 2000 以上时磁场就能很好地抑制区域 II 的对流。由式(2)的计算可知对于直径 81 cm 的坩埚,磁感应强度 B_{rmax} 和 B_{zmax} 需要在 0.12 T 以上。而要使自由面上的毛细对流不被明显抑制,则要求区域 III 对应的磁感应强度轴向分量 B_{z0} 小于 0.02 T^[13]。

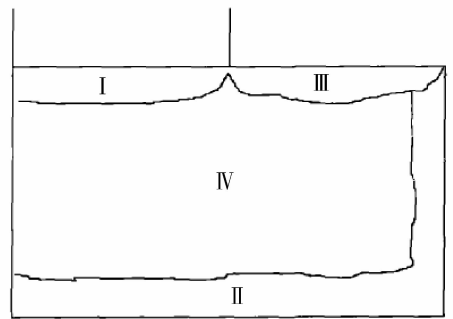


图 1 熔体中四个区域的流动
Fig. 1 Flow of the four regions in melt

2 非对称 cusp 磁场结构参数三维优化设计

本研究以生产 $\Phi 300$ mm 硅单晶的 MCZ-120 单晶炉为研究对象,主炉室外径为 1 320 mm,坩埚直径为 81 cm。磁场结构优化的目标为使磁场在坩埚内壁零高斯界面处的磁感应强度径向分量 B_r 大于 0.12 T(对直径 81 cm 坩埚,其高度约为 430 mm,则坩埚底部磁感应强度轴向分量 B_z 远大于 0.12 T),且在零高斯界面处附近一个较宽的区域磁感应强度轴向分量 B_z 小于 0.02 T。

2.1 cusp 磁场 3D 建模

3D 建模优化分析过程为首先定义磁场的相关参数,接着分配模型的单元属性和材料属性,磁场内部的薄层空气和磁场屏蔽体采用实体单元 SOLID98 划分,磁场外部的远场空气用 INFIN47 划分,而线圈则用微单元 SOURCE36 建模。对各区域划分网格以屏

蔽体—空气层—远场的顺序进行网格划分,屏蔽体、远场采用映射网格划分,空气层采用自由映射网格划分;对模型加边界条件,采用标量势法中的微分标量势法(DSP)进行求解分析^[14]。3D模型结构见图2。

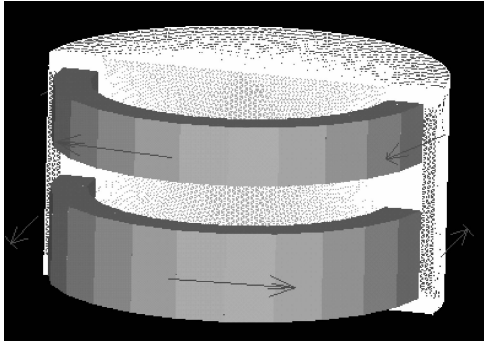


图2 cusp 磁场 3D 模型

Fig.2 The 3D model of cusp magnetic field

2.2 结构参数的优化

文献[13]从功耗最小的角度优化计算得到了线圈和冷却通水口规格参数分别为 14 mm × 14 mm 和 6 mm × 6 mm。线圈的横向层数在受限于冷却水

路数和线圈绕制方法的情况下,3D 优化的方法和优化结果与本文相同。本研究以有利于控制熔体对流的磁感应强度和磁场位形分布为优化目标,对线圈的非对称结构参数、线圈间距、屏蔽体厚度做进一步的优化分析。

2.2.1 对称结构和非对称结构对磁场分布的影响

假定磁场总的纵向层数为 50,线圈内径为 1 370 mm,磁场的中心面定义为上下部线圈间距的中点,其它结构参数不变。在施加电流相同的情况下,上下两组线圈纵向层数比分别为 1:2、2:3、1:1 时 cusp 磁场在坩埚壁处磁感应强度径向分量和轴向分量沿坩埚壁的分布曲线分别如图 3,图 4,图 5 所示。从磁感应强度的分布曲线可以看出,上下线圈纵向层数比的增加会引起磁感应强度分布发生变化,即:坩埚壁 B_{rmax} 所处位置不断从坩埚下部向磁场中心面移动;坩埚壁 $B_z \approx 0$ 的面(即零高斯面)从磁场中心面上部不断向中心面移动;坩埚壁 B_{rmax} 不断增加,坩埚壁 B_{zmax} 不断减小;当上下线圈纵向层数比为 1 即为对称结构时,零高斯面与坩埚壁 B_{rmax} 所处位置重合在磁场中心面处。

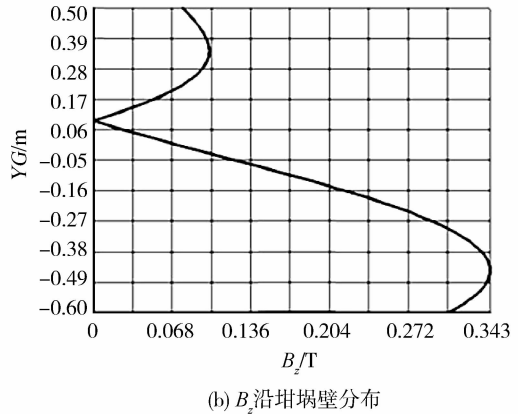
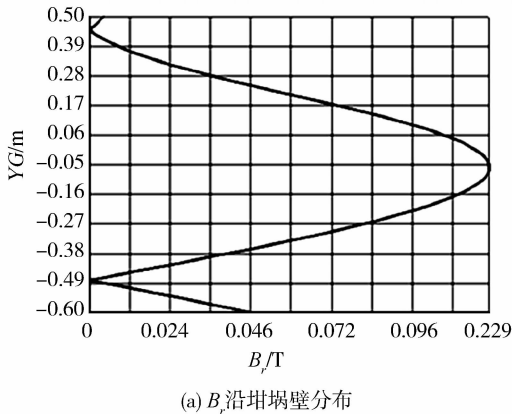


图3 上下线圈纵向层数比为 1:2 时磁场沿坩埚壁的位形分布

Fig.3 The shape distribution of the magnetic field in the crucible wall when the ratio of top-and-down coils is 1:2

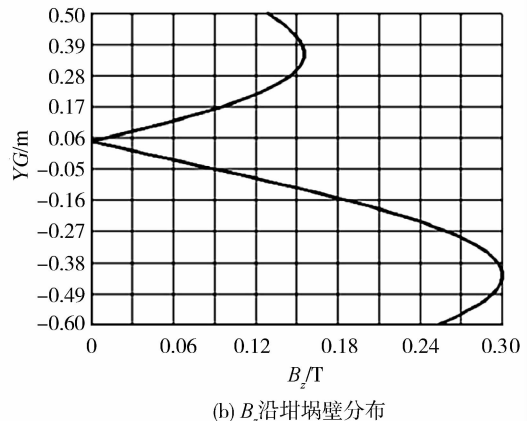
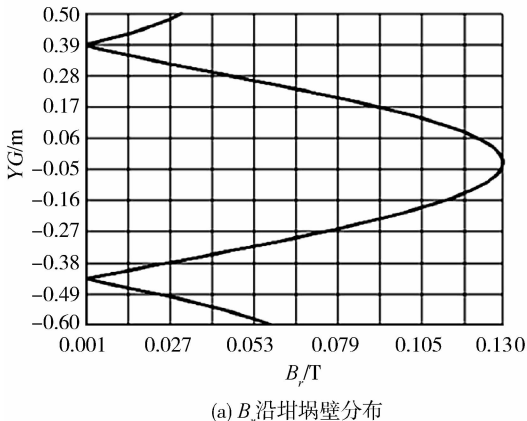


图4 上下线圈纵向层数比为 2:3 时磁场沿坩埚壁的位形分布

Fig.4 The shape distribution of the magnetic field in the crucible wall when the ratio of top-and-down coils is 2:3

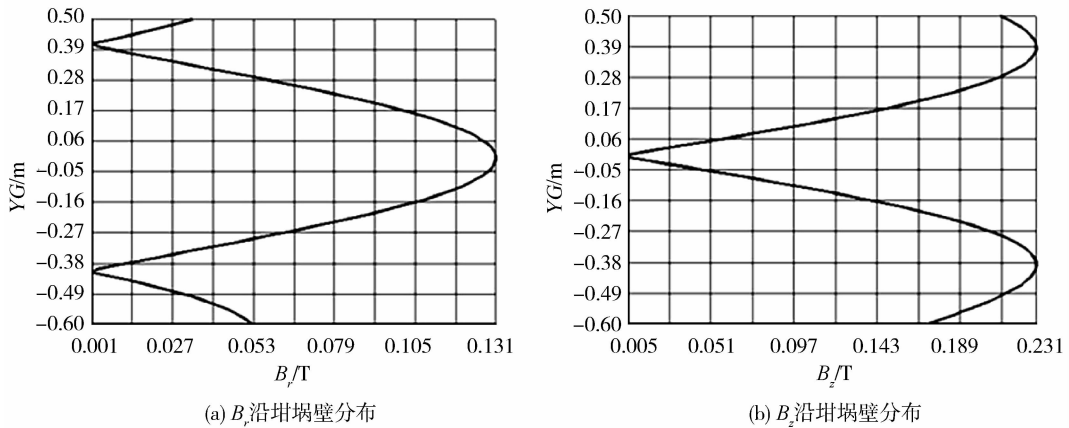


图5 上下线圈纵向层数比为1:1时磁场沿坩埚壁的波形分布

Fig. 5 The shape distribution of the magnetic field in the crucible wall when the ratio of top-and-down coils is 1:1

当采用纵向层数比为1:1的对称结构时,零高斯面与坩埚壁 B_{rmax} 所处位置重合于磁场中心面处。实际使用时磁场的中心面处于硅熔体液面下20~30 mm处,如此可以有效利用中心面处最大的径向分量来抑制熔体的热对流以减少对坩埚壁的冲蚀,但是此时熔体的液面处存在一定的轴向分量(约为0.04 T),自由表面的毛细对流将受到抑制,不利于熔体中SiO的蒸发,所以对称结构并不是抑制熔体流动的理想结构。而对于上下线圈纵向层数比为1:2和2:3的非对称结构, B_{rmax} 所处位置在磁场中心面的下方,零高斯面在磁场中心面的上方,将零高斯面与生长自由面重合,毛细对流将不被抑制,而处于自由面下方的 B_{rmax} 能充分抑制热对流。这种在纵向层数相对固定的情况下,通过减少上下部磁场线圈纵向层数比的非对称结构以实现 B_{rmax} 满足设计要求情况下零高斯面的上移,既利于对流的抑制又可减少主炉室高度。但对于纵向层数比为1:2的情况,磁场径向分量最大的点与零高斯面相距为70 mm,且轴向最大值较大、径向最大值偏小,不利于对流的控制;而对于纵向层数比为2:3的情况,磁场径向分量最大的点与零高斯面发生较小的偏移(约为30~40 mm),径向分量最大较前两种情况有较大增加,能

较好地满足设计指标,因此磁场采用上下线圈纵向层数比为2:3的非对称结构较合适。

2.2.2 磁场非对称结构参数的优化

当确定了磁场采用上下部线圈层数比为2:3的非对称结构后,在满足磁场总高度(受主炉室高度的限制要求小于1200 mm)的约束条件下,根据已有经验设定线圈间距为220 mm、屏蔽体厚度为65 mm,通过改变磁场上下部线圈纵向层数和电流,使cusp磁场满足 $B_r > 0.12$ T和 $B_z < 0.02$ T两个条件的公共区域最大,磁场总功率最小。

由于磁感应强度在一定范围内与安匝数成正比,增加电流和增加线圈匝数都可以增大磁场磁感应强度,而磁场功耗率与线圈电流的平方和线圈匝数(载流面积确定后电阻与线圈铜管长度成正比)成正比,所以在满足磁场总高度约束的情况下通过增加线圈匝数、减小线圈电流来降低磁场功率。分析当上下部线圈纵向层数分别为20×30,20×32,22×30,22×32,20×34,22×34等组合时坩埚壁处磁感应强度径向分量和轴向分量的分布情况,分别求取 B_{rmax} 、 B_{zmax} ,满足 $B_r > 0.12$ T和 $B_z < 0.02$ T的公共区域宽度、磁场功率,结果见表1。

表1 上下部线圈层数对磁场的影响

Tab. 1 Magnetic field influence of different top and down coil layers

磁场参数	组合1	组合2	组合3	组合4	组合5	组合6
上下线圈纵向层数/N	20×30	20×32	22×30	22×32	20×34	22×34
线圈电流/A	700	680	680	650	650	630
磁场高度/mm	111.3	114.3	114.3	117.3	117.3	120.3
磁场的最大径向分量 B_{rmax} /T	0.1283	0.1284	0.1297	0.1278	0.1263	0.1272
磁场的最大轴向分量 B_{zmax} /T	0.2530	0.2650	0.2630	0.2510	0.2710	0.2610
满足 $B_r > 0.12$ T的轴向范围/mm	-107~60	-115~58	-112~74	-109~62	-109~45	-112~56
满足 $B_z < 0.02$ T的轴向范围/mm	24~73	30~80	11~59	16~67	34~88	22~73
满足 $B_r > 0.12$ T和 $B_z < 0.02$ T的轴向范围/mm	24~60	30~58	11~59	16~62	34~45	22~56
公共区域高度/mm	36	28	48	46	11	34
磁场功率/kW	202.13	198.37	198.37	188.23	188.23	183.37

从表 1 计算结果可以看出,对于 22×34 的组合磁场功率最小但高度不满足约束条件;对于 22×30 、 22×32 的组合,坩埚内壁处 $B_r > 0.12 \text{ T}$ 和 $B_z < 0.02 \text{ T}$ 共有区域为 48 mm 、 46 mm ,而此时磁场的总功率分别为 198.37 kW 和 188.2 kW ,二者公共区域相差 2 mm ,但功率却相差 10 kW 。所以确定磁场上下部线圈纵向层数为 22×32 。

2.2.3 线圈间距对磁场分布的影响

在磁场上下部线圈纵向层数为 22×32 、线圈电流为 650 A 的情况下,改变上、下两组线圈间距,计

算 $B_{r\max}$ 、 $B_{z\max}$ 、满足 $B_r > 0.12 \text{ T}$ 和 $B_z < 0.02 \text{ T}$ 的公共区域宽度,分析间距改变对磁场分布的影响,计算结果见表 2。从表 2 数据可以看出,随着线圈间距的增加 $B_{r\max}$ 、 $B_{z\max}$ 以及满足 $B_r > 0.12 \text{ T}$ 和 $B_z < 0.02 \text{ T}$ 的公共区域宽度都在增加,当间距大于 260 mm 后公共区域宽度不再增加,且磁场高度不再满足约束条件。故线圈间距可以在 $220 \sim 240 \text{ mm}$ 之间选取。考虑到间距的增加引起磁屏蔽体高度的增加从而增加磁场重量的问题确定线圈间距为 220 mm 。

表 2 上下部线圈间距对磁场分布的影响

Tab. 2 Magnetic field influence of different distance top and down coil

磁场参数	间距 1	间距 2	间距 3	间距 4	间距 5	间距 6	间距 7
上下两组线圈之间的间距/mm	180	200	220	240	260	280	300
磁场的最大径向分量 $B_{r\max}/\text{T}$	0.126 2	0.127 2	0.127 8	0.128 4	0.128 7	0.128 8	0.128 7
磁场的最大轴向分量 $B_{z\max}/\text{T}$	0.245 0	0.248 0	0.251 0	0.254 0	0.257 0	0.260 0	0.263 0
满足 $B_r > 0.12 \text{ T}$ 的轴向范围/mm	-94 ~ 50	-102 ~ 57	-109 ~ 62	-115 ~ 66	-119 ~ 69	-123 ~ 71	-127 ~ 73
满足 $B_z < 0.02 \text{ T}$ 的轴向范围/mm	20 ~ 69	18 ~ 68	16 ~ 67	16 ~ 65	14 ~ 64	13 ~ 63	12 ~ 62
满足 $B_r > 0.12 \text{ T}$ 和 $B_z < 0.02 \text{ T}$ 的轴向范围/mm	20 ~ 50	18 ~ 57	16 ~ 62	16 ~ 65	14 ~ 64	13 ~ 63	12 ~ 62
公共区域高度/mm	30	39	46	49	50	50	50

2.2.4 磁屏蔽体厚度对磁场分布的影响

在磁场上下部线圈纵向层数为 22×32 、线圈电流为 650 A 、线圈间距为 220 mm 的情况下,改变磁屏蔽体厚度,计算 $B_{r\max}$ 、 $B_{z\max}$ 、满足 $B_r > 0.12 \text{ T}$ 和 $B_z < 0.02 \text{ T}$ 的公共区域宽度、磁屏蔽体外部空间漏磁等,分析屏蔽体厚度改变对磁场分布的影响,结果见

表 3。从表 3 数据可以看出磁屏蔽体厚度在 $60 \sim 70 \text{ mm}$ 之间选取时对磁感应强度、公共区域宽度及漏磁等指标均较优,因此确定屏蔽体厚度为 65 mm 。冷却水口外的屏蔽罩的厚度对磁感应强度及漏磁有一定影响,设计给予了考虑。

表 3 屏蔽体厚度对磁场分布的影响

Tab. 3 Magnetic field influence of shield thickness

磁场参数	厚度 1	厚度 2	厚度 3	厚度 4	厚度 5	厚度 6
磁场屏蔽体厚度/mm	50	55	60	65	70	75
磁场的最大径向分量 $B_{r\max}/\text{T}$	0.124 3	0.125 9	0.127 2	0.127 8	0.128 3	0.128 6
磁场的最大轴向分量 $B_{z\max}/\text{T}$	0.240 0	0.245 0	0.249 0	0.251 0	0.253 0	0.254 0
满足 $B_r > 0.12 \text{ T}$ 的轴向范围/mm	-86 ~ 40	-97 ~ 51	-105 ~ 58	-109 ~ 62	-111 ~ 64	-113 ~ 65
满足 $B_z < 0.02 \text{ T}$ 的轴向范围/mm	12 ~ 62	14 ~ 64	16 ~ 65	16 ~ 67	17 ~ 67	18 ~ 67
满足 $B_r > 0.12 \text{ T}$ 和 $B_z < 0.02 \text{ T}$ 的轴向范围/mm	12 ~ 40	14 ~ 51	16 ~ 58	16 ~ 62	17 ~ 64	18 ~ 65
公共区域高度/mm	28	37	42	46	47	47
距磁屏蔽体 10 cm 处的漏磁/T	0.009 8	0.007 2	0.004 8	0.003 1	0.002 6	0.002 1

3 cusp 磁场的实现和实验验证

根据优化的磁场结构参数设计并制造了一个 cusp 磁场,磁场参数为线圈内径 1370 mm ,上下线圈间距 220 mm ,线圈截面 $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$,线圈绝缘层厚度 $0.8 \sim 1 \text{ mm}$,冷却水管道截面 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,磁场上部线圈 22 层,下部线圈 32 层,横向层数 12

层,屏蔽体厚度 65 mm 。为了能充分冷却线圈,降低电阻,线圈采用了 4 根铜管并绕。同时,为了保证冷却水进水口和出水口均在线圈最外层的外层,用一根铜管绕两层,奇、偶线圈反向绕制以方便线圈的电气连接。实际制造的 cusp 磁场内部结构如图 6 所示。对加工好的 cusp 磁场施加 650 A 电流进行测试,测试点为屏蔽体开口一侧及其对侧,实验结果见

表4。从表4可看出,屏蔽体开口侧比对侧的磁场强度要小,磁场泄漏偏大,通过增加进出水口屏蔽罩



图6 实际的cusp磁场内部结构
Fig. 6 The inner structure of practical cusp magnetic field

厚度可减少泄漏。实验与仿真结果取得了较好的一致性。图7为在cusp磁场环境下生产的单晶。



图7 cusp磁场环境下生长的单晶
Fig. 7 The growing single crystal under cusp magnetic field condition

表4 实验和仿真结果对比

Tab. 4 The comparison of experimental and simulation results

磁场参数	屏蔽体开口侧测试结果	屏蔽体开口对侧测试结果	模拟计算结果
磁场的最大径向分量 B_{rmax}/T	0.125 1	0.129 6	0.127 8
磁场的最大轴向分量 B_{zmax}/T	0.243 0	0.258 4	0.251 0
满足 $B_r > 0.12 T$ 和 $B_z < 0.02 T$ 的轴向范围/mm	40	45	46
距磁屏蔽体 10 cm 处的漏磁/T	0.005 6	0.002 8	0.003 1

4 结 论

分析了控制熔体对流对cusp磁场磁感应强度和磁场位形分布的要求,针对MCZ-120型单晶炉(坩埚直径81 cm)生长300 mm的单晶提出了优化设计目标。

利用有限元3D对cusp磁场进行了建模,利用模型分析了对称结构和非对称结构对磁场分布的影响,确定了磁场的非对称结构,优化了非对称cusp磁场的结构参数。

根据优化的参数制造了cusp磁场进行实验测试,结果表明非对称cusp磁场的位形分布与设计结果一致,验证了所设计优化建模方法的有效性。

将此非对称cusp磁场应用于生长65~90 nm线宽设计的IC级硅单晶,氧、碳等杂质含量及轴向、径向均匀性均得到很大改善,符合项目预定的指标要求。

参考文献:

[1] Series R W. Czochralski growth of silicon under an axial

magnetic field [J]. Journal of Crystal Growth, 1997, 17 (1): 85-91.

[2] 田达晰,杨仁,徐明生,等.直拉硅单晶中轴向均匀性控制[J].材料科学与工程,2000,18(3):105-109.

Tian Daxi, Yang Ren, Xu Mingshen, et al. Control of the uniform in axial oxygen concentration in czochralski silicon crystal growth [J]. Materials Science & Engineering, 2000, 18(3): 105-109.

[3] 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,2005,19(3):249-254.

Li Yourong, Yu Changjun, Wu Shuangying, et al. Effects of an axial magnetic field on silicon crystal czochralski growth [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2005, 19(3): 249-254.

[4] Ozoe H, Iwamoto M. Combined effects of crucible rotation and horizontal magnetic field on dopant concentration in a czochralski melt [J]. Journal of Crystal Growth, 1994, 14 (2): 236-248.

[5] Ravishankar P S, Braggins T T, Thomas R N. Impurities in commercial sale magnetic czochralski silicon axial versus transverse magnetic fields [J]. Cryst Growth, 1990, 10

- (4): 617-628.
- [6] Rudolph P, Frank R C. A new method to grow III-V crystals from melt in travelling magnetic fields[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2003, 16(5): 347-351.
- [7] Hirata H, Hoshikawa K. Three-dimensional numerical analyses of effects of cusp magnetic field on the flows, oxygen transport and heat transfer in a czochralski silicon melt[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1992, 12(5): 181-190.
- [8] 安涛, 高勇, 李守智, 等. 勾形磁场优化设计与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 34(2): 218-223.
An Tao, Gao Yong, Li Shouzhi, et al. Optimum design and realization of cusp magnetic field in mono-crystal furnace[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 34(2): 218-223.
- [9] 高勇, 李波, 安涛, 等. 单晶炉勾形磁场装置结构参数的分析与优化[J]. *人工晶体学报*, 2008, 37(3): 577-582.
Gao Yong, Li Bo, An Tao, et al. Analysis and optimization of structural parameters for cusp magnetic field in mono-crystal furnace[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2008, 37(3): 577-582.
- [10] 焦尚彬, 刘丁, 任宁. 大尺寸单晶炉勾形磁场的优化设计[J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(4): 1035-1040.
Jiao Shangbin, Liu Ding, Ren Ning. Optimization design of the cusp magnetic field of large-size single-crystal furnace[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, 39(4): 1035-1040.
- [11] Erich T, Janis V, Wilfried V A. Application of dynamic and combined magnetic fields in the 300 mm silicon single-crystal growth[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2003, 16(5): 366-371.
- [12] 宇慧平, 隋允康, 张峰翊, 等. 勾形磁场下直径 300 mm CZ Si 熔体中的氧浓度分布的数值模拟[J]. *半导体学报*, 2005, 26(3): 517-522.
Yu Huiping, Sui Yunkang, Zhang Fengyu, et al. Numerical simulation of oxygen transportation in 300 mm diameter CZ silicon crystal growth under cusp magnetic field[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(3): 517-522.
- [13] 徐岳生, 刘彩池, 王海云, 等. 磁场直拉硅单晶生长[J]. *中国科学 E 辑*, 2004, 34(5): 481-492.
Xu Yuesheng, Liu Caichi, Wang Haiyun, et al. Growth of czochralski silicon magnetic field[J]. *Science in China E*, 2004, 34(5): 481-492.
- [14] 孙明礼, 胡仁喜, 崔海蓉, 等. ANSYS 10.0 电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Sun Mingli, Hu Rexi, Cui Hairong, et al. ANSYS 10.0 electromagnetic finite element analysis example guide course[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007.

(责任编辑 李虹燕)