

基于系统模型的快速退火炉温度控制器设计

龙长林¹, 钟新华²

(1. 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410111; 2. 中国电子科技集团公司第四十八研究所, 湖南 长沙 410111)

摘 要:提出了一种基于系统模型的快速退火炉温度控制方法。首先采用分段线性化方法和系统辨识方法获得精确的快速退火炉系统模型;然后将该系统模型作为温度控制器的前馈控制,用来提前预测控制输出,提高系统的响应速度,并在此基础上增加反馈控制通道,用来修正模型误差和外界干扰。最后,将此温度控制器应用在我们自主研发的快速退火炉系统上,实验验证了此温度控制器的有效性。

关键词:系统模型;系统辨识;温度控制器;前馈控制;反馈控制

中图分类号:TP273⁺.2

文献标识码:B

Design of a Model-based Temperature Controller for Rapid Thermal Processor

LONG Chang-lin¹, ZHONG Xin-hua²

(1. School of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410111, China;

2. 48th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Changsha 410111, China)

Abstract: A model-based temperature control method for rapid thermal processor system is presented in this paper. In order to simplify the nonlinear system model, the method of subsection linearization for system modeling was applied. The parameters of the model were got by a method of system identification. The controller is combined feed forward and feedback mechanisms. The feed forward mechanism is used to calculate a prediction of output of the system, so it can improve responding rapidity of control system. The feedback mechanism is used to compensate for modeling errors and disturbance. The controller has been implemented and evaluated by simulation as well as experimental equipment.

Key words: system modal; system identification; temperature controller; feedforward control; feedback control

1 引言

快速退火炉(RTP)是半导体制造工艺过程中一种重要设备,主要应用于晶片退火(Annealing)、氧化(Oxidation)、化学沉积(Chemical Vapor Deposition)等半导体生产工艺中^[1]。它与传统的热功设备比较,其显著特点在于它升温速度快、工作温度区间大、温度控制精度高、热场分布均匀等。这样对系统的温度控制提出了很高的要求。显然,传统的PID控制不能很好地满足系统温度控制的要求。为了获得更好的控制效果,研究人员在这方面做了大量的研究工作,并且,提出了很多先进的控制方法。如:解耦分散控制(Balakrishnam等提出,1999)、学习控制(Yangquan等提出,1997)、自适应控制(Morales and Dahhou提出,1998)和模型预测控制等。

本文在参阅这些控制方法的基础上并结合我们自己开发的RTP结构特征提出了一种基于系统模型的前馈与反馈(Feedforward and Feedback)相结合的控制方法。其中,前馈控制器用来预测系统当前控制输出,从而提高了系统的响应速度;反馈控制器是用来补偿系统模型误差和外界干扰,并对系统模型进行在线修正,从而提高系统的控制精度和鲁棒性。最后通过实验验证了该温度控制方法的有效性^[2]。

2 RTP系统结构与模型建立

根据结构的不同,快速退火炉有采用单面灯管

作者简介:龙长林(1972-),女,在读硕士,高级工程师,一直从事薄膜设备研究与制造。E-mail:chinalongcl@126.com

收稿日期:2008-11-19

加热,也有采用双面灯管加热的,有使用灯管平行分布的,也有使用灯泡同心分布的。我们自主开发的 RTP 系统结构如图 1 所示,它由以下几个部分组成:金属腔、石英腔、加热灯管、高温计等。其中,加热灯管分为上下两层,成正交对称分布,属于双面加热方式。上下灯管共分为十组,每组可单独调控,从而保证系统热场分布可调。金属腔内壁由高反射性材料制造,提高了系统加热效率。腔内由冷却气体冷却,使系统在整个加温过程中保持相对稳定。高温计用来测量硅片的实时温度,并将获得的硅片实际温度作为温度控制系统的反馈信号。

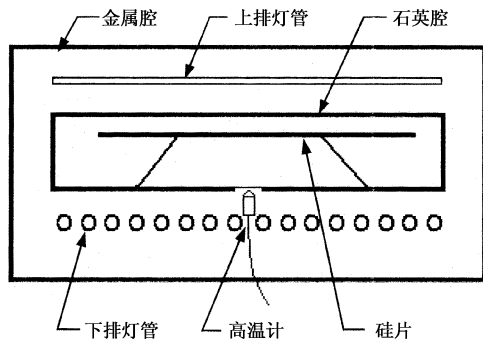


图1 RTP系统结构

在设计 RTP 系统温度控制器之前,首先要建立精确的系统数学模型。由于快速退火炉传热方式主要是通过热辐射,且工作温区大,使得系统存在高度非线性品质。影响系统热模型因素很多,其中主要包括加热灯功率、石英腔的大小、晶片的尺寸、温度计的测温精度和响应速度以及冷却系统冷却效率等方面。其热模型框图如图 2 所示。

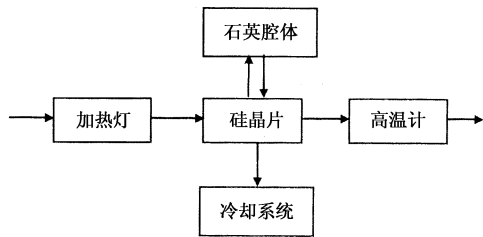


图2 RTP热模型框图

系统模型可以用以下公式表示:

$$C_{\text{lamp}} \cdot \frac{dT_{\text{lamp}}}{dt} = \frac{V^2}{R_{\text{lamp}}} - (\varepsilon_{\text{lamp}} (T_{\text{lamp}}^4 - T_0^4) + \gamma_{\text{lamp}} (T_{\text{lamp}} - T_0)) \quad (1)$$

$$C_{\text{wafer}} \cdot \frac{dT_{\text{wafer}}}{dt} = \eta_w \cdot P - (\varepsilon_{w-q} (T_w^4 - T_q^4) + \gamma_{w-q} (T_w - T_q) + \gamma_w (T_w - T_s)) \quad (2)$$

$$C_{\text{quartz}} \cdot \frac{dT_{\text{quartz}}}{dt} = \eta_{\text{quartz}} \cdot P + \varepsilon_{w-q} (T_{\text{wafer}}^4 - T_q^4) + \gamma_{w-q} (T_w - T_q) - \varepsilon_q (T_q^4 - T_0^4) - \gamma_q (T_q - T_0) \quad (3)$$

$$\tau_{\text{pyro}} \cdot \frac{dT_{\text{pyro}}}{dt} = T_{\text{wafer}} - T_{\text{pyro}} \quad (4)$$

其中, C_{lamp} , C_{wafer} , C_{quartz} 分别为加热灯、晶片和石英腔的热容系数; V 为电压; R_{lamp} 为灯管电阻; $\varepsilon_{\text{lamp}}$, ε_w , ε_q 分别为加热灯、晶片和石英腔的热辐射系数; γ_{lamp} , γ_w , γ_q 分别为加热灯、晶片和石英腔的热传导系数; η_w , η_q 分别为晶片和石英腔获得的加热功率因子; T_{lamp} , T_q , T_w , T_{pyro} 分别为加热灯、石英腔、晶片和高温计的温度; τ_{pyro} 为高温计响应时间。从以上公式可以得知影响 RTP 系统模型参数很多,要想用纯理论方法来获取以上模型的各个参数,确实存在很大困难。这里我们采用了一种系统模型辨识的方法来获取系统模型参数。首先,需对系统模型进行分段线性化,其平衡点选择在系统稳态温度点,从而得到一分段线性模型。

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A \hat{x} + Bu \\ \hat{y} = C \hat{x} \end{cases} \quad (5)$$

然后,选用不同的电功率对系统加热,直到系统达到平衡点,然后关闭加热灯,并记录系统的阶跃响应和零输入响应过程;最后,采用最小二乘法辨识出系统模型参数。辨识过程如图 3 所示。

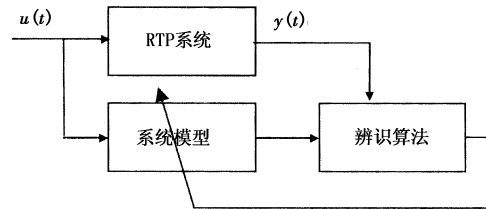


图3 辨识过程原理

将获得的模型进行实验验证,结果如图 4 所示。由设定温度曲线,通过系统反向模型计算出灯管应加功率,并实测系统的温度输出。从图 4 可知此方法获得的系统模型和实际系统相匹配^[3]。

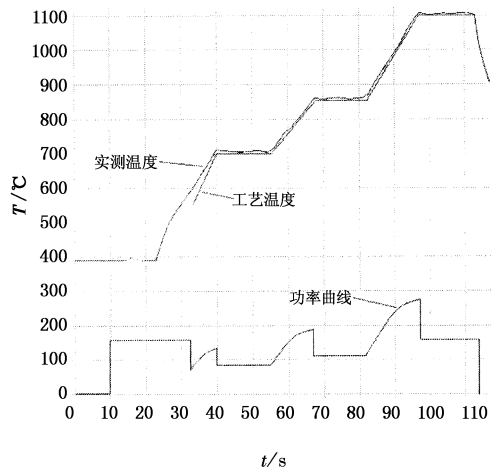


图4 系统模型验证

3 温度控制器设计

快速退火炉的温度控制方法与普通的温度控制方法有很大的差别。主要在于快速退火炉要求升温速度快以及设定工艺曲线是一分段非光滑曲线,因此,要控制系统温度精确跟踪设定温度曲线,尤其在工艺曲线的拐点处保证温度不过冲是最大的挑战。为了满足系统要求,本文设计了一种基于系统模型的温度控制器,控制器框图如图5所示。

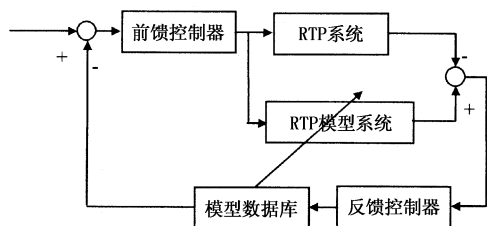


图5 基于系统模型的温度控制器

该温度控制器主要包括基于系统模型的前馈控制器(Feedforward Controller)、反馈控制器(Feedback Controller)和系统模型数据库(Model Database)。其中,由给定温度值,通过前馈控制器来预测当前加热灯的输出功率,然而灯管的实际输出功率应在一个限定的区间内 $[0, M]$,其中 M 为输出功率与总功率的百分比,最大值为1,从而会导致系统实际温度与设定温度不一致。为了解决这一矛盾,这里将灯管的实际功率作为系统的模型输入,其输出可用来预测系统的温度值,预测温度值与实测温度值之偏差用来作为反馈控制器的输入。这种控制器的优点是:由于前馈控制器的存在,即使在没有反馈信息的情况下,也能控制系统实际温度较好地跟踪设定温度,反馈控制器采用传统的PID控制器,其作用是对温度残差进行修正,这样提高了系统的控制精度和鲁棒性。由于影响系统模型的因素很多,例如排风条件的改变,冷却水温度改变等都会导致系统模型的改变,因此,此控制器中还设计了一个系统模型数据库,其作用是用来对系统模型进行实时在线修正^[4]。

4 实验与分析

将此温度控制器应用到我们自主开发的快速退火炉系统进行实验,实验条件:晶片尺寸8in(1in=2.54cm),初始加热功率16%,初始加热时间8s,温度上升速度70℃/s,稳态温度1050℃,保持时间10s。实验结果如图6所示,当在上升阶段(Ramp)和保持阶段(Hold),此控制器均能很好地控制系统的实际温度精确地跟踪设定温度,然而,在上升段与保持段的拐点处,会存在较大的温度过冲现象,最大

超调值为10.7℃。

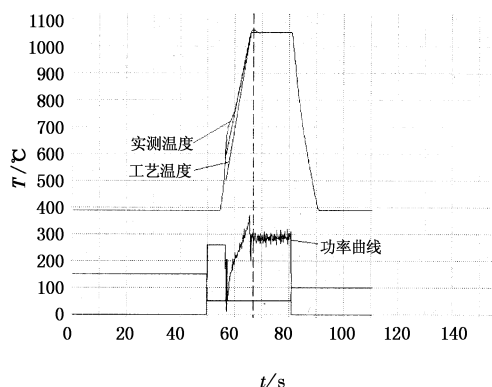


图6 晶片退火实验(一)

为了消除拐点处的超调现象,需对控制器作进一步改进。这里我们采用了分段控制方法,改进后的控制器主要包括两个不同的控制段:正常控制段和转换控制段。其中,正常控制段就是用于温度上升期和保持期,采用的控制方法就是前面所讲述的控制方法。转换控制段就是用于在从温度上升段将要过渡上温度保持段的某一时间段中,在这期间,控制输出设置为一固定值(POWER),间隔时间设定为 Δt 。当然,这两个控制参数不是任意给定的,而是由系统模的参数所确定的^[5]。

将改进的温度控制器应用到实际 RTP 系统进行实验。实验(二):实验条件同上,实验结果如图7所示,改进后的温度控制器很好地解决了系统在拐点处温度过冲现象,最大超调量为1.5℃,最大稳态误差为-0.6℃。

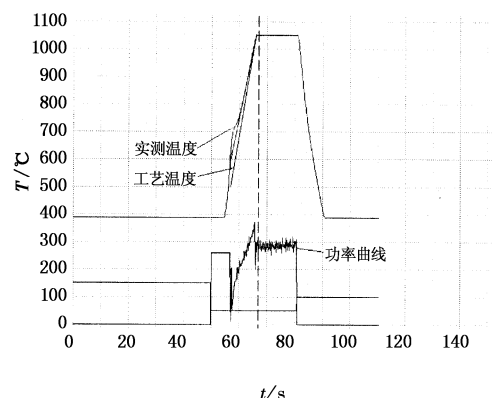


图7 晶片退火实验(二)

为了证明该温度控制器在其他温度段也能满足设计要求,因此对稳态温度在(600~1250℃)区内各温度值进行了实验,其中实验(三)的实验条件:晶片尺寸8in,初始加热功率16%,初始加热时间8s,温度上升速度70℃/s,稳态温度850℃,保持时间10s。实验结果:最大超调量1.1℃,最大稳态误差-0.9℃。实验证明了该温度控制器在其他温

度段也能获得很好的控制效果。

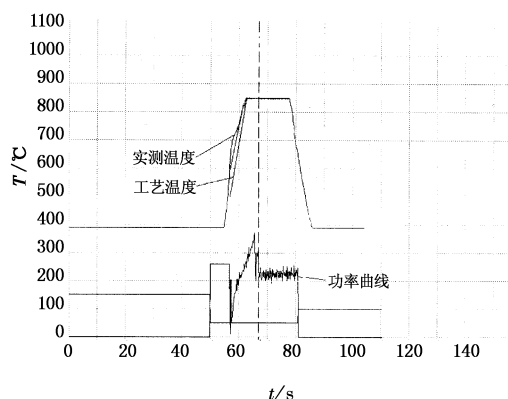


图8 晶片退火实验(三)

5 结论

基于系统模型的分段控制方法能获得精确的温度控制,实验验证了此控制方法完全能满足 RTP 系统升温速度快(100℃/s)、工作温区大(600~1250℃)、控制周期短、控温精度高($\pm 2.0^\circ\text{C}$)等设计要求。同时,该方法也能应用到其他高精度温控

系统。

参考文献:

- [1] Jin Young Choi, Hyun Min Do, Hong Seok Choi. Adaptive control of wafer temperature in RTP[J]. IEEE International Society of Industrial Ecology, 2001, 6(2): 153-157.
- [2] Dick De Roover, Abbas Emami-Naeimi, Jon L Ebert. Trade-offs in temperature control of fast-ramp RTO and RTA systems[C]//7th International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors RTP, 1999.
- [3] Eyal Dassau, Benyamin Grosman, Daniel R Lewin. Modeling and temperature control of rapid thermal processing[D]. Israel: PSE Research Group, Dept. of Chemical Engineering, 2005.
- [4] Peter Vandenabeele, Wayne Renken. Modeling based temperature control in RTP[C]//RTP'2000.
- [5] Krishna Balakrishnam, Thomas Cooper. Model-based control of a rapid thermal processor[C]//RTP'96, 27.

全国第十二届红外加热暨红外医学发展研讨会征文通知

由中国光学学会红外光电器件专业委员会、中国光学光电子行业协会红外分会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会、锦州市光学学会、云南省光学学会、中国机械工程学会工业炉分会、中国电工技术学会电热专业委员会、武汉国家红外产品质量监督检验中心联合主办,南京大学光通信工程研究中心、南京丹联科技有限公司承办,《红外技术》编辑部、《工业加热》编辑部协办的全国第十二届红外加热暨红外医学发展研讨会,定于2009年10月在南京市召开。

本届会议主要反映与交流近年来红外加热技术及红外医学领域的新成果和新进展。

一、应征论文范围

1. 红外加热技术在国民经济中地位、作用及发展前景的综述、评论文章;
2. 红外加热元件、红外辐射涂料的新成果、新工艺及相关技术研究;
3. 红外与物质相互作用,红外加热理论与机理的研究;
4. 各种红外加热装置的优化设计与制造及应用实例剖析;
5. 红外加热测试技术、物质的红外光谱及相关技术研究;
6. 红外加热在生物学和医学中的应用等;
7. 红外医学新仪器、新材料、新技术、新成果及国内外发展动向;
8. 红外医学的临床理论研究,临床应用报告及相关的激光、微波、毫米波研究与应用。

二、应征论文作者请在2009年8月30日前将500~800字论文摘要寄到:大连理工大学物理与光电工程学院栾文彦教授收(邮政编码:116023),并请作者注明详细通讯地址、工作单位及职务、职称和邮政编码。

三、经审稿录用的论文摘要集将由《红外技术》编辑部、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社编辑出版。

四、会议筹备组的通信地址:锦州市13号信箱锦州市光学学会(邮政编码:121000),联系人:王永钧,电话:0416-2650160,2135100,传真:0416-2135100, E-mail:lykj88@163.com。

(全国第十二届红外加热暨红外医学发展研讨会筹备组)