

单晶硅生长技术研究新进展

峨嵋半导体材料研究所 ■ 蒋娜 袁小武 张才勇

摘要: 综述了单晶硅生长技术的研究现状。对改良热场技术、磁场直拉技术、真空高阻技术以及氧浓度的控制等技术进行了论述。

关键词: 单晶硅; 真空高阻; 磁场; 氧含量; 氮掺杂

一 前言

硅(Si)材料是信息技术、电子技术和光伏技术最重要的基础材料。从某种意义上讲,硅是影响国家未来在高新技术和能源领域实力的战略资源。作为一种功能材料,其性能应该是各向异性的,因此半导体硅大都应该制备成硅单晶,并加工成抛光片,方可制造IC器件,超过98%的电子元件都是使用硅单晶^[1~3]。

生产单晶硅的原料主要包括:半导体单晶硅碎片,半导体单晶硅切割剩余的头尾料、边皮料等。目前,单晶硅的生长技术主要有直拉法(CZ)和悬浮区熔法(FZ)。在单晶硅的制备过程中还可根据需要进行掺杂,以控制材料的电阻率,掺杂元素一般为Ⅲ或Ⅴ主族元素^[4]。生长制备后的单晶硅棒还需经过切片、打磨、腐蚀、抛光等工序深加工后方可制成用作半导体材料的单晶硅片。随着单晶硅生长及加工处理技术的进步,单晶硅正朝着大直径化(300mm以上)、低的杂质及缺陷含量、更均匀的分布以及生产成本低、效率高的方向发展^[5]。

二 单晶硅的生长原理

在单晶硅生长过程中,随着熔场温度的下降,将发生由液态转变到固态的相变化。对于发生在等温、等压条件下的相变化,不同相之间的相对稳定性可由吉布斯自由能判定。 ΔG 可以视为结晶驱动力。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

在平衡的熔化温度 T_m 时,固液两相的自由能是相等的,即 $\Delta G = 0$,因此

$$\Delta G = \Delta H - T_m \times \Delta S = 0 \quad (2)$$

$$\text{所以, } \Delta S = \Delta H / T_m \quad (3)$$

其中, ΔH 即为结晶潜热。

将式(3)代入式(1)可得

$$\Delta G = \frac{\Delta H(T_m - T)}{T_m} = \frac{\Delta H\Delta T}{T_m} = \Delta S\Delta T \quad (4)$$

由式(4)可以看出,由于 ΔS 是一个负值常数,所以 ΔT (即过冷度)可被视为结晶的唯一驱动力^[6~8]。

以典型的CZ长晶法为例,加热器的作用在于提供系统热量,以使熔硅维持在高于熔点的温度。如果在液面浸入一晶种,在晶种与熔硅达到热平衡时,液面会靠着表面张力的支撑吸附在晶种下方。若此时将晶种往上提升,这些被吸附的液体也会跟着晶种往上运动,而形成过冷状态。这节过冷的液体由于过冷度产生的驱动力而结晶,并随着晶种方向长成单晶棒。在凝固结晶过程中,所释放出的潜热是一个间接的热量来源,潜热将借着传导作用而沿着晶棒传输。同时,晶棒表面也会借着热辐射与热对流将热量散失到外围,另外熔场表面也会将热量散失掉。于是,在一个固定的条件下,进入系统的热能将等于系统输出的热能^[9~10]。

三 硅单晶生长方法

1 直拉(CZ)法

直拉法的生产过程简单来说就是利用旋转的籽晶从熔硅中提拉制备单晶硅。此法产量大、成本低,国内外大多数太阳能单晶硅片厂家多采用这种技术。目前,直拉法生产工艺的研究热点主要有:先进的热场构造、磁场直拉法以及对单晶硅中氧浓度的控制等方面。

(1) 先进的热场构造

在现代下游IC产业对硅片品质依赖度日益增加的情况下,热场的设计要求越来越高。好的热场必

须能够使炉内的温度分布达到最佳化,因此一些特殊的热场元件正逐渐被使用在先进的CZ长晶炉内^[11~12]。

任丙彦^[13]等对 $\phi 200\text{mm}$ 太阳能用直拉单晶的生长速率进行了研究。通过采用热屏、复合式导流系统及双加热器改造直拉炉的热系统(图1)进行不同热系统下的拉晶试验,结果发现平均拉速可从 $0.6\text{mm}/\text{min}$ 提高到 $0.9\text{mm}/\text{min}$,提升了50%。用有限元法对氩气流场和单晶炉热场进行模拟试验,结果表明:改造后的氩气流场被明显优化,界面附近的晶体纵向温度梯度增加,熔体纵向温度梯度减小。研究发现,直拉炉中增加热屏后平均拉速明显提高的原因主要有两个:一方面热屏阻止加热器的热量向晶体辐射,减弱了固液界面热辐射力度;另一方面,热屏起到了氩气导流作用。在敞开系统中,氩气流形成漩涡,增加了炉内气氛流动的不稳定性,氩气对晶体的直接冷却能力弱,不利于生长出无位错单晶。增加热屏后,漩涡消失,氩气流速增加,对晶体的直接冷却和溶液界面吹拂能力加强。直拉炉加装导流筒后,炉膛被分成了上下两个空间,氩气流局限在复合式导流系统中,然后仅从内层保温罩-加热器、加热器-石墨坩埚这两个缝隙中通过,流速进一步增加,并在流动过程中不断从炉内带走结晶潜热。通过对模拟结果的后处理,得到两种热系统下界面10cm附近晶体和熔体的8个温度值,经分析得出:与敞开系统相比,密闭系统界面附近晶体轴向温度梯度增大约 10°C ,而熔体中轴向温度梯度降低约 5°C 。在CZ长晶过程中,当熔体中的温度梯度越小而晶体温度梯度越大时,生长速率越高,如图2、图3所示。

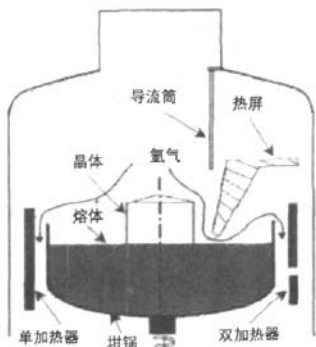


图1 热系统改造示意图

(2) 磁场直拉法(MCZ)

近年来,随着生产规模的扩大,直拉单晶硅正

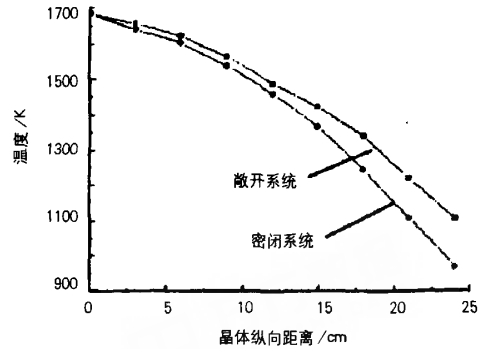


图2 温度-距离曲线(晶体)

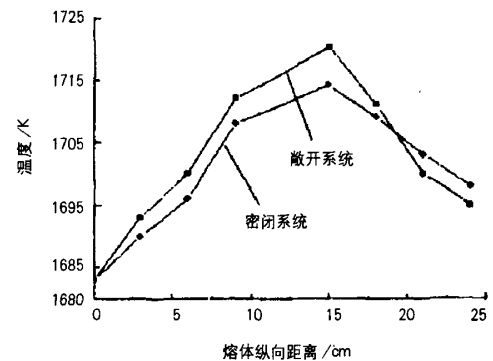


图3 温度-距离曲线(熔体)

在向大直径发展,投料量急剧增加。由于大熔体严重的热对流不但影响晶体质量,甚至会破坏单晶生长。目前,抑制热对流最常用的方法是在长晶系统内加装磁场。在磁场下生长单晶,当引入磁感应强度达到一定值时,一切宏观对流均受到洛伦兹力的作用而被抑制。引入磁场的磁力线分布有纵向、横向和Cusp三种,从抑制硅单晶氧浓度考虑,应以Cusp磁场为最佳^[14~15]。

宇慧平^[16]等研究了不同磁场对大直径单晶硅生长中的动量与热量传输的影响,并进行数值分析。通过采用紊流模型对大直径硅单晶在垂直磁场及匀行磁场作用时熔体内动量及热量进行数值模拟和利用有限体积法离散控制方程、SIMPLE等算法对压力和速度场进行耦合得出:垂直磁场对动量及热量的分布具有双重效应。垂直磁场强度过大($Ha=1000/2000$),不利于晶体生长。对无磁场、垂直磁场及匀形磁场作用下熔体内的传输特性进行比较后发现,随着匀形磁场强度的增加,熔体内子午面上的流动减弱,并且紊流强度也相应降低。

徐岳生^[17]等使用钕铁硼永磁体向熔体空间引入

磁场,研究了永磁体所产生的磁场对3"硅单晶生长的影响。研究发现,采用钕铁硼永磁体向熔硅所在空间中引入Cusp磁场后,当坩埚边缘磁感应强度达到0.15T时,熔硅中杂质输运受到扩散控制,熔硅自由表面观察到明显的表面张力对流,单晶硅的纵向、径向电阻率均匀性得到改善。通过试验得出了磁感应强度B对应等效微重力的量级关系式: $g = v_{\text{eff}} \frac{v_0}{v_{\text{eff}}} g_0$ 。硅单晶生长,用硅熔体的有关物性参数代入 v_{eff} 表示式,可求得在石英坩埚边缘处所产生的等效微重力接近于一般低轨道卫星的微重力等级。在坩埚边缘处,B值相同情况下,大直径坩埚对应的等效微重力量级较高,但实现B值较困难。研究表明,增加永磁体的数量可以达到要求。

(3) 氧浓度的控制

在直拉单晶硅生长过程中,由于石英坩埚的溶解,一部分氧通常会进入到单晶硅中,这些氧主要存在于硅晶格的间隙位置。当间隙氧的浓度超过某一温度下氧在硅中的溶解度时,间隙氧就会在单晶硅中沉淀下来,形成单晶硅中常见的氧沉淀缺陷。如果不对硅片中的氧沉淀进行控制,将会对集成电路造成危害。通过一定的工艺,在硅片体内形成高密度的氧沉淀,而在硅片表面形成一定深度的无缺陷洁净区。该区域将用于制造器件,这就是“内吸杂”工艺。如果氧浓度太低,就没有“内吸杂”作用,反之如果氧浓度太高,会使晶片在高温制程中产生挠曲。因此适当控制氧析出物的含量对制备性能优良的单晶硅材料有重大意义^[19~22]。

符黎明^[23]等重点研究了直拉硅中氧沉淀在快速热处理(RTP)和常规炉退火过程中的高温消融以及再生长行为。研究发现,RTP是一种快速消融氧沉淀的有效方式,比常规炉退火消融氧沉淀更加显著。硅片经RTP消融处理后,在氧沉淀再生长退火过程中,硅的体微缺陷(BMD)密度显著增加,BMD的尺寸明显增大。研究还发现,氧沉淀消融处理后,后续退火的温度越高,氧沉淀的再生长越快。

Kissinger^[24]等采用红外激光散射断层谱(IR-LST)对1000℃、1100℃退火后的掺氮直拉硅中氧沉淀的尺寸分布进行了详细的研究。研究表明,随着退火时间的延长,小尺寸的氧沉淀逐渐减少,而大尺寸的氧沉淀逐渐增多。这说明在退火过程中半径小于该温度下临界形核半径的氧沉淀被消融了,而半径

大于该温度下临界形核半径的氧沉淀继续长大,这就是Oswald熟化机制。研究还发现,氮浓度越高或退火温度越高,氧沉淀的熟化过程进行得越快。

李勇^[25]等利用傅立叶红外光谱仪研究了掺氮直拉单晶硅和普通直拉单晶硅的原生氧沉淀以及模拟太阳能电池制备热处理工艺下的氧沉淀行为。结果发现,掺氮直拉单晶硅的原生氧沉淀浓度比普通直拉单晶硅的略高,这是因为氮在晶体生长过程中可以促进氧沉淀,如图4所示。但是研究发现,在模拟太阳能电池制备热处理工艺中掺氮直拉单晶硅和普通直拉单晶硅一样,仅有非常少量氧沉淀产生。这表明在太阳能电池的短时间热处理工艺中,氮只会对氧沉淀产生微量影响,不会影响磷吸杂的效果,如图5所示。

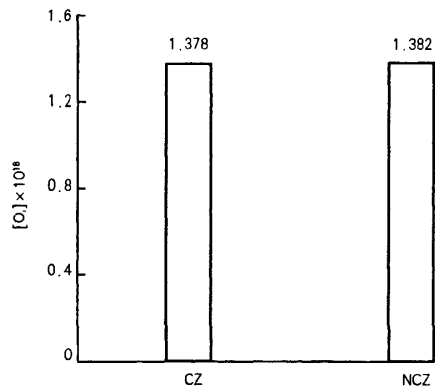


图4 普通直拉单晶硅和掺氮直拉单晶硅的原生间隙氧浓度图

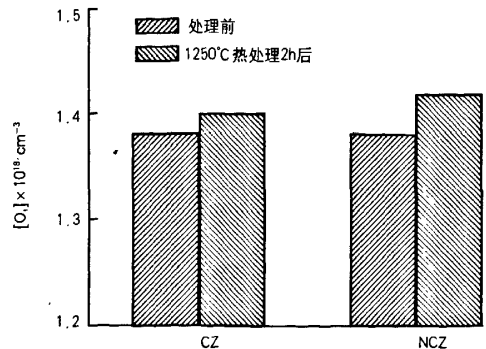


图5 间隙氧浓度在1250℃热处理2h前后的变化

2 区熔(FZ)法

区熔法是先利用线圈将原料硅棒局部加热熔化,熔区因受到磁托浮力而处于悬浮态,然后从熔区下方利用旋转着的籽晶将熔硅拉制成单晶硅。此法由于生长过程中熔区始终处于悬浮状态,不与任何物质接触,生长过程中的杂质分凝效应和蒸发效应显

著等原因,因此产品纯度高,各项性能好。但由于其生产成本低,对设备和技术的要求较为苛刻,所以一般仅用于军工、太空等高要求硅片的生长^[26-28]。

闫萍^[29]等采用真空区熔工艺,制备出导电类型为P型,电阻率 $(3\sim 5)\times 10^4\Omega/\text{cm}$ 及 $(1\sim 2)\times 10^4\Omega/\text{cm}$ 两种规格的真空区熔硅单晶,其中电阻率为 $(3\sim 5)\times 10^4\Omega/\text{cm}$ 的单晶除进行真空区熔提纯外,还需进行微量的掺杂。两根单晶直径30~50mm,晶向 $\langle 111 \rangle$ 。经检测,均无位错及漩涡缺陷,少子寿命达到1500 μs 以上。


闫萍^[30]等通过在氩气气氛及真空环境下进行高阻区熔硅单晶生长试验发现,与在氩气气氛下生长硅单晶相比,在真空环境下采用较低的晶体生长速率即可生长出无漩涡缺陷的单晶,而当晶体生长速度较高时,尽管可以消除漩涡,但单晶的少子寿命却有明显的下降。在真空中生长无漩涡缺陷单晶的生长速率,比在氩气气氛下生长同样直径单晶的生长速率低,但漩涡缺陷对单晶少子寿命的影响并不明显。

四 结语

本文对单晶硅生长技术的研究进展进行了综述。以前的研究表明,改进热场构造和在熔硅所在空间引进磁场分别可起到节能降耗和生长大直径单晶硅的目的。氮在硅晶体生长过程中可以促进原生氧沉淀的形成,进而增加后续热工艺中的氧沉淀含量;氮还能增强氧沉淀的稳定性。这两个特征使得掺氮直拉硅在集成电路工艺中的热预算减小,并且在硅片初始氧浓度降低的情况下仍能保持很强的内吸杂能力,因而备受硅材料产业界和学术界关注。

参考文献

[1] 中国硅材料产业现状分析[J]. 中国集成电路, 2008, 3: 55 - 63.
 [2] 邓志杰. 硅单晶材料发展动态[J]. 稀有金属, 2000, 24(5): 369 - 372.
 [3] Peter W, Wolfgang K. Solar grade silicon feedstock supply for PV industry [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 72(1 - 4): 11 - 26.
 [4] 周旗钢. 300mm硅片技术发展现状与趋势[J]. 电子工业专用设备, 2005, 10: 1 - 6.
 [5] 魏奎先, 戴永年, 马文会, 等. 太阳能电池硅转换材料现状及发展趋势[J]. 轻金属, 2006, 2: 52 - 56.
 [6] Ma X, Yu X, Fan R, et al. Formation of pnp bipolar structure by thermal donors in nitrogen-containing p-type Czochralski silicon wafers[J]. Appl Phys Lett, 2002, 81(3): 496 - 498.
 [7] Goto H, Pan L S, Tanaka M, et al. Intrinsic gettering in Nitrogen-doped and Hydrogen-annealed Czochralski-grown silicon wafers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(6A): 3944 - 3946.

[8] Nakai K, Yckta H, Ikari A, et al. Oxygen precipitation in nitrogen-doped Czochralski-grown silicon crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(8): 4301 - 4309.
 [9] Yang D, Ma X, Fan R, et al. Oxygen precipitation in nitrogen-doped Czochralski silicon[J]. Physica B, 1999, 273-274: 308 - 311.
 [10] Deen P P, Braithwaite D, Kernavancio N, et al. Structural and electronic transitions in the low-temperature, high-pressure phase of SmS[J]. Phy Rev B: Condensed Matter and Mater Phys, 2005, 71(24): 245118.
 [11] Bruton T M. General trends about photovoltaics based on crystalline silicon[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 72(1-4): 3 - 10.
 [12] Dominique S, Roland E. Silicon feedstock for the multi-crystalline photovoltaic industry[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 72(1-4): 27 - 40.
 [13] 任丙彦, 羊建坤, 李彦林. $\phi 200\text{mm}$ 太阳能用直拉单晶生长速率研究[J]. 半导体技术, 2007, 32(2): 106 - 120.
 [14] Benz K W, Croll A. Melt growth of semiconductor crystals in micro-gravity conditions[J]. Material Science Forum, 1998, 276-277: 109 - 118.
 [15] Watanobe M, Eguchi M, Wang W, et al. Controlling oxygen concentration and distribution in 200mm diameter Si crystals using the electromagnetic Czochralski method[J]. Journal of Crystal Growth, 2002, 37(5): 2021 - 2023.
 [16] 宇慧平, 隋允康, 安国平. 不同磁场对大直径单晶硅生长中的动量与热量运输影响的数值分析[J]. 人工晶体学报, 2008, 37(5): 1073 - 1078.
 [17] 徐岳生, 刘彩池, 王海云, 等. 磁场直拉硅单晶生长[J]. 材料科学, 2005, 34(5): 481 - 492.
 [18] Kaminskii V V, Golubkov A V. Defect samarium ions and electromotive-force generation in SmS[J]. Phys Solid State, 2002, 44(8): 1574 - 1578.
 [19] Iwasa K, Tokuyama T, Kohgi M. Anomalous thermal expansion in the metallic phase of SmS under high pressure[J]. Physica B: Condensed Matter (Amsterdam, Netherlands), 2005, 359: 148.
 [20] Mori Y, Tanemura S, Koide S, et al. Thermo-coloration of SmS thin films by XPS in situ observation[J]. Appl Surf Sci, 2003, 212-213: 38.
 [21] Kitagawa R, Takebe H, Morinaga K. Photoinduced phase transition of metallic SmS thin films by a femtosecond laser. Appl Phys Lett, 2003, 82(21): 3641 - 3643.
 [22] 张秦生, 马向阳, 杨德仁. 掺氮直拉单晶硅中氧沉淀的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(9): 5 - 9.
 [23] 符黎明, 杨德仁, 马向阳, 等. 直拉单晶硅中氧沉淀的高温消融和再生长[J]. 半导体学报, 2007, 28(1): 52 - 55.
 [24] Kissinger G, Huber A, Nakai K, et al. Investigation of Ostwald Ripening in Nitrogen Doped Czochralski Silicon[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(10): 101904.
 [25] 李勇, 钟尧, 席珍强, 等. 太阳能电池用掺氮直拉单晶硅中氧沉淀行为的研究[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(5): 676 - 682.
 [26] 杨树人, 王宗昌, 王毓. 半导体材料[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 [27] 法勒克维奇 Θ C, 切沃勒 И Ф. 无坩埚区熔法生长的无位错硅单晶中微缺陷形成的特征[J]. 半导体杂志, 1997, 22(3): 35 - 38.
 [28] 孙华英, 周旗刚. 无漩涡缺陷悬浮区熔硅单晶的研究[J]. 有色金属与稀土应用, 1995, 3: 30 - 36.
 [29] 闫萍, 张殿朝, 庞丙远, 等. 真空高阻区熔硅单晶中的缺陷及其少子寿命[J]. 半导体技术, 2008, 3(11): 1103 - 1107.
 [30] 闫萍, 张殿朝, 陈立强. 高阻真空区熔硅单晶的生长[J]. 半导体技术, 2007, 32(4): 301 - 307. 

作者: 蒋娜, 袁小武, 张才勇
作者单位: 峨嵋半导体材料研究所
刊名: 太阳能
英文刊名: SOLAR ENERGY
年, 卷(期): 2010, ""(2)
被引用次数: 0次

参考文献(30条)

1. 中国硅材料产业现状分析[J]. 中国集成电路, 2008, 3:55-63.
2. 邓志杰. 硅单晶材料发展动态[J]. 稀有金属, 2000, 24(5):369-372.
3. Peter W, Wolfgang K. Solar grade silicon feedstock supply for PV industry[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(1-4):11-26.
4. 周旗钢. 300mm硅片技术发展现状与趋势[J]. 电子工业专用设备, 2005, 10:1-6.
5. 魏争先, 戴永年, 马文会, 等. 太阳能电池硅转换材料现状及发展趋势[J]. 轻金属, 2006, 2:52-56.
6. Ma X, Yu X, Fan R, et al. Formation of pnp bipolar structure by thermal donors in nitrogen-containing p-type Czochralski silicon wafers[J]. Appl Phys Lett, 2002, 81(3):496-498.
7. Goto H, Pan L S, Tanaka M, et al. Intrinsic gettering in Nitrogen-doped and Hydrogen-annealed Czochralski-grown silicon wafers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(6A):3944-3946.
8. Nakai K, Yekta H, Ikari A, et al. Oxygen precipitation in nitrogen-doped Czochralski-grown silicon crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(8):4301-4309.
9. Yang D, Ma X, Fan R, et al. Oxygen precipitation in nitrogen-doped Czochralski silicon[J]. Physica B, 1999, 273-274:308-311.
10. Deen P P, Braithwaite D, Kemavanois N, et al. Structural and electronic transitions in the low-temperature, high-pressure phase of SmS[J]. Phys Rev B: Condensed Matter and Materials Physics, 2005, 71(24):245118.
11. Bruton T M. General trends about photovoltaics based on crystalline silicon[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 72(1-4):3-10.
12. Dominique S, Roland E. Silicon feedstock for the multi-crystal-line photovoltaic industry[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 72(1-4):27-40.
13. 任丙彦, 羊建坤, 李彦林. 200mm太阳能用直拉单晶生长速率研究[J]. 半导体技术, 2007, 32(2):106-120.
14. Benz K W, Croll A. Melt growth of semiconductor crystals in micro-gravity conditions[J]. Material Science Forum, 1998, 276-277:109-118.
15. Watanobe M, Eguchi M, Wang W, et al. Controlling oxygen concentration and distribution in 200mm diameter Si crystals using the electromagnetic Czochralski method[J]. Journal of Crystal Growth, 2002, 37(5):2021-2023.
16. 宇慧平, 隋允康, 安国平. 不同磁场对大直径单晶硅生长中的动量与热量运输影响的数值分析[J]. 人工晶体学报, 2008, 37(5):1073-1078.
17. 徐岳生, 刘彩池, 王海云, 等. 磁场直拉硅单晶生长[J]. 材料科学, 2005, 34(5):481-492.
18. Kaminskii V V, Golubkov A V. Defect samarium ions and electromotive-force generation in

[SmS\[J\]. Phys Solid State, 2002, 44\(8\):1574-1578.](#)

19. [Iwasa K, Tokuyama T, Kohgi M. Anomalous thermal expansion in the metallic phase of SmS under high pressure\[J\]. Physica B: Condensed Matter \(Amsterdam, Netherlands\), 2005, 359:148.](#)
20. [Mori Y, Tanemura S, Koide S, et al. Thermo-coloration of SmS thin films by XPS in situ observation\[J\]. Appl Surf Sci, 2003, 212-213:38.](#)
21. [Kitagawa R, Takebe H, Morinaga K. Photoinduced phase transition of metallic SmS thin films by a femtosecond laser. Appl Phys Lett, 2003, 82\(21\):3641-3643.](#)
22. [张泰生, 马向阳, 杨德仁. 掺氮直拉单晶硅中氧沉淀的研究进展\[J\]. 材料导报, 2006, 20\(9\):5-9.](#)
23. [符黎明, 杨德仁, 马向阳, 等. 直拉单晶硅中氧沉淀的高温消融和再生长\[J\]. 半导体学报, 2007, 28\(1\):52-55.](#)
24. [Kissinger G, Huber A, Nakai K, et al. Investigation of Ostwald Ripening in Nitrogen Doped Czochralski Silicon\[J\]. Appl Phys Lett, 2005, 87\(10\):101904.](#)
25. [李勇, 钟尧, 席珍强, 等. 太阳能电池用掺氮直拉单晶硅中氧沉淀行为的研究\[J\]. 材料科学与工程学报, 2006, 24\(5\):676-682.](#)
26. [杨树人, 王宗昌, 王兢. 半导体材料\[M\]. 北京: 科学出版社, 2004.](#)
27. [法勒充维奇 C, 切沃勒HФ. 无坩埚区熔法生长的无位错硅单晶中微缺陷形成的特征\[J\]. 半导体杂志, 1997, 22\(3\):35-38.](#)
28. [孙华英, 周旗刚. 无漩涡缺陷悬浮区熔硅单晶的研究\[J\]. 有色金属与稀土应用, 1995, 3:30-36.](#)
29. [闫萍, 张殿朝, 庞丙远, 等. 真空高阻区熔硅单晶中的缺陷及其少子寿命\[J\]. 半导体技术, 2008, 3\(11\):103-1107.](#)
30. [闫萍, 张殿朝, 陈立强. 高阻真空区熔硅单晶的生长\[J\]. 半导体技术, 2007, 32\(4\):301-307.](#)

相似文献(1条)

1. 会议论文 [蒋娜, 袁小武, 张才勇. 单晶硅生长技术研究进展 2009](#)
综述了单晶硅生长技术的研究现状。对改良热场技术、磁场直拉技术、真空高阻技术以及氧浓度的控制等技术进行了论述。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_tyn201002010.aspx

授权使用: 华南理工大学(hnlgdx), 授权号: b19ad4cc-57c4-4637-9507-9dd70152edd4

下载时间: 2010年8月19日