

基于 PLC 的原子沉积设备控制系统设计与实现

邹兆瑞¹, 李壮举¹, 曹少中², 陈强², 史子棋¹

(1.北京建筑大学 电气与信息工程学院, 北京 102616; 2.北京印刷学院, 北京 102600)

摘要: **目的** 为提高原子沉积镀膜工艺的可靠性, 稳定薄膜质量, 设计基于可编程逻辑控制器 (PLC) 的一种原子层沉积设备控制系统。**方法** 针对工作原理和工艺需求, 根据传感器和执行器的特点, 确定了以西门子 S7-200 Smart PLC 为控制器, 以昆仑通态 1070Gi 触摸屏作为人机界面的硬件系统方案, 实现所有逻辑控制; 并利用 PLC 的晶体管输出端子, 采用“PID+PWM”技术进行加热区域温度控制。**结果** 该控制系统实现了原子沉积镀膜一键操作, 保证了镀膜过程中高精度温度均匀性要求 ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), 确保了设备的可靠性和沉积薄膜的可重复性。**结论** 经实际应用, 证明该控制系统具有稳定性好、误差小、自动化程度高等优点, 达到了工艺要求。

关键词: 原子层沉积; PLC; 温度控制; 脉冲宽度调制

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)01-0162-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.01.018

Design and Realization of Atomic Deposition Equipment Control System Based on PLC

ZOU Zhao-rui¹, LI Zhuang-ju¹, CAO Shao-zhong², CHEN Qiang², SHI Zi-qi¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to design an atomic layer deposition equipment control system based on programmable logic controller (PLC) to improve the reliability of atomic deposition coating process and stabilize the film quality. According to the working principle and process requirements, as well as the characteristics of sensors and actuators, a hardware system scheme with Siemens S7-200 Smart PLC as the controller and MCGS 1070Gi touch screen as the man-machine interface was determined. All logic control was realized; and the "PID+PWM" technology was used to control the temperature of the heating area with the transistor output terminal of the PLC. The control system realized one-key operation of atomic deposition coating, which ensured high-precision temperature uniformity requirements ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) during the coating process, and ensured equipment reliability and repeatability of deposited films. After practical application, it is proved that the control system has the advantages of good stability, small error and high degree of automation, and meets the technological requirements.

KEY WORDS: atomic layer deposition; PLC; temperature control; pulse width modulation (PWM)

收稿日期: 2022-03-03

基金项目: 国家自然科学基金 (11875090); 北京市教委联合项目 (KZ202010015021); 北京市属高校高水平创新团队建设计划项目 (IDHT20190506)

作者简介: 邹兆瑞 (1997—), 男, 硕士生, 主攻控制工程。

通信作者: 李壮举 (1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为建筑节能、复杂系统控制、机器人控制技术。

原子层沉积 (Atomic Layer Deposition, ALD) 镀膜是一种可以将物质以单原子膜的形式逐层镀在基底表面的真空镀膜方法^[1]。自 1977 年, 芬兰的颂多拉 (Tuomo Suntola) 博士发明以来, 原子层沉积技术已经逐渐成为了一项沉积功能薄膜的重要技术, 具有保型性高、薄膜质量高、表面均匀性好、厚度可精确控制、无孔性等优点。

近年来, 原子层沉积镀膜技术在国家重点聚焦的高端制造, 特别是微电子这一卡脖子领域得到越来越多的重视, 如在能源领域, ALD 技术在太阳能电池传输层材料制备、减反薄膜制备、钝化层薄膜的制备等都表现出明显的优势, 为太阳能电池电能优化设计和高效利用提供重要支持; 在半导体领域, 因其制备的薄膜高度均匀和高度保型, 大大提高了微电子器件如芯片、存储器、互连线等性能, 故得到广泛应用, 是解决国家关键“卡脖子”问题亟待突破的技术之一; 除此之外, 因为原子层沉积薄膜致密、无缺陷, 在有机发光二极管 (Organic Light Emitting Diode, OLED)、电子发光元件、柔性印刷电子器件、柔性穿戴电子设备等的封装方面成为首选方法^[2-7]。

在原子沉积薄膜过程中, 控制系统对前驱体及反应腔室温度、反应真空度、气体流量和配比等参数的精准控制是影响薄膜生长的至关重要因素^[8]。同时, 因为原子层沉积薄膜生长速度很慢, 沉积 100 nm 薄膜需要工作时间很长, 设备的稳定性和可重复性也非常重要, 因此研制精度高、造价低、集成性强的原子层沉积控制系统显得尤为重要。目前国外公司如 Beneq、Picosun 等有相关成套原子层沉积镀膜设备生产经验, 但其设备购置周期长, 且造价高昂, 同时也存在一定的不足, 如为了达到温度的精确控制, 设备体积庞大等。国内 ALD 技术处于初级发展阶段, 原子层沉积设备主要还处于高校实验室应用阶段; 仅有少数企业有相关研发, 例如: 嘉兴科民、无锡迈纳德等有销售, 但相比于国外公司, 其自动化程度有待改进, 缺乏核心竞争力, 因此, 需要尽快在控制方面建立配套方案, 提高生产效率, 稳定生产品质。

文中针对北京印刷学院新研发的原子层沉积设备, 设计一种基于小型可编程控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 与触摸屏人机界面 (Human Machine Interaction, HMI) 结合的自动控制系统, 用户只需设定工艺参数即可一键式操作, 集温度、气压在线观察, 数据运算、逻辑控制、生产配方可选择和存储等任务于一体, 由 PLC+HMI 为核心的控制系统实现^[9-12], 提高镀膜的自动化程度, 增加设备稳定和可重复性。

1 原子沉积设备的工作原理与硬件结构

1.1 工作原理

本原子层沉积系统示意图见图 1。其中编号

1—10 为设备电磁阀, 11 为气体质量流量计, 12 为设备真空反应腔, 13 为真空泵。原子层沉积镀膜的主要工艺流程为: 在规定的条件下 (如确定的温度、放电功率), 设备的反应腔抽到一定的真空度后, 打开电磁阀, 使前驱体脉冲输入反应腔, 使其在基片表面进行吸附反应, 然后脉冲输入一定惰性载气 (N_2 或者 Ar), 利用惰性气体吹走剩余没有反应的前驱体和反应副产物, 再脉冲输入氧化物, 和开始吸附的单体反应, 生长一个原子层薄膜。循环此工艺过程实现薄膜沉积。用户可根据需求改变前驱体成分和输入量、循环次数、温度、气压等以控制薄膜沉积的成分与厚度。

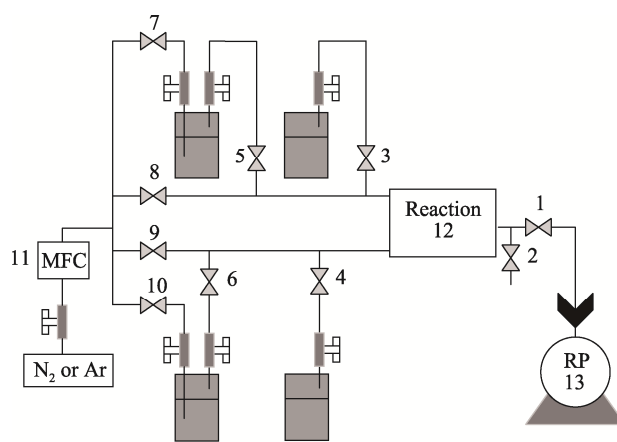


图 1 原子层沉积系统示意图

Fig.1 Schematic of atomic layer deposition system

1.2 硬件结构

原子层沉积系统工艺流程中含有多种物理量, 选用 PLC+HMI 为核心的控制系统为方案, 主要包括 3 个层面: 人机界面、控制器、执行器和传感器^[13], 见图 2。

1.2.1 系统的传感器和执行器

1) 传感器。电阻真空变送器, 用来测量镀膜反应腔内的实时压力, 产生 0~10 V 电压信号接入 PLC 模拟量输入模块; 热电阻 Pt100, 用来测量系统加热的温度, 产生的电流信号接入 PLC 的热电阻模块。

2) 执行器。电磁阀用于控制设备各段气体的通断, 小型变压器驱动设备用于反应腔内真空条件下的放电提供电源, 均接入 PLC 数字量输出模块进行控制; 交流 220 V 加热带与加热套, 接入固态继电器, 接收来自 PLC 经脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 的控制信号; 气体质量流量计, 用于调节气体流通开度, 接入 PLC 模拟量输出模块, 接收 0~5 V 的电压控制信号。

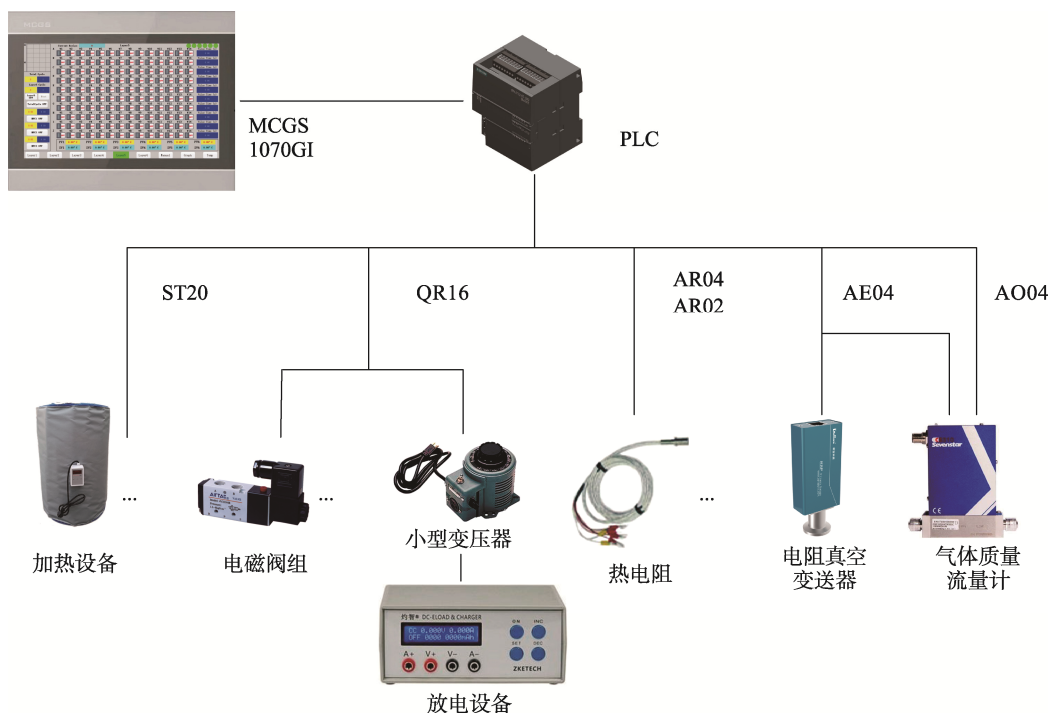


图 2 原子沉积设备控制系统硬件结构

Fig.2 Hardware structure in atomic deposition equipment control system

1.2.2 控制器

本设备的控制逻辑较为复杂,控制点数较多,控制精度要求高。据此,PLC 选用西门子公司生产的 S7-200 Smart ST20 可编程控制器,其基本指令执行时间可达 $0.15 \mu\text{s}$,晶体管型数字量输出触点可频繁通断,且该 PLC 具有 PID 与 PWM 向导功能,可接入 6 个扩展模块和 1 个信号板,适用于 I/O 点数较多、逻辑控制较为复杂的小型工程。控制系统的 I/O 变量见表 1。通过 STEP 7-MicroWIN SMART 软件对 PLC 编程。

表 1 PLC 主要变量
Tab.1 Main variables of PLC

模块名称	变量描述	地址
ST20 CPU	加热设备控制信号	Q0.0—Q0.5
QR16	电磁阀线圈	Q8.0—Q9.1
	放电设备控制信号	Q9.6
AE04	气体质量流量计开度信号	AIW32
	电阻真空变送器电压信号	AIW38
AR04	热电阻 PT100 温度信号	AIW48—AIW54
AR02	热电阻 PT100 温度信号	AIW64—AIW66
AQ04	气体质量流量计控制信号	AQW80

1.2.3 人机界面

综合考虑经济性与可靠性,人机界面硬件选用昆

仑通态 10 寸 1070Gi 四线电阻式触摸屏,由 24 V 直流供电,触摸屏与 PLC 之间通过以太网口进行连接。利用 MCGS Pro 组态软件进行界面设计,除了电磁阀通断、温度设定等操作区域外,界面还显示了系统实时温度、气压等运行动态,用于对设备参数进行监控和修改。

2 控制系统的软件设计

设备的功能要求:在接通电源后,用户在触摸屏中设定工艺参数,包括沉积温度、流量计开度、前驱体预热温度、前驱体脉冲输入时间、惰性气体清洗时间、氧化物输入时间、等离子体作用时间、镀膜周期次数和沉积层数等。设备运行后,自动进行薄膜沉积,运行到设定循环周期数,设备自动停机。根据此要求,进行 PLC 与触摸屏设计,达到控制目的。

2.1 PLC 程序设计

PLC 的程序设计主要分为两部分:系统逻辑控制和高精度加热控制。

根据设备的功能要求,系统设有 1 个总循环和 6 个层循环,控制逻辑流程图见图 3。

系统运行时,每个循环中都有 3 个状态:判断本层是否处于总循环之中、本层正在循环、层循环结束。系统自动运行后,判断本层是否在镀膜循环之中。若是,则执行层镀膜,达到镀膜设定层数后层循环结束;若否,则直接到达层循环结束。层循环判定结束后,进入下一层镀膜,进行同样的判断,类推直至总循环结束。

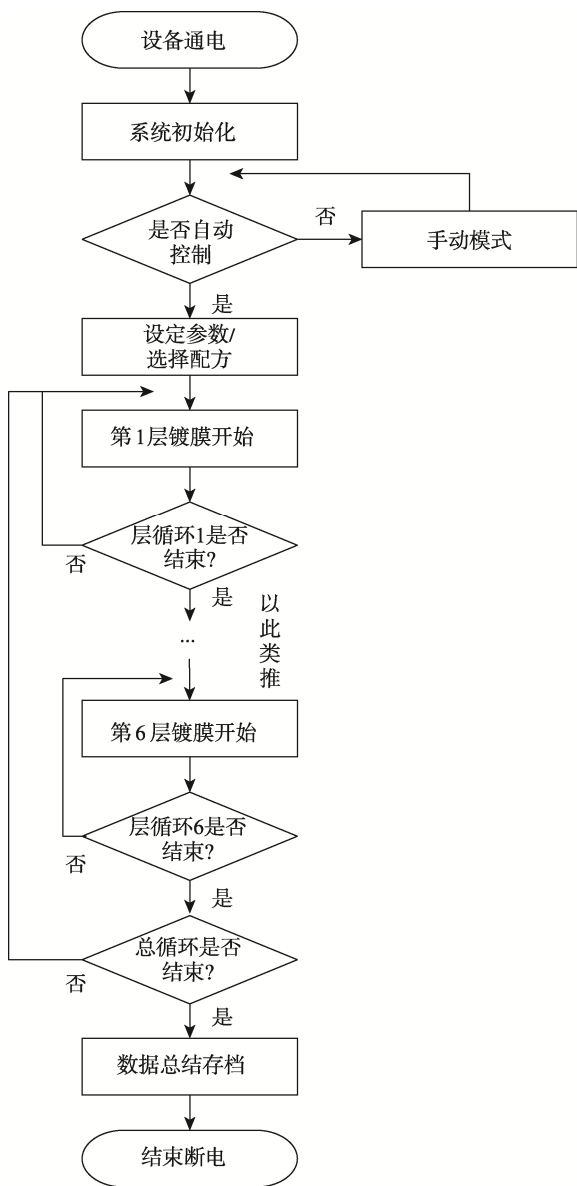


图 3 控制逻辑流程
Fig.3 Control logic flow chart

其中每层循环有 3 种条件可以判断层循环结束：镀膜层数到达设定层数；用户在触摸屏界面提前按下“Next Layer”跳转至下一个层循环；用户设定本层不执行或者执行层数为 0。

在镀膜过程中，反应温度区间由单体类型和沉积的薄膜决定，温度过高或者过低都会影响薄膜的成膜质量和性能^[14]。现要求温度控制系统的稳态误差小于±1℃；过渡过程的最大超调量小于 2℃。由于被控对象的保温性能良好且没有散热措施，存在较大的惯性，所以利用开关量进行简单的阈值控制容易出现过大超调，很难实现精准有效的调节，这会影响镀膜质量，甚至导致镀膜失效^[15]。故该系统采取 PID+PWM 控制开关量加热装置的控制方法，使被控温度更好地追踪设定值，达到控制效果，图 4

为系统加热部分方框图。

本设备共有 6 组加热设备,虽然选用的 ST20 PLC 仅支持 2 路高频 PWM,但在加热过程中, PWM 将设定较长周期,频率要求不高,考虑到经济适用性,利用其 CPU 自带晶体管输出,便可满足加热要求。故本系统在晶体管输出触点的硬件基础上,利用“PID+PWM”方法进行加热,既可节约成本,又能达到控制效果^[16]。图 5 为加热部分梯形图程序。

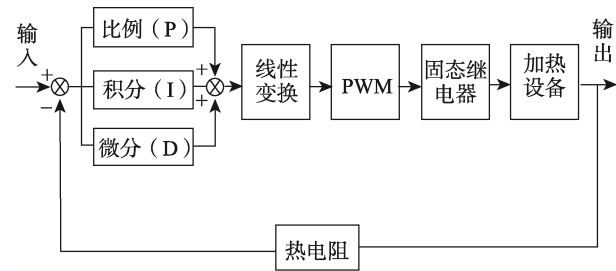


图 4 系统加热部分方框图
Fig.4 Block diagram for heating part of system

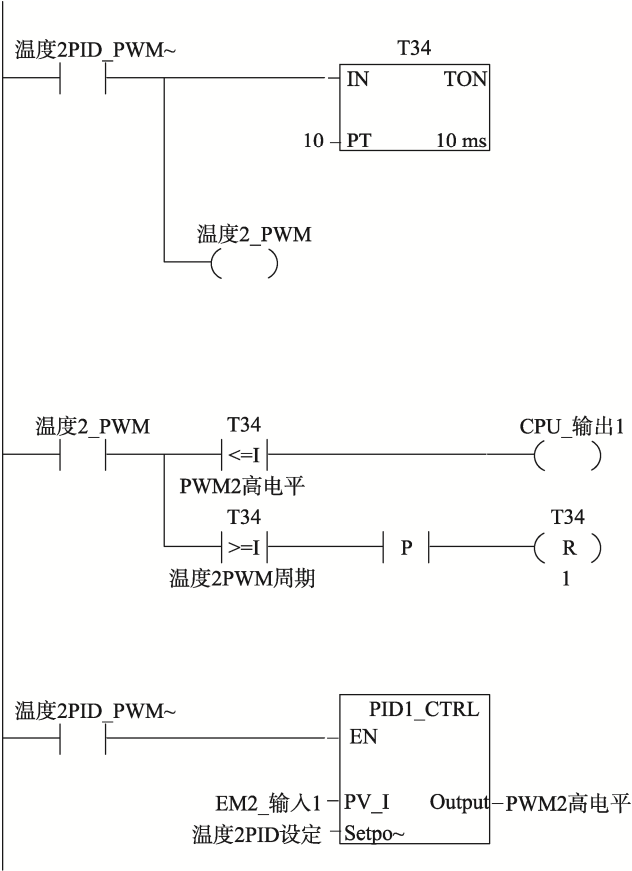


图 5 加热部分梯形图
Fig.5 Ladder diagram of heating part

在 PWM 周期为 10 s 的条件下,使用响应曲线法对 PID 参数进行整定,得到可满足控制要求的 PID 参数见表 2。

表 2 PID 参数
Tab.2 PID parameters

名称	参数	单位
增益	10.508	
采样时间	1.0	s
积分时间	6.635	min
微分时间	0.0	min

2.2 触摸屏程序

触摸屏的层循环监控界面见图 6。除人机交互以外,触摸屏还完成部分量程变换和数值计算,如反应腔内部压强计算,计算式为:

$$p = 10^{\frac{U-3.572}{1.268}} \quad (1)$$

式中: p 为反应腔内压强; U 为电阻真空变送器输出电压。

电阻真空变送器输出电压 U 的范围为 0~10 V, 对应 AE04 模块模拟量输入量程范围为 0~27 648。在触摸屏通道处理设置中进行量程变换,得到设备实际输出电压 U ,并在后台运行策略中加入大气压强运行策略,以实时计算真空计示数^[17]。

人机界面使用 MCGS Pro 组态软件设计,加入配方读写系统,用户可根据生产或实验需要,成套存储

或读取原子层沉积镀膜方案,记录设定状态,避免不同原子沉积之间切换后,繁杂的参数设定,如果通过局域网互联,用户亦可将实验数据、配方、曲线等上传至云进行存储或下载至网络节点。

3 测试结果及分析

除了逻辑控制完全正确之外,在温度控制效果方面,根据表 2 参数进行实际调试^[18],分别从室温升至 60、80、150 °C,测得系统各项性能指标见表 3。在上升时间较快的前提下,加热的整个过程中,设备最大温度超过设定温度均小于 0.8 °C,确保了被控温度在跟踪过程的相对稳定性;进入稳态后,被控温度的稳态误差在 0.3 °C 以内,确保了温度控制的准确性,达到了原子层沉积镀膜预期的温度要求。

在工艺操作方面,设备运行后,控制系统替代传统单步手动的烦琐工艺操作,简化了工艺流程,可一次性完成原子层薄膜沉积,促进薄膜沉积工艺的自动化控制,表 4 为原手动操作设备与文中备镀膜耗时对比。在镀膜过程中,自动控制系统的报警组态实时监控设备部件的行状态,在误操作、设备故障等的情况下,及时报警提醒操作人员;在镀膜结束后,可生成报表以供操作人员总结归档,有效降低工作人员的误操作概率,保证工作效率,提高镀膜工艺的成功率。

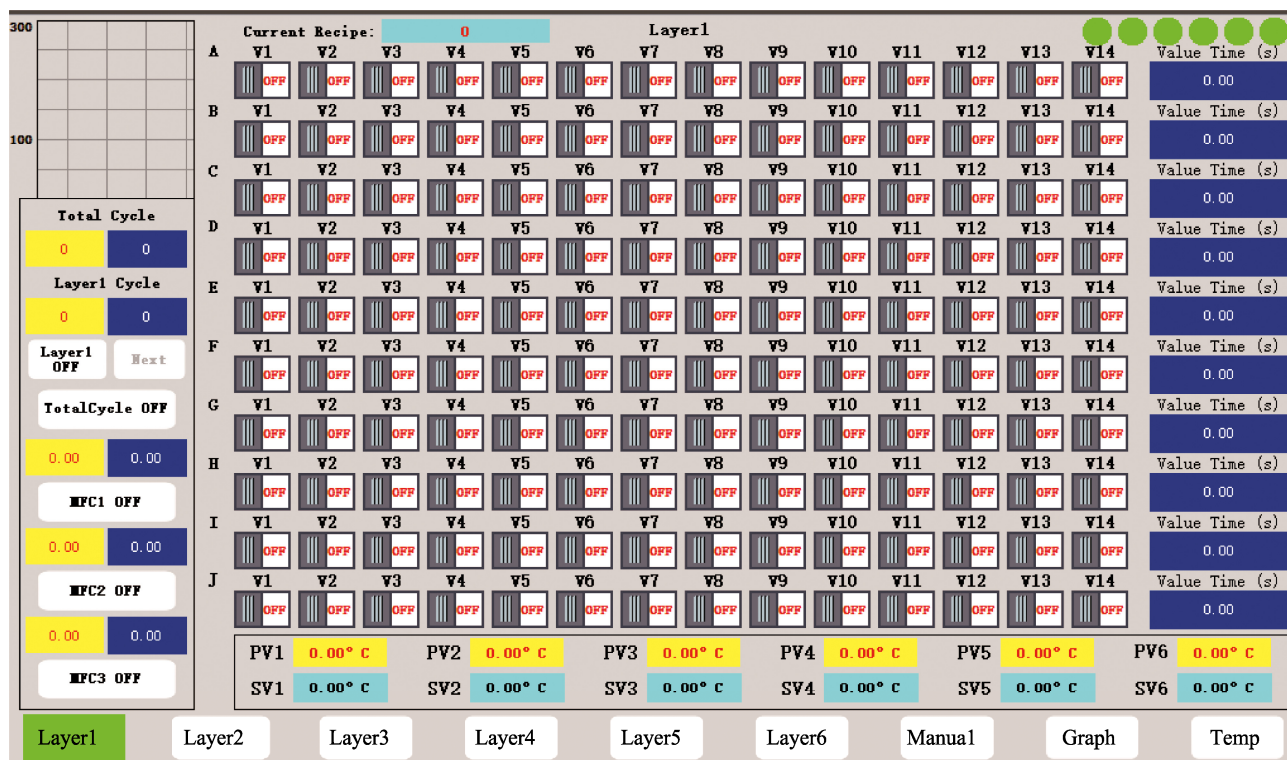


图 6 触摸屏的层循环监控界面
Fig.6 Layer cycle monitoring interface of touch screen

表 3 PID+PWM 控制算法性能指标
Tab.3 Performance index of PID+PWM control algorithm

设定温度/℃	上升时间/s	超调量/%	稳态误差/℃
60	266	0.66	0.12
80	357	0.87	0.30
150	664	0.20	0.19

表 4 耗时对比
Tab.4 Time-consuming comparison min

镀膜形式	30 层	100 层	150 层
手动设备	75	145	195
文中设备	36	82	113

4 结语

为提高原子沉积镀膜的可靠性,稳定性和可重复性,根据设备的生产要求,设计了基于“PLC+HMI”的配套控制系统,实现了传感器、执行器之间协调配合,利用 PID+PWM 的控制方案实现了温度的精准控制,并且实现数据化的生产配方存储、状态监控等。经过调试和实际使用,原子沉积镀膜系统具有良好的可靠性和较高的工作效率,对 ALD 技术在国内的推广使用具有积极作用。

参考文献:

[1] 苗虎, 李刘合, 韩明月, 等. 原子层沉积技术及应用[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 163-175.
MIAO Hu, LI Liu-he, HAN Ming-yue, et al. Atomic Layer Deposition Technology and Its Application[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 163-175.

[2] 杨丽珍, 刘忠伟, 桑利军, 等. 超薄薄膜的原子层沉积和应用[C]// TFC'17 全国薄膜技术学术研讨会论文集摘要集, 合肥, 2017: 34.
YANG Li-zhen, LIU Zhong-wei, SANG Li-jun, et al. Atomic Layer Deposition and Application of Ultrathin Thin Films[C]// TFC'17 National Thin Film Technology Symposium Abstracts Collection, Hefei, 2017: 34.

[3] 廖荣, 康唐飞, 邓世杰, 等. 原子层沉积技术的应用现状及发展前景[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(10): 5-9.
LIAO Rong, KANG Tang-fei, DENG Shi-jie, et al. Application Status and Development Prospect of ALD Technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(10): 5-9.

[4] 刘阳, 张彬祥, 黄楚佳. 柔性 OLED 薄膜封装技术分

析[J]. 光电子技术, 2017, 37(2): 139-145.
LIU Yang, ZHANG Bin-xiang, HUANG Chu-jia. Analysis of Thin Film Encapsulation Technology of Flexible OLED[J]. Optoelectronic Technology, 2017, 37(2): 139-145.

[5] 陈意桥, 陈超, 张国祯. 原子层刻蚀及原子层沉积技术在半导体器件表面钝化中的应用[C]// 粤港澳大湾区真空科技创新发展论坛暨 2018 年广东省真空学会学术年会论文集, 肇庆, 2018: 21-23.
CHEN Yi-qiao, CHEN Chao, ZHANG Guo-zhen. Application of Atomic Layer Etching and Atomic Layer Deposition Technology in Surface Passivation of Semiconductor Devices[C]// Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Vacuum Technology Innovation and Development Forum and 2018 Guangdong Vacuum Society Proceedings of the Academic Annual Conference, Zhaoqing, 2018: 21-23.

[6] 宋晓辉, 李和林, 赵华东, 等. 碳纳米管/金属复合结构原子沉积机制及调控方法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2019, 51(1): 58-62.
SONG Xiao-hui, LI He-lin, ZHAO Hua-dong, et al. Metal Deposition Mechanism and Control Methods of Carbon Nanotube/Metal Composite[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2019, 51(1): 58-62.

[7] BORY O P, SZINDLER M, LUKASZKOWICZ K. Various Applications of Multifunctional Thin Films with Specific Properties Deposited by the ALD Method[J]. Solid State Phenomena, 2019, 4836: 111-123

[8] 林永奔. 基于批量型 ALD 平台的系统控制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013: 1-7.
LIN Yong-ben. Research on System Control Based on Batch ALD Platform[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013: 1-7.

[9] LI Y H, LI Y, ZHANG P. Design of Automatic Control System of Intelligent Garage Door Based on PLC[J]. International Core Journal of Engineering, 2021, 7(6): 328-332

[10] ZANG H D, CHEN Y D. PLC Based Intelligent Air-shower Control Program Design[J]. Scientific Journal of Intelligent Systems Research, 2020, 2(11): 47-51

[11] TIAN F, LI G P. Design of Intelligent Feeding Control System Based on S7-1200 PLC[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 245: 6

[12] BUGROV Y N, KURNASOV E V. Analysis of Cyclic Automatic Systems in Programming Multifunctional Equipment for CNC and PLC Systems[J]. Russian Engineering Research, 2021, 41(4): 302-307

- [13] 邱影杰, 陈曦, 孟祥双. 基于 PLC 的等离子切割工作站控制系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(9): 89-92.
- QIU Ying-jie, CHEN Xi, MENG Xiang-shuang. Design of Control System for Plasma Cutting Workstation Based on PLC[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(9): 89-92.
- [14] 陈兰兰, 孙小杰, 任月庆, 等. 利用原子层沉积技术制备柔性超高阻隔膜研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(12): 1117-1124.
- CHEN Lan-lan, SUN Xiao-jie, REN Yue-qing, et al. Research Progress of Ultra-High Barrier Thin Films Fabricated by Atomic Layer Deposition on Flexible Polymeric Materials[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(12): 1117-1124.
- [15] GAWLIŃSKA-NĘCEK K, WLAZŁO M, SOCHA R, et al. Influence of Conditioning Temperature on Defects in the Double $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ Layer Deposited by the ALD Method[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2021, 14(4): 1038.
- [16] ZHENG F, LU Y, FU S. Research on Temperature Control of Heating Furnace with Intelligent PID Control Algorithm[J]. Thermal Science, 2020, 24: 81
- [17] ZHANG J Y. PID Control Realization of Drying System of the Finishing Line Based on MCGS and PLC[C]// Proceedings of 2020 2nd International Conference on Applied Machine Learning and Data Science(ICAMLDS 2020), Chengdu, 2020: 105-111.
- [18] MOŻARYN J, PETRYSZYN J, OZANA S. PLC Based Fractional-Order PID Temperature Control in Pipeline: Design Procedure and Experimental Evaluation[J]. Meccanica, 2021, 56(4): 855-871.

责任编辑: 曾钰婵