

文章编号: 1672-8785(2017)11-0039-05

快速退火炉高温计的校温

徐 磊 王振亚 吴文涛

(中国电子科技集团公司第五十五研究所, 江苏南京 210016)

摘 要: 作为半导体生产中的一种重要设备, 快速退火炉需要实现精确、可靠的温度控制。它通常使用辐射式高温计来检测温度。在使用过程中, 由于诸多原因, 需要对高温计进行校温。基于某型进口快速退火炉, 分析了其高温计的校温方法。介绍了热电偶和熔点测试采样方法, 并采用这两种方法丰富了采样数据。通过线性计算估算了 1000 ~ 1500 °C 范围内的校温数据; 基于曲线拟合进行了数据采样, 得到了更加准确的校温结果。通过比较, 分析了两种校温方法各自的优缺点。结果表明, 线性计算校温法更适用于 1100 °C 以下的校温; 曲线拟合校温法更适用于 1100 °C 以上的校温。

关键词: 高温计; 快速退火炉; 校温

中图分类号: TH7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.11.008

Calibration of Rapid Thermal Annealing Pyrometer

XU Lei, WANG Zhen-ya, WU Wen-tao

(The 55th Research Institution of CETC, Nanjing 210016, China)

Abstract: As an important equipment for semiconductor production, Rapid Thermal Annealing (RTA) needs precise and reliable temperature control. Usually, it uses a pyrometer to measure its temperature. In the use of the pyrometer, because of many reasons, the temperature of the pyrometer should be calibrated. On the basis of a certain imported rapid thermal annealing furnace, the temperature calibration method of its pyrometer is analyzed. Both thermocouple and melting-point sampling methods are presented and are used to enrich the sampling data for temperature calibration. The temperature calibration data in the range from 1000 °C to 1500 °C are estimated by linear calculation. Through the data sampling based on curve fitting, more accurate temperature calibration results are obtained. The advantages and disadvantages of both temperature calibration methods are analyzed by comparison. The result shows that the linear calculation temperature calibration method is more suitable for the temperature calibration below 1100 °C and the curve fitting temperature calibration method is more suitable for the temperature calibration above 1100 °C.

Key words: pyrometer; RTA; temperature calibration

0 引言

在半导体生产中, 退火就是将被注入衬底加热到一定高温, 进而修复被离子注入损伤的

衬底的晶格结构; 且将杂质原子移动到晶格点上, 从而激活杂质原子。作为一种退火方式, 快速退火具有极快的升温速度, 最高可达每秒几十摄氏度, 并且目标温度短暂持续。因此, 该方

收稿日期: 2017-06-16

作者简介: 徐磊 (1984-), 男, 江苏滨海人, 工程师, 硕士, 主要从事半导体生产设备的维修工作。

E-mail: xulei_2012@163.com

法在修复晶格缺陷和激活杂质的同时，还可以实现杂质扩散的最小化。

一个质量优良的退火炉需要满足温度控制精确、重复性高的要求。其中，温度控制误差要求不大于 1℃。精确、可靠的温度控制是优异产品性能和生产安全的保证。

1 退火炉的温度控制

快速退火炉采用由高速数字 PID 温度控制器、热电偶、高温计和热源构成的闭环控制系统进行精确控温。通过对不同区域的卤素管灯进行协同控制，可以补偿温度控制过程中各个区域的温度差异，使得衬底上不同区域的温度保持一致。由于被安装在腔体底部，高温计只能接收到衬底背面的辐射，而无法接收到灯的辐射。因此，高温计能够准确测量衬底温度。这种快速退火炉支持不高于 1500℃ 的退火工艺。本文选择量程为 [400℃, 1500℃] 的高温计作为退火工艺中的温度传感器；使用 K 型热电偶作为 1000℃ 以下校温工艺中的传感器，并将热电偶的温度作为高温计校温的参考标准。图 1 所示为快速退火炉的温控结构。

2 高温计的校温原理

2.1 高温计的介绍

本文所述高温计为热辐射光学高温计。如图 2 所示，当高温计接收到被测物体的红外辐射时，光学信号经过过滤、光电转换和放大等处

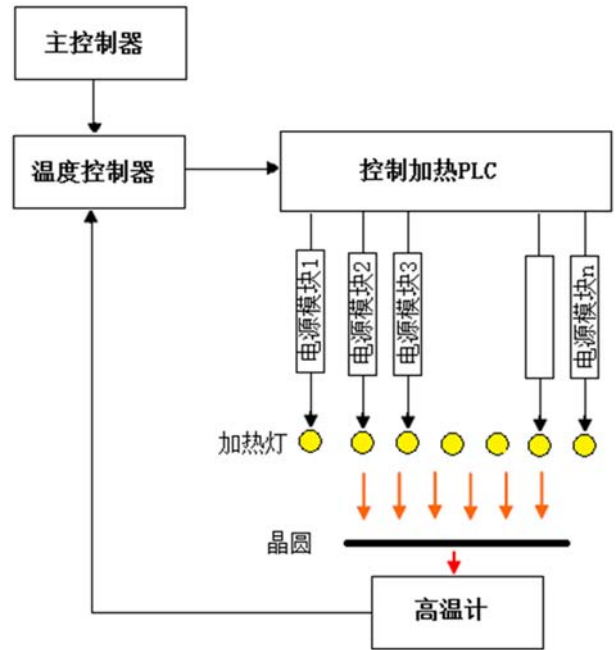


图 1 快速退火炉的温控结构

理后，变成模拟信号并被传输给传感器的信号接口电路模块。该模块对信号进行 A/D 转换，并将其转换为可被计算机识别的数字信号。下文将反馈给计算机的这个数字信号简称为高温计反馈值。

2.2 校温表

根据斯蒂芬-玻耳兹曼定律，物体的温度与其辐射量及光谱发射率有关。对于快速退火炉来说，高温计接收到的辐射量主要取决于衬底材料、掺杂、表面自然氧化层以及衬底温度等因素。针对同种类型的衬底（即材料、掺杂和表面

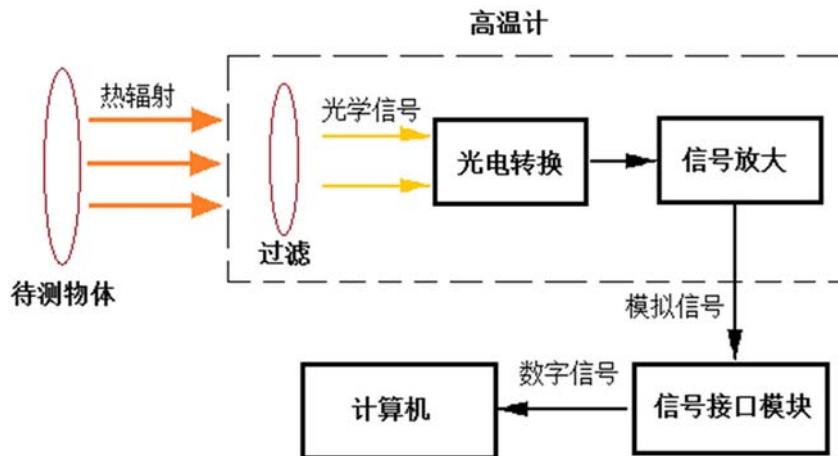


图 2 高温计的信号处理示意图

自然氧化层均相同的衬底), 高温计接收到的辐射量与衬底温度有关。因此, 对于同种类型的衬底而言, 高温计的反馈值与衬底温度一一对应。这种对应关系构成了校温数据。校温表就是用于保存若干个衬底温度与高温计反馈值之间关系数据的表格。如表 1 所示, 不同的温度对应于不同的高温计反馈值。计算机根据高温计反馈的信号值和校温表, 便可计算出衬底的实际温度。

表 1 某一衬底的高温计校温表

温度 (°C)	高温计反馈值
22440	400
24019	450
25632	500
...	...
39043	950
40463	1000
54660	1500

针对不同类型的衬底, 高温计接收到的辐射量与衬底温度之间的关系互不相同。每种衬底都有一个与之对应的校温表。计算机里保存有若干个校温表, 所以能够满足多种衬底的需要。事实上, 校温手段就是创建新的校温表, 即针对某一种衬底, 建立温度与高温计反馈值之间的一一对应关系。在工艺过程中, 根据具体衬底选用相应的校温表。

实际使用中需要校温的情况有以下几种:

衬底类型发生改变; 高温计被更换; 工艺参数发生改变; 透镜被污染、清理或者重新安装。

3 线性计算校温法

3.1 热电偶校温

K 型热电偶的测量范围为 $[-200^{\circ}\text{C}, 1300^{\circ}\text{C}]$ 。考虑到在 1000°C 以上的环境中存在使用寿命低等问题, 我们选择在 $[400^{\circ}\text{C}, 1000^{\circ}\text{C}]$ 范围内对其进行校温。校温时, 运行校温程序。当温度达到每个采样点后再稳定 30 s, 接着升至下一个采样点, 直到 1000°C 时结束加热。图 3 所示为温度控制曲线。在运行完程序后, 软件会根据升温曲线自动采集采样点的校温数据。如表 2 所

表 2 热电偶校温的采样数据

温度 (°C)	高温计反馈值
400	22925
450	24504
500	26055
550	27548
600	29041
650	30514
700	31914
750	33310
800	34647
850	35959
900	37281
950	38569
1000	39741

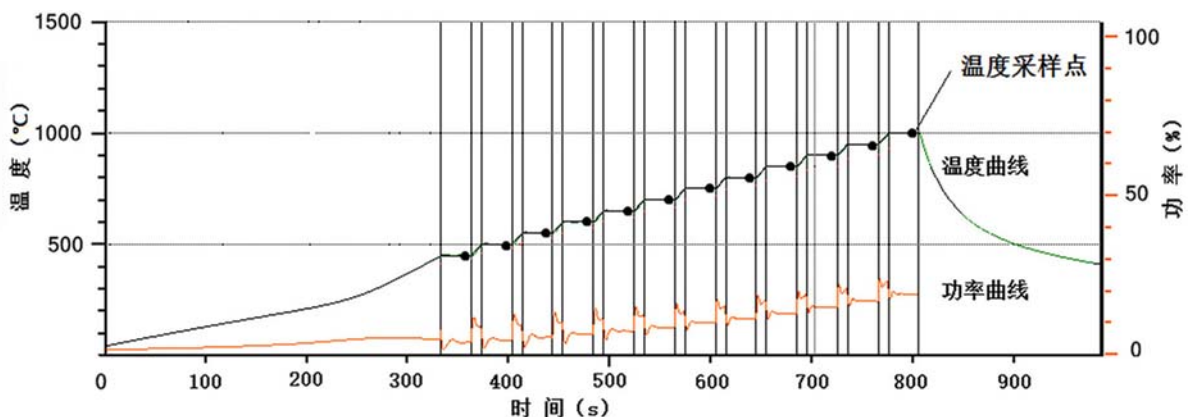


图 3 400 ~ 1000 °C 校温程序的温度控制曲线

示, [400 °C, 1000 °C] 范围内的校温数据被记录在校温表中。

3.2 线性计算校温法

对于半导体材料, 800 °C 以下的光线辐射量与温度之间成非线性变化, 而 800 °C 以上的光线辐射量与温度之间则接近于线性变化。因此, 800 °C 以上的高温计反馈值与温度之间接近于线性变化关系, 即

$$\frac{dn'}{dT'} \approx \frac{dn}{dT},$$

$$T' \in [800^\circ\text{C}, 1500^\circ\text{C}], T \in [800^\circ\text{C}, 1500^\circ\text{C}] \quad (1)$$

式中, n 和 n' 为高温计的反馈值; T 和 T' 为温度。温度 T 对应于高温计的反馈值 n , 温度 T' 对应于高温计的反馈值 n' 。

因此, 可以认为 (1000 °C, 1500 °C) 范围内与 [950 °C, 1000 °C] 范围内的温度变化 ΔT 与高温计的反馈值变化 Δn 的比例速率一致。即

$$\frac{\Delta n'}{\Delta T'} = \frac{\Delta n}{\Delta T},$$

$$T' \in (1000^\circ\text{C}, 1500^\circ\text{C}), T \in [950^\circ\text{C}, 1000^\circ\text{C}] \quad (2)$$

转变后,

$$\frac{n' - n_{1000}}{T' - 1000^\circ\text{C}} = \frac{n_{1000} - n_{950}}{1000^\circ\text{C} - 950^\circ\text{C}},$$

$$T' \in (1000^\circ\text{C}, 1500^\circ\text{C}) \quad (3)$$

式中, n_{1000} 和 n_{950} 分别为 1000 °C 和 950 °C 所对应的高温计反馈值。

利用式 (3) 计算温度 T' 分别为 1050 °C、1100 °C、1150 °C、1200 °C、1250 °C、1300 °C、1350 °C、1400 °C、1450 °C 和 1500 °C 时所对应的高温计反馈值 n' (结果见表 3)。

将热电偶采样的 [400 °C, 1000 °C] 范围内的校温数据和通过线性计算得到的 (1000 °C, 1500 °C) 范围内的校温数据组合起来, 生成 [400 °C, 1500 °C] 范围内的校温表, 即线性计算法的校温表 = 表 2 + 表 3。

表 3 通过线性计算生成的校温数据

温度 (°C)	高温计反馈值
1050	40931
1100	42085
1150	43257
1200	44429
1250	45601
1300	46773
1350	47945
1400	49117
1450	50453
1500	51625

4 曲线拟合校温法

曲线拟合校温法根据衬底熔点的校温数据和热电偶校温的部分校温数据, 使用温度曲线拟合程序计算出 1000 °C 到熔点温度之间的校温数据。

线性计算校温法认为, 在 (800 °C, 1500 °C) 范围内, 高温计反馈值与温度之间成线性变化。但是事实上, 在 (800 °C, 1500 °C) 范围内, 随着温度的升高, 高温计反馈值的上升速率变慢, 即

$$\frac{dn'}{dT'} < \frac{dn}{dT},$$

$$T', T \in (800^\circ\text{C}, 1500^\circ\text{C}), T' > T \quad (4)$$

4.1 熔点测试

根据经验可知, 随着衬底温度的上升, 高温计接收到的辐射量变大。但是, 当衬底被加热到熔点后, 表面形貌会发生变化, 高温计接收到的辐射量会急剧减少。此时, 高温计的反馈值明显变小, 计算机显示的温度急剧降低。熔点测试法则利用这一特性, 在已知衬底熔点的情况下, 将衬底加热熔化并记录其将要熔化时的高温计反馈值。本文以熔点为 1407 °C 的衬底为例, 对熔点测试法进行阐述。

在用熔点测试程序进行校温时, 将衬底加热至熔化状态, 即当温度曲线下降时, 立即手动终止加热功能, 最后通过查看历史记录中的升

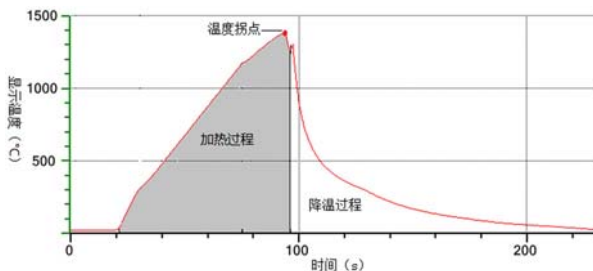


图 4 在熔点测试中, 反馈值温度曲线变化剧烈

温曲线, 记录熔点时的高温计反馈值。由图 4 可知, 温度拐点的温度为熔点温度 1407 °C。

4.2 基于曲线拟合的校温数据

根据热电偶采样的 800 °C、850 °C、900 °C、950 °C、1000 °C 校温数据以及通过熔点测试采样的 1407 °C 校温数据, 使用校温曲线拟合程序计算出 (1000 °C, 1407 °C) 范围内的校温数据 (见表 4)。该数据更加接近于真实温度与高温计反馈值之间的关系。将热电偶采样的 [400 °C, 1000 °C] 范围内的校温数据和通过曲线拟合得到的 (1000 °C, 1407 °C) 范围内的校温数据结合起来, 生成 [400 °C, 1407 °C] 范围内的校温表, 即曲线拟合法的校温表 = 表 2 + 表 4。

表 4 基于曲线拟合的校温数据

温度 (°C)	高温计反馈值
1050	40937
1100	42087
1150	43210
1200	44310
1250	45390
1300	46455
1350	47508
1400	48553
1407	48699

4.3 两种测量方法的对比及使用范围

如图 5 所示, 通过比较线性计算校温法与曲线拟合校温法, 可以发现在 (1000 °C, 1100 °C) 范围内, 高温计的反馈值几乎一致, 两者的差值不大于 6, 温度误差小于 0.3 °C, 温度测量误差较小; 而当实际温度为 1400 °C 时, 高温计反馈值

的差值为 582, 温度误差为 27.8 °C, 温度测量误差较大。

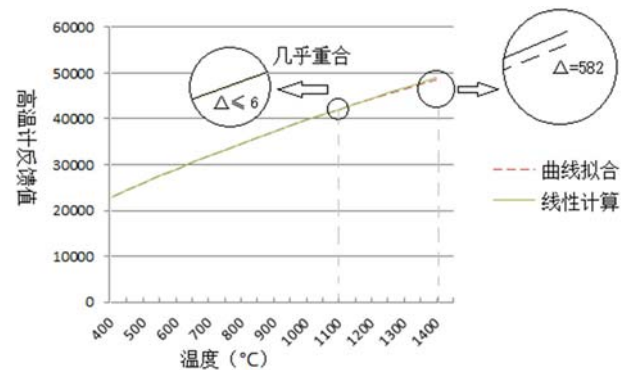


图 5 温度与高温计反馈值的曲线图

线性计算校温法简单方便, 但在 1100 °C 以上时误差较大; 而曲线拟合校温法操作复杂, 但是其误差较小。因此对于退火温度低于 1100 °C 的工艺来说, 使用线性计算校温法能够满足控制精度的要求。但是, 对于退火温度高于 1100 °C 的工艺来说, 高温计则需使用曲线拟合校温法。

5 结束语

本文阐述了快速退火炉高温计的校温表原理, 并通过实例分析了两种校温方法。其中, 线性计算校温法得到的校温表在 1100 °C 以下时比较准确, 但是在更高温度下, 温度误差较大, 无法正常使用; 而曲线拟合校温法得到的校温表在 (1000 °C, 1500 °C) 范围内的温度更加准确, 设备使用更加安全。因此, 用户应根据使用要求来选择合适的校温方法。

参考文献

- [1] 王秀海. 快速退火炉中影响工艺质量的因素分析 [J]. 半导体技术, 2012, 37(3): 39-41.
- [2] 龙会跃. 快速退火炉系统设计与实现 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [3] 夸克, 瑟达. 半导体制造技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [4] Dassau E, Grosman B, Lewin D R. Modeling and Temperature Control of Rapid Thermal Processing [J]. Computers & Chemical Engineering, 2006, 30(4): 686-697.