온도궤적 추종제어에 관한 실험적 연구
Experimental Study on Temperature Profile Following Control

°윤 석 영*, 송 태 승**, 유 준***

* 충남대학교 전자공학과(Tel : 042-823-3533; Fax : 042-823-5436 ; E-mail: gliguri@cnu.ac.kr)
** 산업기술시험원(Tel : 02-860-1463; Fax : 02-860-1468 ; E-mail: tssong@ktl.re.kr)
*** 충남대학교 전자공학과(Tel : 042-821-5669; Fax : 042-823-5436 ; E-mail: jlyou@cuvic.cnu.ac.kr)

Abstract : This paper present experimental results on temperature trajectory tracking. The benefits of precalculated feedforward input together with PID feedback control are demonstrated by experimental results. To find the feedforward input, the plant (autoregressive) model is first identified and convex optimization procedure is applied. PID controller is then implemented based on Ziegler-Nichols tuning rule to reduce effects of disturbances and modeling errors. Experimental results show an improvement in slope tracking performance over the fully PID controller.

Keywords : Temperature Control, Convex Optimization, Model Identification, PID Control

1. 서론

우리 주위에는 다양한 분야에서 열의 문제를 다루고 있다. 하지만 어떤 임의의 시스템에서 온도의 기울기라던가 그 곳에서 원하는 온도 분포를 갖게 하기란 아주 힘들다. 특히 반도체 장비의 경우 웨이퍼상의 온도가 기준 온도궤적을 정확히 따르도록 하는 것과 전 영역에서 균일한 온도를 유지하도록 온도제어를 수행하는 것이 중요한데 그렇지 못할 경우 웨이퍼의 변형과 불필요한 열 손실이 발생한다. 이러한 손실을 줄이기 위해서는 온도를 제어 할 수 있는 능력이 뛰어난 장비가 여러 측면에서 유리한 것이다.

본 연구에서는 원하는 온도 상승률(ramp up rate)과 구동기의 제약 요건들을 고려하기 위해 볼록(convex) 최적화 기법을 이용하여 앞먹임 입력을 계산하였다[1]. 앞먹임 제어기는 제어 대상 시스템에 대한 동적 특성 및 외란의 크기 등에 대한 비교적 정확한 정보가 있을 때 가해줄 입력을 미리 계산하여 보상하여 주는 방법으로써 그 구조가 폐루프 형태가 아닌 개루프 형태로 적용되므로 모델링 오차에 대한 강인성은 없지만 정확한 정보만 주어진다면 출력 성능에 많은 향상을 가져올 수 있다. 또한 실제 장비로부터의 실험데이터에 식별기법을 적용하여 온도구간별로 열 전달 모델을 추정하고, 기준 온도궤적을 정확히 따르도록 PID 제어기법을 추가한 온도제어기를 설계하였다. 시뮬레이션을 통하여 설계된 제어기의 특성을 보이고, 실제 장비에 적용실험을 통해 온도궤적 추종 성능을 검증한다.

2. 전체 시스템 구성

전체 시스템 구성은 온도 측정이 가능한 열처리 장비, 램프전력 공급기, 제어기로 구성되어있다. 열처리 장비의 열원으로는 급속가열이 가능한 직선형태의 텅스텐-할로겐 램프를 사용한다.

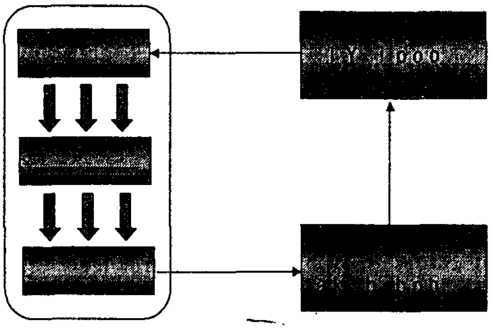

그림 1. 전체 시스템 구성
Fig. 1. Overall system configuration

하나의 램프전력공급기에 2개의 램프를 병렬로 연결하여 제어할 수 있도록 하였다. 지지대위에는 웨이퍼를 올려놓고 열원의 순간적인 발광에 의해 열을 흡수하여 가열되고, 전력차단에 의해 냉각되게 만들어 실제 반도체 장비와 유사하게 구성하였다. 웨이퍼상의 온도측정은 웨이퍼에 부착한 열전대(Thermocouple)센서를 통해 들어온 전류 신호를 증폭시켜 온도로 변환한다. 열전대 센서로부터 측정된 웨이퍼상의 온도는 입력범위 0V~10V에 해당하는 이산치 형태로 디지털 컴퓨터로 입력되며 이는 0℃~1300℃의 선형적인 온도 분포를 갖는다. 온도제어기는 온도센서로부터의 측정치와 각 공정마다 정해진 온도 프로파일(profile)과의 차와 off-line으로 구해진 앞먹임 입력값을 이용하여 제어 알고리즘을 수행하고, 램프에 내보낼 전력량을 계산한다.