

光电测温、控温仪及其在单晶炉上的应用

肖功弼 张家林 吴彰植 陶学中 陈国正 张天寰

(中国科学院自动化研究所)

一、前言

随着我国生产和科学技术的发展,对温度的测量和控制不断提出了新的要求。这主要反映在精度要求不断提高,测量范围要广,要求能测微小目标的温度,以及测量和控制的自动化等等。当测温对象是运动中的目标,或高纯目标,微小目标,高温目标,高频感应加热目标等不允许接触测温情况,就必须用非接触法测量。近几十年来,非接触法测温研究工作主要集中在光学法测温。特别是近几年来广泛发展了“自动光电高温计”,它既保持了光学高温计的“零值平衡”原理,又实现了自动测量,并且具有提高灵敏度和精度、扩展低温量程(可至室温)等优点。在一些国家“自动光电高温计”已广泛用于工业生产,并已作为高温计量的基准或标准仪器。

近两年来,我们将“自动光电高温计”和控温调节器作成一体,研制了光电测温、控温仪。并成功地试用于多晶炉和单晶炉温度的自动测量和控制。此仪器现已由有关工厂投入生产。

二、原理和性能

本仪器采用光学高温计的“零值平衡”原理。同样

有一只标准小灯泡用于与目标比较亮度,通过光电系统代替人眼鉴别亮度平衡,以消除主观误差并提高了鉴别平衡的精度;用电子线路代替人工调节以实现亮度平衡,达到自动连续测温或控温。和光学高温计一样,仪器是测出目标的亮度温度。仪器采用硅太阳能电池作光敏元件,测温的有效波长为 0.86μ 。

测温、控温仪原理如图1所示。通过光学-机械调制器系统,将目标辐射的光和仪器内标准小灯泡的光以50周/秒频率轮流地投射在光敏元件上,将光电讯号放大并经相敏检波后得到直流讯号。此讯号的正负代表目标高于或低于标准灯的亮度,讯号的幅值在小范围内正比于二者温度差值。在测温时,用此讯号经积分放大器自动调整标准灯电流,使标准灯的光产生的光电流等于目标的光产生的光电流(这和光学高温计中“稳丝”相似)。这样通过读标准灯的电流,就可测出目标的温度。在控温时,相敏检波输出经PID调节器,用来控制加热目标,使目标温度等于标准灯给定的温度。同时,在温度偏差表上还可读出目标实际温度和给定温度的偏差值。

作为测温、控温仪器,测温、控温的灵敏度和长期使用的稳定性(或重复性)是其主要品质。为了提高这两项品质采取下列措施:

1. 仪器的灵敏度主要取决于光电系统和电子线路

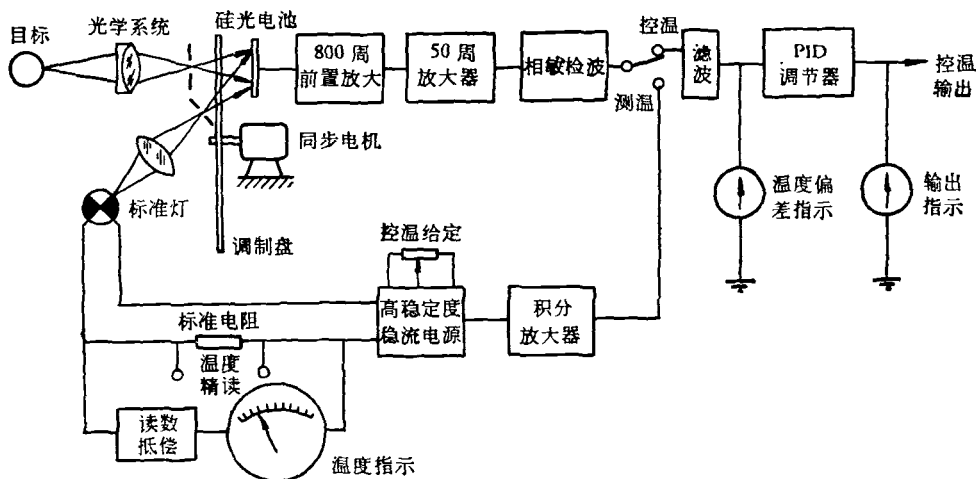


图1 测温、控温仪原理图

的噪声。为了减少市电 50 周工频噪声影响,调制器的载波讯号选用 800 周。讯号先经 800 周选频放大,而且在选频放大器中有 50 周带阻滤波器,进一步压低 50 周干扰讯号。在光学系统设计中通过一组光阑的配合,使仪器具有相当好的抗外来杂散光干扰性能,可以在强照明下工作。在调制器设计中,也尽量考虑降低调制噪音。采取这些措施后,使仪器的灵敏度在 1200℃ 附近为 0.2℃。

2. 仪器的长期稳定性主要取决于标准小灯泡的稳定性。真空钨丝灯是目前已经知道的最稳定的能够改变光强的参考标准。这种灯经过老化,并不使钨丝的亮度温度超过 1400℃ 使用,能够获得很好的稳定性。为了方便,我们采用中国计量科学研究院工厂生产的标准小灯泡。此外,在探头的机械设计中,注意各关键元件的相互位置在长期使用中不致因变形而引起改变,也是保证仪器长期稳定性的重要措施。经过两年来长期运转使用实践检验,证明仪器的长期稳定性误差在 0.1% 以内。

仪器的主要指标如下:

(1) 测温、控温范围: 第一挡 900~1400℃;

第二挡 1300~2000℃。

(2) 测温、控温灵敏度: 在 1200℃ 附近为 0.2℃。

(3) 测温、控温重复性误差: 小于 0.1%。

(4) 允许目标距离变化范围: 500 毫米~∞。

(5) 距离系数: 1/250 (目标距离最近 500 毫米时,可测 $\phi 2$ 目标)。

(6) PID 调节器主要参数: 开路增益 1000 倍; 输入阻抗 ≥ 100 千欧; 输出讯号 +3 伏~-2 伏; 比例带 0.1%~10%; 积分时间 0~8 分; 微分时间 0~120 秒。

(7) 允许环境温度 0~40℃ (高温需加水冷套)。

三、在单晶炉上的应用

我们和北京机械学院工厂协作,将“光电测温、控温仪”在直立式单晶炉进行试验。其外观如图 2 所示。和目前国内大多数单晶炉采用的控制坩埚或加热器温度系统比较,液面温度控制系统能直接定量地控制单晶生长区附近液面温度,因而使控温规律不受更换坩埚或加热器,以及是否充气拉晶等因素影响,给操作和实现自动控制创造了有利条件。

利用本仪器与单晶炉原有可控硅触发线路结合,组成如图 3 所示控温原理图。图中由可控硅至运算放大器之间的反馈是用来稳定外电网电压波动影响。当外电波动 $\pm 10\%$ 时,加热器上电压波动 $\pm 1\sim 2\%$ 。

测温探头装在另开的上观察孔上方。探头光轴和籽晶杆夹角约 10 度(图 4)。在观察孔处有一段 150 毫米加水冷套区,用来凝结挥发物。而视镜本身采用较耐热的光学玻璃,不加水冷,以减少凝结。当充气拉晶时,氩气从水冷套上方流入炉腔。采取上述措施后,有效地解决了视镜在拉晶过程中的污染问题,保证了控制规律的重复性。如能在熔化硅过程中,象保护籽晶免受污染加保护罩一样,在观察孔下方用一挡板把孔挡住(化完硅后再打开),则能获得更理想的重复性效果。

探头至硅液面距离约 800 毫米,对应在被测液面上测温目标直径约 $\phi 2.5$ 。为了选择适当的测温位置,用仪器测量了液面温度沿坩埚直径的变化。对装料 350 克直径 $\phi 80$ 坩埚,温度分布如图 5 所示。由图可看出,在石英坩埚边至“光环”之间,有一段温度梯度不大的区域。此区域

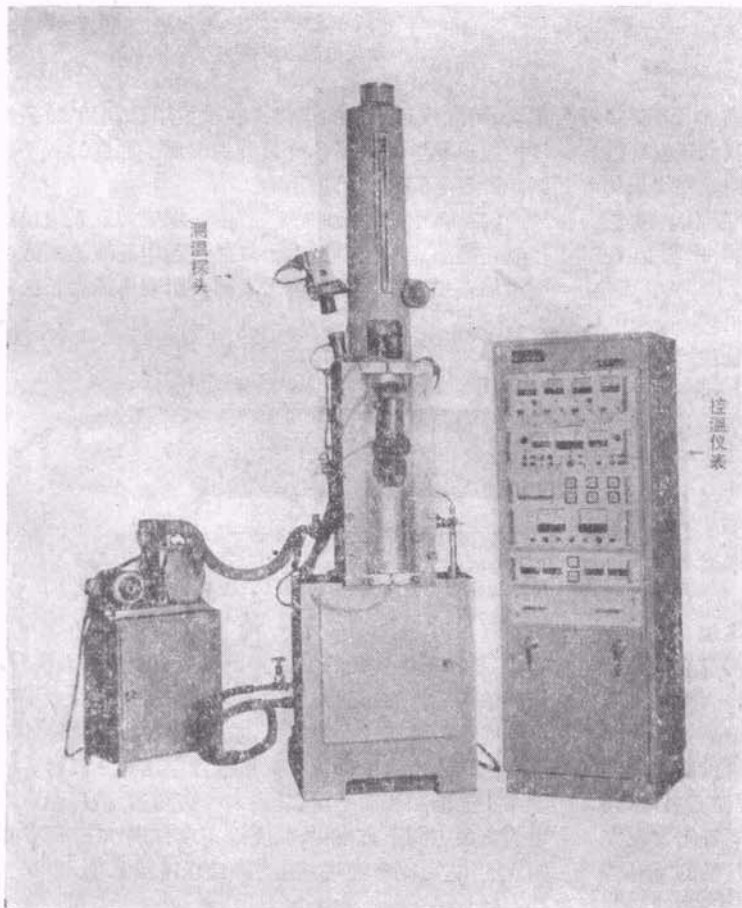


图 2 控制液面温度的单晶炉

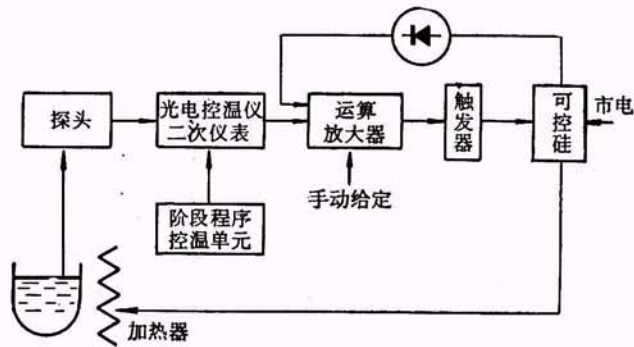


图3 单晶炉控温原理图

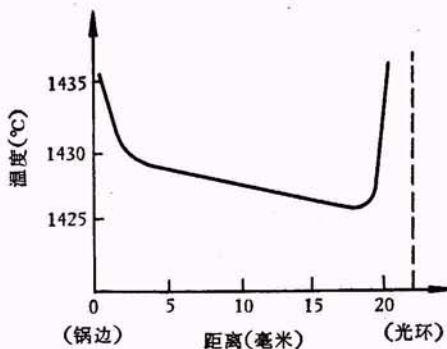


图 5

内温度变化量只有5度左右。我们把瞄准点选择在“光环”外4~6毫米处。在测量时我们还发现，由于存在着冷热液体间对流等因素的影响，在坩埚的同一直径上液面温度的瞬时值有几度的起伏，但温度的平均值是稳定的。因此只能取温度的平均值控温。

经过一段时间对液面温度控制拉晶工艺摸索，系统已能正常工作，拉出的单晶质量较稳定。选择适当的拉速和坩埚升速配合，可自动拉出等径段表面光滑、直径偏差小于1毫米的单晶硅。图6是自动控制拉出的一公斤硅单晶照片，在等径段直径偏差小于0.6毫米。

与原设备控制石墨坩埚温度比较，本系统有如下优点：

(1) 对坩埚控温系统来说，每当更换加热器或石墨坩埚、甚至更换石英坩埚都对工艺参数有明显影响，给操作和实现自动控制带来较大困难。液面温度控制系统由于直接定量地控制了单晶生长区附近液面温度，因而使操作工艺参数(不同阶段温度设定值的给定规律)重复性好，规律性强。更换石墨坩埚、石英坩埚或加热器，真空拉晶或充气拉晶等因素改变均不影响操作工艺参数。在籽晶和硅液接触的“熔晶”阶段，需要液面的温度是一固定值。紧接着的“缩颈”、“放肩”、“收肩”等阶段，液面温度的升降和拉速改变相

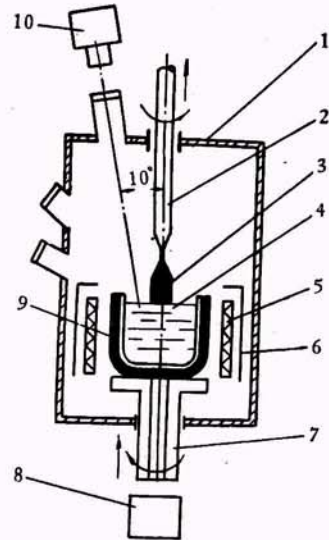


图4 拉晶工艺示意图

1—炉体；2—籽晶杆；3—硅单晶；4—硅熔液；5—加热器；6—保温罩；7—坩埚座；8—辐射高温计；9—坩埚；10—自动光电控温仪探头

配合，可以找到固定的规律。在试拉中已利用“阶段程序控温单元”对上述各阶段分别实现了温度的程序控制。阶段之间切换仍需手动。

(2) 在单晶生长的“等径”段，坩埚控温系统虽能控制石墨坩埚温度，但由于拉晶过程中硅液逐渐减少或坩埚在加热器内升降等因素都会影响单晶生长区温

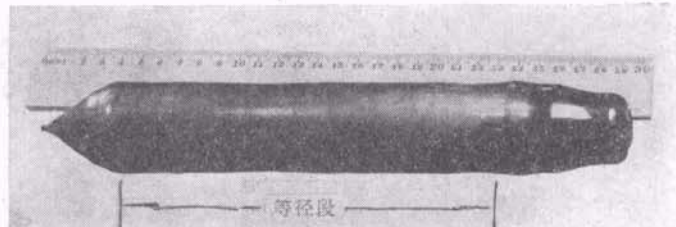


图6 自动控制拉出的单晶(等径段以后转为手动控制拉尾)
等径段尺寸： $\phi 42.2 \pm 0.6 \text{mm}$ ；长190mm

度，不易拉出等直径的单晶。用液面温度控制系统时，只要采用适当的拉速和坩埚的跟速相配合使液面水平位置不变化，维持液面温度恒定就可以拉出等直径的单晶。当硅液面水平位置在拉晶过程中逐渐下降时，由于探头光轴和液面不垂直(成 80° 夹角)，使控温点在坩埚直径方向上有变化，温度给定应有规律下降(参见图5)。这可同样通过上述“阶段程序控温单元”来控制。

(下转第86页)