

# MCZ 技术的研究

周士仁 纪彦蜀 孔庆茂 高元恺  
(哈尔滨工业大学)

王守雨 韩长林 傅择国  
(鹤岗市半导体材料厂)

1986年1月30日收到

本文在概述了 MCZ (Magnetic-field-applied CZ) 技术的理论基础上,介绍了由作者们所研制的两种新型 MCZ 硅单晶炉——“Y”形磁场和螺旋管全封闭式非线性磁场硅单晶炉,并在横向分量为 1300G 垂直分量为 700G 的“Y”形磁场中拉制出了 MCZ 硅单晶。对氧含量和掺杂浓度的测量及对微观结构的初步观察表明,所设计的新型磁场单晶炉,可明显地提高硅单晶的掺杂均匀性和结构完整性。

## 一、引言

随着 LSI/VLSI 的发展,人们对硅单晶质量的均匀性要求越来越高,其中尤以对氧的均匀分布要求更甚<sup>[1]</sup>。这是因为氧在硅中的作用既有益<sup>[2]</sup>,又有害<sup>[3,4]</sup>。氧的这种双重作用使不同的器件生产工艺要求提供的硅片,具有特定的氧含量,且要求分布均匀<sup>[5]</sup>。这使得在八十年代初期控制硅中氧,成为单晶生长技术中的一个重要课题,磁场中直拉硅单晶(MCZ)技术就是在这种情况下出现的控制硅中氧分布的技术之一。日本的索尼公司于 1980 年开始将磁场应用到 CZ 硅单晶生长中,获得了适于 VLSI 和高反压大功率器件用的高质量硅单晶<sup>[6-8]</sup>,从而引起了半导体行业的重视<sup>[9-11]</sup>。1982年初,索尼公司宣布有偿转让该技术<sup>[12]</sup>,标志着 MCZ 进入实用阶段,但在磁场形成方面却有两种截然不同的方式:一种是横向磁场 (TMCZ)<sup>[6]</sup>,另一种则为垂直磁场 (VMCZ)<sup>[13]</sup>,二者各有利弊;近来也有人报道了利用倾斜磁场的优越性<sup>[17]</sup>,但这将加大磁极间距而使耗电更多。为改善 MCZ 技术,有必要克服已有磁场的不足,以便从电磁系统的设计制造与炉体的改制,到 MCZ 硅单晶的拉制,获得有意义的新结果。

## 二、MCZ 技术的基本原理

MCZ 技术的基础是磁场对导电流体的热对流之抑制作用。在常规 CZ 法中总是存在热对流的,这种对流是导致硅单晶纵向氧分布不均匀的重要原因;与此同时又因热对流的湍流性质所产生的温度振荡使杂质扩散边界层各处厚薄有异,这是杂质经向分布不均匀的主要原因。

磁场对热对流的抑制作用,可从两方面来解释:

(1) 电学原理。导电流体在磁场中运动,流体的电流微元穿过磁力线,产生作用于其上的安培力:

$$d\mathbf{F} = I(d\mathbf{l} \times d\mathbf{B}). \quad (1)$$

该力的方向恰同电流微元的运动方向相反,因此可阻滞流体的热对流。

(2) 利用流体力学原理的解释<sup>[13]</sup>。在流体力学中表征热对流时,常用瑞利数  $N_{Ra}$ ,有

$$N_{Ra} = \frac{\Delta T \alpha g h^4}{\kappa \nu} \quad (2)$$

(2) 式中  $\Delta T$  是温度梯度,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $g$  为重力加速度,  $h$  是熔体的高度,  $\kappa$  为热传导系数,  $\nu$  为动粘滞系数。

瑞利数  $N_{Ra}$  表征着浮力与粘滞力的比值,当  $N_{Ra}$  大于临界瑞利数  $N_{Ra}^c$  时,浮力大于粘滞力,将产生自然对流;当  $N_{Ra}$  远大于临界瑞利数  $N_{Ra}^c$  时,流体表现为湍流的性质,这即是常规 CZ 法中的情形。由(2)式可见,若降低  $N_{Ra}$ ,除减小液面高度  $h$  外,就是增加  $\nu$  值,而  $h$  的降低是受到拉晶条件限制的,那么增大  $\nu$  值便是关键措施了,对熔硅施加磁场正是获得“增加动粘滞系数”这一效果的重要手段。

### 三、两种新型 MCZ 硅单晶炉的设计与制作

前已提及,现被应用于生产的主要有横向磁场<sup>[6]</sup>和垂直磁场<sup>[13]</sup>,前者对我国当今绝大多数单晶炉的炉体,在无需做很大改动的情况下都可适用,但可能使加热体受力,影响加温且磁铁笨重;而后者则相反,磁场对加热体影响不大,便于保持温场均匀,但在控制氧的均匀分布方面稍差,且不适于侧开门的炉体。而磁力线与液面成 45° 角的倾斜磁场<sup>[17]</sup>,虽克服了前两种情况的不足,但安装较复杂,又使磁极间距增大,这无疑增加了能源的消耗。考虑到上述情况,结合我国具体条件,我们设计制作了两种新型 MCZ 硅单晶炉。

#### 1. “Y”形磁场 CZ 硅单晶炉

为解决横向磁场中加热体变形甚至毁坏的问题,国外采取了改变加热体形状和调整加热体电流等方法<sup>[14]</sup>。为处理这一问题我们设计了具有垂直分量的横向磁场硅单晶炉,并将其称为“Y”形磁场,图 1 是其示意图。由于这种磁场相对于加热体中的电流走向有平行分量,使加热体受力减小。

我们所设计制作的“Y”形磁场硅单晶炉是以横向磁场为基础,对旧有侧开门单晶炉进行改装获得的。这种改装并不甚复杂,其重要问题是除应尽可能以小的功率源获取最大的强度外,应尽可能减少漏磁,例如将有可能影响磁场分布的导磁材料用不导磁材料代替。另外,为满足 Y 形磁场拉晶要求,要在炉体底部的适当位置增加一个磁极。

我们所设计的磁场,横向磁极间距为 440 毫米,铁芯直径为 200 毫米。当然铁芯材料选用了我国当前导磁系数尽可能高的磁性材料,这有益于防止过早磁饱和。在 6kVA 下测试

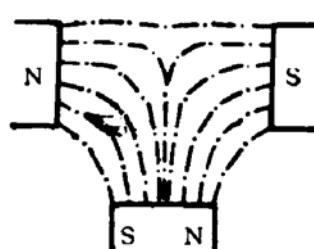


图 1 “Y”形磁场单晶炉磁力线取向示意图

表明，在炉膛的中心部位，横向分量为 1300G，垂直分量为 700G。粗略估算表明，在我们所设定的工艺条件下，可使加热体所受到的安培力，比单纯横向磁场减少百分之三十以上。

## 2. 螺旋管全封闭式非线性磁场单晶炉

CZ 法拉晶时坩埚中的熔硅之对流是相当复杂的，特别是强迫对流同热对流相结合而形成的紊流状态更为复杂<sup>[16]</sup>，它远非是一个简单的对流循环，因此相对于液面而言，不论是垂直走向还是水平走向的磁场，并不能等同地控制其对流，这已被实验所证明。另外，最近提出的倾斜磁场的技术原理<sup>[17]</sup>也说明，应该使磁力线的取向尽可能多地同运动着的电流微元相切割，才会收到更好地抑制对流的效果。根据这一原理，结合 MCZ 技术的要求，我们设计并制做了磁场线圈可相对坩埚做垂直运动的螺旋管全封闭式非线性磁场硅单晶炉，其示意图如图 2 所示。其中 1、2 是支撑线圈相对坩埚做上、下移动的传动系统，3 是驮载线圈并兼做磁极的铁环，4、5 是内径分别为 370 和 420 毫米的螺旋管，6 是冷却水套，7、8 是冷却水的出入口，9、10、11 是观察孔，12 是保温罩，13 是石墨加热体，14 为埚托，15 是熔硅，16 是坩埚，17 是炉壁，18 和 19 是兼做磁极的炉膛之上、下端盖，20 是螺旋管封闭壳。

为解释这种 MCZ 结构在抑制熔硅对流方面的有效性，我们可将坩埚中甚为复杂的对流状态，设想成主要是由垂直于液面和平行于液面的两种对流分量组成。由此，为使流体在磁场中产生更大的安培力，从而受到对其运动的抑制，由(1)式可知，比较有利的措施是令导电流体元在运动中尽可能多地切割磁力线。对此如将(1)式改写一下便可更清楚地看出，即

$$dF = I|dl| \cdot |dB| \sin \theta. \quad (3)$$

(3) 式中  $\theta$  为磁场方向  $dB$  与电流体元 ( $Idl$ ) 运动方向的夹角。由此可见如能使靠近坩

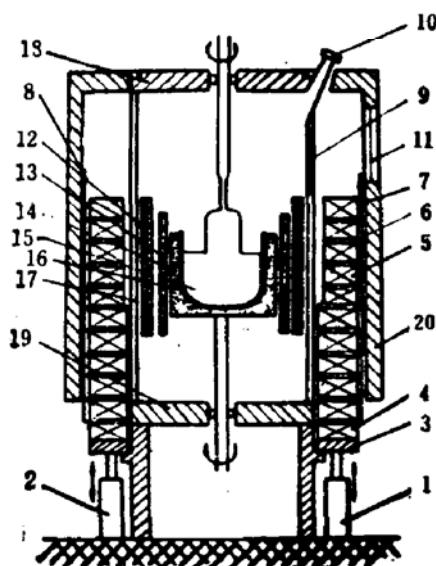


图 2 螺旋管全封闭式非线性磁场单晶炉示意图

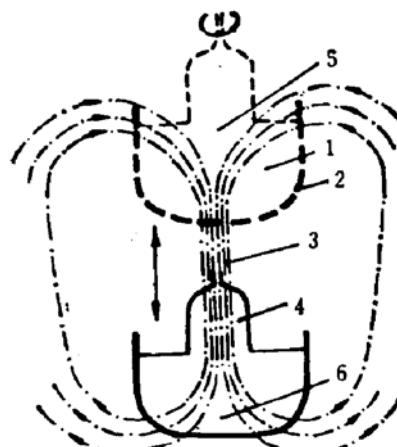


图 3 螺旋管相对于坩埚运动使之获得适当位置示意图。其中 1 是熔硅，2 是坩埚，3 为磁力线，4 是单晶，5 和 6 分别表示坩埚中熔硅的上下部位。

埚底部的对流熔体主要受横向磁场作用,而在靠近液面处则以受垂直磁场作用为主,这将使对流受到最大抑制。这一要求的实现,是将坩埚置于螺旋管的下部即磁场呈下喇叭口状处完成的,图3表示了这一原理的示意状态。获得这一位置的方法是用移动磁场线圈的措施而实现的。

基于上述讨论,再考虑到全封闭式结构可最大限度地减少漏磁,并起到将磁场束集到尽可能靠近炉体的效果,以减少对人体的影响,为此,我们设计制造了螺旋管全封闭式非线性磁场硅单晶炉。它可充分发挥磁场功率源的作用,有利于节约能源。实验证明,用12kVA的功率,即可在直径420毫米和370毫米空腔的轴心处分别产生2700G和3200G的磁场强度,这足可满足MCZ所用。为同TMCZ和VMCZ相区别,我们将这种非线性磁场硅单晶炉简记为NLMCZ,它有下列优点:

第一、可更充分地抑制熔硅的热对流,从而使坩埚中的熔体更加稳定;  
第二、可使硅单晶中的氧含量在较大范围内均匀可调,便于控制硅中的氧含量。TMCZ在抑制热对流上、下流动的同时,将增加埚壁附近扩散边界层厚度从而减少了坩埚的溶解速率,使获得的单晶含氧量较低<sup>[17]</sup>。若想获得高氧单晶只好增加坩埚转速,这将加剧熔体的不稳定性;而VMCZ主要抑制对流的水平运动,对坩埚的溶解速率降低的不太,使制得的单晶氧含量相对较高<sup>[17]</sup>,而想获得低氧单晶,则需大幅度降低埚转。但这样做一是降低坩埚溶解速率有限,另外也对热场分布提出了更高的要求。NLMCZ可通过调节磁场水平分量的大小来控制坩埚的溶解速率和对对流的抑制强度,从而达到在较宽范围内控制硅单晶中氧含量的作用。

第三、可获得径向电阻率分布均匀的高阻CZ硅单晶。TMCZ法中由于在液面附近存在着熔体的水平流动,故电阻率径向分布均匀性尽管比常规CZ法有较大提高,但比VMCZ稍差;而VMCZ法由于对坩埚的熔解抑制不够有力,使熔体中的纯度受坩埚影响较重,在低掺杂时不易制得高阻长寿命单晶。NLMCZ弥补了上述两种方法之不足而可获得径向电阻率分布较均匀的高阻单晶。

第四、至于加热体受力问题,由于螺旋管磁场对加热体的作用力是径向对称的,故在NLMCZ技术中,保持热场均匀还是比较容易的,这是该方法的一个突出优点。

#### 四、实验结果

我们在上述“Y”形磁场中进行了MCZ硅单晶的生长,获得如下结果:

- (1) 加热体稳定,加磁场后宏观上没有发现有可觉察的变化;
- (2) 有效地抑制了热对流。未加磁场时熔硅液面起伏明显,尤以埚边为甚,加磁场后液面平整;
- (3) 控制氧含量方便,易实现单晶轴向氧含量的均匀分布。表1是MCZ与CZ单晶中含氧量的比较,表2是磁场强度与硅单晶中氧含量之对应关系。氧含量是借助170SX型傅利叶变换红外光谱仪用常温参比法测定并用下式计算的

$$O_i = 4.81 \times 10^{17} \alpha \text{ 原子数/厘米}^3$$

式中 $\alpha$ 为9微米吸收峰处硅中氧的吸收系数。

表 1 MCZ 与 CZ 硅单晶中氧含量的比较

型号 [111] 掺磷	熔炼部位	氧含量 $\times 10^{17}/\text{cm}^3$		
		头 部	中 部	尾 部
CZ	1	17.1		11.1
	2	18.0		12.0
MCZ	1	11.6	11.5	11.0
	2	9.8	9.6	8.9
	3	7.1	6.1	6.6
	4	5.1	5.2	4.7

表 2 某工艺条件下磁场强度与硅中氧含量关系

磁场功率源 (kvA)	0	3	4.8	6
硅中氧含量 ( $\times 10^{17}/\text{cm}^3$ )	14.4	12.8	11.0	8.6

表 3 CZ 与 MCZ 硅单晶电阻率的比较

种 类 [111], 掺磷	编 号	$\rho$ 欧姆·厘米	$\Delta\rho\%$	
			宏 观	微 区
CZ	1A	25	10.0	11.7
	2A	18	3.0	11.3
	3A	16	3.0	9.4
	1*	50	3.91	4.4
MCZ	2**	头 38	3.5	4.0
		尾 39	3.9	5.6
	3	头 32	2.2	4.6
		尾 20	1.2	5.3
	4	头 14	2.7	4.1
		尾 8	1.9	4.1
	5	头 39	2.0	3.8
		尾 4.1	2.4	5.8

寿命值 \* 120 微秒, \*\* 80 微秒

(4) 改善了电阻率的径向分布均匀性, 尤其明显的是提高了微区分布均匀性。实验结果如表 3 所示, 其中 1A 样品是本单位常规 CZ 硅单晶, 2A 和 3A 样品是兄弟单位提供的认为宏观电阻率均匀性较好的 CZ 硅单晶。从表中可见, MCZ 单晶的掺杂均匀性要比 CZ 单晶好得多。除此外我们还进行了拉制高阻硅单晶的尝试, 获得过 60 欧姆·厘米左右, 微区电阻率不均匀性  $<5\%$  和 160 欧姆·厘米左右, 微区电阻率不均匀性  $<15\%$  的

〈111〉取向掺磷 MCZ 硅单晶，其寿命相应为 125 和 200 微秒。所有电阻测量都是在 ASR-100 型扩展电阻仪上进行的，其测试步距为 10—50 微米。

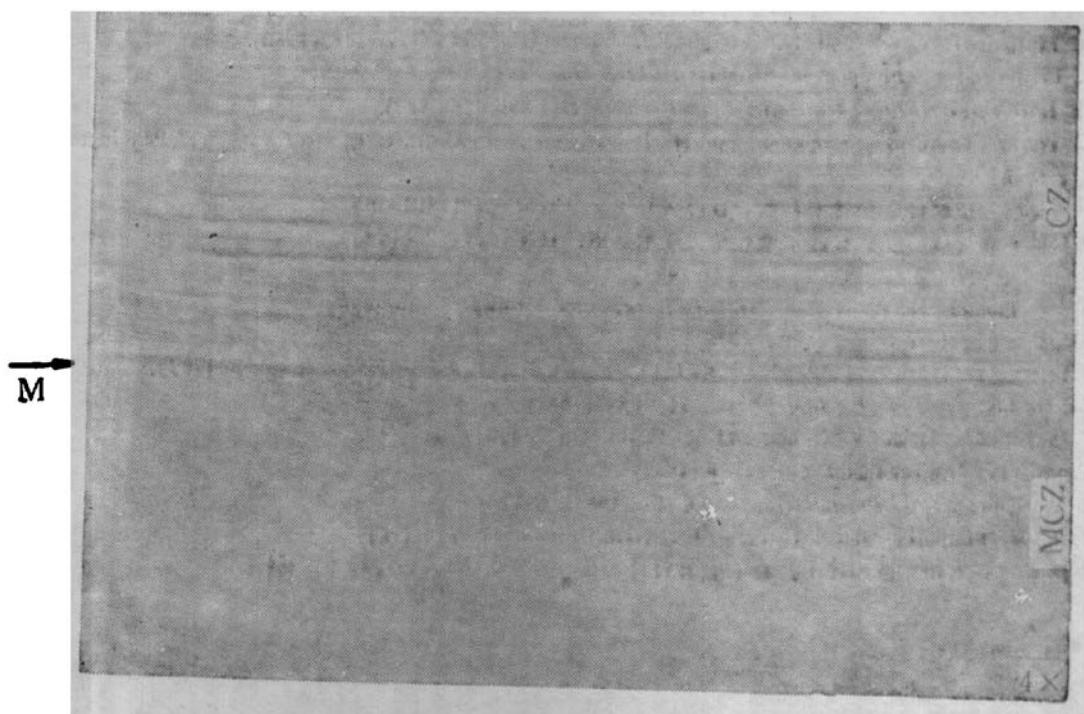


图 4 MCZ 技术可消除生长条纹的实例，图示是经 Sirtl 腐蚀剂室温下腐蚀 5 分钟后的光学显微形貌 (4×)

(5) 基本消除了生长条纹。加磁场后生长的硅单晶比不加磁场生长的，晶体结构更均匀完整，图 4 是这种情况的例证。图中箭头所指处是加磁场和不加磁场时晶体结构在纵剖面上的分界限。从中可见，施加磁场后的晶体结构比无磁场的均匀得多。此外，从 MCZ 生长的单晶外观上看，亦比 CZ 单晶平整光滑，这也是磁场单晶的结构完整性比常规单晶均匀的又一证明。

## 五、结 论

从我们所获得的初步结果看，可以认为：

(1) 所设计的“Y”形磁场 CZ 硅单晶炉是适用的；而 NLMCZ 的设计与制做之成功，弥补了 VMCZ 和 TMCZ 之不足，丰富了 MCZ 技术内容，将使 MCZ 技术有更广泛的实用价值；

(2) 实验证明 MCZ 技术确有提高硅单晶质量的作用，是一种有前途并值得推广的单晶生长技术；

(3) MCZ 技术的应用，改变了某些在常规 CZ 技术中视为规律性的东西，有必要对这种新的技术所带来的现象进行更为深入地研究。

氯含量与电阻率的测试是由电子工业部第四十六研究所和冶金部北京有色金属研究总院协助完成的，谨此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] P. Butler, *Semiconductor Inter.*, **5**, 95(1982).
- [2] T. Y. Tan, E. E. Gardner and W. K. Tice, *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 175(1977).
- [3] A. Murgai, J. Y. Chi and H. C. Gatos, *J. Electrochem. Soc.*, **127**, 1182(1980).
- [4] B. Leroy and C. Plougonven, *J. Electrochem. Soc.*, **127**, 961(1980).
- [5] L. Jastrzebski, *IEEE Trans. Electron. Devices*, **ED-29**, 475(1982).
- [6] K. Hoshi, T. Suzuki, Y. Okubo and N. Isawa, Extended Abstracts Electrochem. Soc. Pennington, **80-1**, p. 811(1980).
- [7] 星 金治, 伊沢伸幸和铃木利彦, 日经エレクトロニクス, 154(1980).
- [8] 伊沢伸幸, 佐藤 弘, 佐藤富雄和星 金治, 电子技术, **22**, 93(1980).
- [9] G. Fiegl, *Solid State Tech.*, **26**, 121(1983).
- [10] A. C. Bonora, *Microelectronic Manufacturing and Testing*, **5**, 30(1980).
- [11] 高须新一郎, 化学と工业, **36**, 304(1983).
- [12] 半导体杂志, No. 3, 62(1983), 秦雪, 摘自日经エレクトロニクス, No. 286, 80(1982).
- [13] K. Hoshikawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21**, L545(1982).
- [14] T. Suzuki, N. Isawa, Y. Okubo and K. Hoshi, GB 2059932 A.
- [15] T. Suzuki, *Semiconductor Silicon*, **90**(1981).
- [16] a) W. Zulehner, *J. Crystal Growth*, **65**, 189(1983).  
b) S. M. Pimplkar and S. Ostrach, *J. Crystal Growth*, **55**, 614(1981).
- [17] 田路英一, 大和充博和铃木 修, 公开特许公报(A), 昭 60—33293, p. 463.

**Research of Technology on Magnetic-Field-Applied CZ**

Zhou Shiren, Ji Yanshu, Kong Qingmao, Gao Yuankai  
*(Harbin Institute of Technology)*

Wang Shouyu, Han Changlin and Fu Zheguo  
*(Hegang Semiconductor Material Factory)*

**Abstract**

On the basis of recounting the theory of magnetic-field-applied CZ (MCZ) technology, two new types of MCZ Silicon crystal growth furnaces — “Y” shape magnetic field and solenoid all seal nonlinear magnetic field are introduced. MCZ silicon crystals are grown utilizing the “Y”—MCZ furnace with the transverse component 1300 G and the vertical component 700 G. The measurements of oxygen content and dopant concentration as well as the observations of microscopic structure show that the uniformity and perfections of silicon crystals can be markedly improved using the new apparatus.