(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2010-0115865
(43) 공개일자 2010년10월29일

(51) Int. Cl.
H01L 21/324 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2009-0034476
(22) 출원일자 2009년04월21일
심사청구일자 2009년04월21일

(71) 출원인
서강대학교산학협력단
서울 마포구 신수동 1-1 서강대학교
(72) 발명자
이광순
서울특별시 용산구 효창동 2-14 효창쉐르빌 201
원왕연
경기도 수원시 영통구 망포동 엘지빌리지3차 307동 404호
(74) 대리인
김일환

전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 과잉 입력 자유도를 갖는 회분공정의 델타형 모델기반 제어시스템 및 제어방법

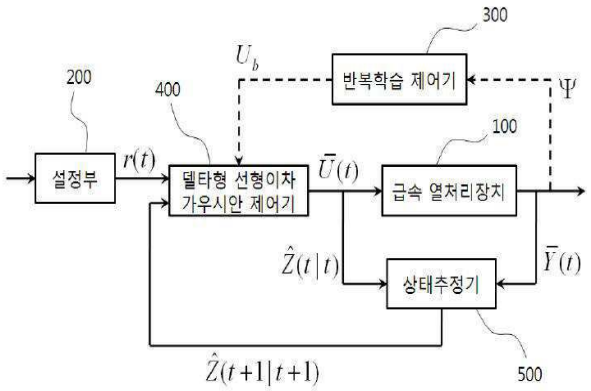
(57) 요 약

본 발명은 과잉 입력 자유도를 갖는 회분공정의 델타형 모델기반 제어시스템 및 제어방법에 관한 것으로, 조작변수의 수가 종속변수의 수보다 많으며, 짧은 샘플링 시간을 갖는 회분공정의 제어 시스템에 있어서, 저주파 필터를 통해 상기 종속변수의 설정궤도를 부드러운 설정궤도로 변환하는 설정부; 상기 회분공정의 주기에 따라 종속변수 값을 통하여 인가 조작변수의 바이어스 값을 계산하는 반복학습 제어기; 상기 조작변수의 변화량이 최소가 되도록 하며, 상기 계산된 조작변수 바이어스 값에 현재 조작변수가 수렴하도록 조작변수를 계산하는 델타형 선형이차 가우시안 제어기; 및 실시간 측정 종속변수를 이용하여 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 상태를 보정하는 상태추정기를 포함한다.

이와 같은 본 발명을 제공하면, 과잉 입력 자유도를 갖는 급속 공정장치를 운전하는데 있어서 실시간으로 처리제어를 수행함과 동시에 회분마다 측정되는 공정 정보를 이용하여 공정 처리의 균일성을 향상시킬 수 있다.

또한 낮은 비트수의 연산처리 장치에서 빠른 샘플링 속도로 제어동작을 계산할 때에도 수치적으로 안정하게 계산을 수행할 수 있다.

대 표 도 - 도5



특허청구의 범위

청구항 1

조작변수의 수가 종속변수의 수보다 많으며, 짧은 샘플링 시간을 갖는 회분공정의 제어 시스템에 있어서,

저주파 필터를 통해 상기 종속변수의 설정궤도를 부드러운 설정궤도로 변환하는 설정부;

상기 회분공정의 주기에 따라 종속변수 값을 통하여 인가 조작변수의 바이어스 값을 계산하는 반복학습 제어기;

상기 조작변수의 변화량이 최소가 되도록 하며, 상기 계산된 조작변수 바이어스 값에 현재 조작변수가 수렴하도록 조작변수를 계산하는 델타형 선형이차 가우시안 제어기; 및

실시간 측정 종속변수를 이용하여 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 상태를 보정하는 상태추정기를 포함하는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정제어 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 샘플링 시간(h)은,

$$\gamma \triangleq \frac{\tau}{h} \geq 100$$

(여기서, τ 는 공정의 시정수, h 는 공정의 샘플링 시간, γ 는 공정의 시정수와 공정의 샘플링 시간의 비율이다.)

인 조건을 충족하는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정제어 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 회분공정은 상기 조작변수가 열원에 인가되는 전력값이고, 상기 종속변수는 처리대상물의 온도를 나타내는 열처리 공정인 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정제어 시스템.

청구항 4

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 설정부는 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기가 과도응답이 없는 설정궤도로 변환하는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정제어 시스템.

청구항 5

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 상태 추정기는 칼만 필터(Kalman filter; KF)를 포함하는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정제어 시스템.

청구항 6

조작변수의 수가 종속변수의 수보다 많으며, 짧은 샘플링 시간을 갖는 회분공정의 제어방법에 있어서,

(a) 운전자에 의해 입력된 설정궤도를 델타형 선형이차 가우시안 제어기가 과도응답 없이 추적할 수 있도록 저주파 필터를 통해 변환하는 단계;

(b) 반복학습 제어기가 조작변수의 편차를 계산하는 단계;

(c) 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기가 앞먹임(feedforward) 신호를 계산하는 단계;

(d) 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기가 설정궤도를 추적하기 위한 상기 조작변수를 계산하는 단계; 및

(e) 상태추정기가 측정된 출력값을 이용하여 상기 델타형 가우시안 제어기의 상태를 추정하여 공정을 제어하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정 제어방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 샘플링 시간(h)은,

$$\gamma \triangleq \frac{\tau}{h} \geq 100$$

(여기서, τ 는 공정의 시정수, h 는 공정의 샘플링 시간, γ 는 공정의 시정수와 공정의 샘플링 시간의 비율이다.)

인 조건을 충족하는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정 제어방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 공정은 반도체 소자의 열처리 공정인 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정 제어방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

회분마다 상기 반도체 소자를 가열시 온도 측정장치가 설치되지 않은 어느 하나의 지점에서 상기 반도체 소자의 상부에 산소층의 두께를 측정하여 상기 지점에서의 온도를 계산하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정 제어방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 목적함수를

$$\min_{\delta\bar{U}(\cdot)} \frac{1}{2}\left[\left\| r(N) - \Sigma Z(N) \right\|_M^2 + \sum_{t=0}^{N-1} \left\{ \left\| r(t) - \Sigma Z(t) \right\|_{Q(t)}^2 + \left\| \delta\bar{U}(t) \right\|_{R(t)}^2 \right\} \right]$$

$$where \quad \left\| r(N) - \Sigma Z(N) \right\|_M^2 \triangleq \left(r(N) - \Sigma Z(N) \right)^T M \left(r(N) - \Sigma Z(N) \right)$$

$$\left\| r(t) - \Sigma Z(t) \right\|_{Q(t)}^2 \triangleq \left(r(t) - \Sigma Z(t) \right)^T Q(t) \left(r(t) - \Sigma Z(t) \right)$$

$$\left\| \delta\bar{U}(t) \right\|_{R(t)}^2 \triangleq \left(\delta\bar{U}(t) \right)^T R(t) \left(\delta\bar{U}(t) \right)$$

$$r(t) \triangleq \left[\bar{r}(t)^T \quad U_b^T \right]^T, \; M \triangleq \mathrm{diag}\left[\bar{M}, \bar{S}(N) \right], \; Q(t) \triangleq diag\left[\bar{Q}(t), \bar{S}(t) \right]$$

(여기서, M 은 한 회분의 마지막 시점에서의 제어오차에 대한 가중치 행렬이고, Q 는 한 회분의 마지막 시점을 제외한 나머지 시점에서의 제어오차에 대한 가중치 행렬이며, R 은 상기 열원인 램프 전력의 변화량에 대한 가중치 행렬이다.)

로 정의된 표준형 선형이차 가우시안 목적함수로 변환되는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정 제어방법.

청구항 11

제6항 내지 제10항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 (e) 단계에서 상기 상태 추정기는 칼만 필터를 이용하여 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 상태를 보정하는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정 제어방법.

명 세 서

발명의 상세한 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 과잉 입력 자유도를 갖는 회분공정의 델타형 모델기반 제어시스템 및 제어방법에 관한 것으로서, 특히 급속 열처리장치(Rapid thermal processing; RTP)의 델타형 모델기반 제어시스템 및 제어방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 급속 열처리장치는 실리콘 웨이퍼(wafer)를 빠른 시간 내에 원하는 온도까지 상승시킨 후, 풀림(annealing), 산화막 형성(oxidation), 질화막 형성(nitridation) 등의 가공을 짧은 시간 내에 수행하기 위한 반도체 가공장치로 실리콘 웨이퍼 생산 및 반도체 공정에서 많이 사용되고 있다. 기존의 노(furnace)에서 이러한 웨이퍼 가공공정을 수행하는 경우, 고온상태에서 웨이퍼가 장시간 노출됨에 따라 도판트(dopant)들의 과도촉진확산(transient enhanced diffusion)이 심각하게 나타나는 문제가 발생하게 된다. 현재 반도체 산업에서 반도체 선폭이 빠르고 지속적으로 줄어듦에 따라 과도촉진확산의 허용 한계도 매우 낮아졌으며, 이로 인해 급속 열처리장치가 기존의 노공정의 대부분을 대체하고 있는 실정이다.

[0003] 급속 열처리장치의 운전에서 가장 중요한 것은 웨이퍼 표면의 온도를 균일하게 유지시키는 것이다. 일반적으로 급속 열처리장치는 사전에 정해진 온도 궤적을 따라 운전되는데, 웨이퍼 표면의 온도 균일도가 낮은 경우 웨이퍼의 휨 현상이 나타나게 된다. 이러한 웨이퍼의 휨 현상은 높은 온도 균일도를 위해 웨이퍼를 회전시키는

급속 열처리장치에서 위험한 상황을 초래할 수 있을 뿐만 아니라, 석판인쇄(lithography)공정에서 형태오차를 유발하는 중요한 원인이 되기도 한다.

[0004] 기존의 급속 열처리장치는 이러한 웨이퍼 표면의 온도를 균일하게 유지하게 위해 주로 다중 PID 제어루프를 구성함으로써 웨이퍼의 온도를 제어하였다. 기존의 8인치 웨이퍼에서는 웨이퍼의 면적이 넓지 않고, 비교적 선폭이 크기 때문에 허용되는 온도분포 편차가 여유가 있었으므로, 이러한 요구사항을 다중 PID제어만으로 만족시킬 수 있었다.

[0005] 하지만 근래에 사용되기 시작한 12인치 웨이퍼에서는 넓어진 면적에 더하여 선폭도 미세해짐에 따라 허용 온도분포 편차가 작아졌으며, 이로 인해 PID제어만으로 높은 온도균일도를 얻기 힘들게 되었다. 그 이유는 기존의 PID제어는 일정한 설정 값을 잔류오차 없이 추종할 수 있지만, 되먹임(feedback)제어의 특성상 시변(time-varying) 설정 값에 대해서는 오차를 보이기 때문이다. 즉, 급속 열처리장치와 같이 정해진 온도의 설정궤도를 따라 제어해야 하는 경우, 되먹임 제어인 PID제어는 정밀한 제어기 조율에도 불구하고 제어오차를 보이게 된다. 이러한 PID제어의 한계는 고속 풀림 공정과 같이 빠른 온도상승을 요구하는 공정의 경우, 더욱 큰 단점으로 작용한다.

[0006] 또한, 기존의 PID 제어는 단일 입출력(SISO; Single input single output)공정을 대상으로 제어하는 기법으로서, 급속 열처리장치와 같은 다중 입출력(MIMO; Multi input multi output)공정에 적용하고자 하는 경우 여러 개의 공정입력과 공정출력을 상관관계의 강약에 따라 짝지음으로써 다중 PID제어루프를 구성해야 한다. 이러한 다중 PID제어루프의 구성은 숙련된 운전자의 많은 노력과 시간을 필요로 하는 매우 힘든 작업이다.

[0007] 한편, 이러한 되먹임 제어인 PID 제어의 한계를 극복하기 위해, 국내외 몇몇 연구진들이 모델기반의 고급제어기법들을 급속 열처리장치의 웨이퍼 온도제어에 적용하는 연구를 수행하였다. 하지만, 이러한 모델기반의 제어기법들은 전진이동연산자(forward shift operator)를 이용한 이산시간 모델기반의 제어기법으로서, 샘플링 시간(sampling time)이 짧아질 경우 수치적으로 불안정해지는 특성을 지닌다.

[0008] 그 이유는 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델은 고유값(eigenvalue)이 모두 복소평면의 단위원(unit circle)안에 위치해야 안정한 모델이 되는데, 샘플링 시간이 짧은 경우 고유값들이 단위원 근처에 위치하게 되고, 데이터에 측정잡음(measurement noise)이 포함될 경우 쉽게 단위원을 벗어나 불안정한 모델이 되기 때문이다.

[0009] 또한, 기존의 급속 열처리장치에 설치된 연산제어장치와 같이 낮은 비트(bit)수로 유효숫자를 표현하는 경우, 계산과정에서 고유값의 복소평면상의 위치를 표현하는 유효숫자의 일부가 절단되어 그 위치가 조금 변경될 수 있는데, 샘플링 시간이 짧아서 고유값이 단위원 근처에 위치하였다면 이러한 유효숫자 절단에 의해 쉽게 단위원을 벗어나 불안정한 모델이 되기 때문이다.

[0010] 한편, 조작변수(manipulated variable)의 수가 종속변수(controlled variable)의 수보다 큰 다중 입출력 공정의 경우, 종속변수가 설정 값에 제어오차 없이 머무르도록 하는 조작변수의 해가 여러 개 존재하게 된다. 하지만, 이는 종속변수가 측정되는 지점에서의 제어오차가 0인 것을 의미할 뿐, 종속변수가 측정되지 않는 다른 지점들에서의 제어오차 또한 0이 된다는 것을 의미하지 않는다. 즉, 웨이퍼 온도가 측정되는 지점에서의 제어오차는 0이지만, 웨이퍼 온도가 측정되지 않는 지점에서의 제어오차 또한 0이라는 것을 의미하지는 않는다.

[0011] 따라서 웨이퍼 전체에 걸친 온도균일도를 향상시키기 위해, 온도가 측정되는 지점에서의 제어오차를 0으로 만드는 여러 조작변수의 해 중에서, 웨이퍼 온도가 측정되지 않는 지점에서의 제어오차 또한 최소로 만들어주는 조작변수의 해를 선택해야 한다. 하지만 종래의 PID제어나 모델기반의 제어기법들은, 이처럼 조작변수의 수가 종속변수의 수보다 많은 경우 잉여 조작변수의 자유도(degree of freedom)를 이용하여 종속변수가 측정되지 않는 지점에서도 제어성능을 향상시킬 수 있음에도 불구하고, 이러한 입력 자유도를 고려하지 않고 제어하도록 설계되어 있다.

[0012] 따라서 현대의 급속 열처리장치에서는 기존의 PID제어기술을 그대로 적용하기 힘들며, 반복 패턴을 보이는 시변 설정 값에 대해 제어 오차가 없는 모델기반의 제어기술이 요구되는 실정이다. 또한, 낮은 비트수의 연산제어장치에서 빠른 샘플링 속도로 제어동작을 계산하는 경우에도 수치적으로 안정하게 계산을 수행하며, 과잉 입력 자유도를 이용하여 웨이퍼 표면의 온도균일도를 효과적으로 향상시키는 제어시스템이 개발될 필요가 있다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

[0013] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 이와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 급속 열처리 장치를 운전하는데 있어서 낮은 연산비트수의 연산제어장치에서도 짧은 샘플링 시간을 주기로 수치적으로 안정하게 제어동작을 계산하며, 과잉 입력 자유도를 이용하여 웨이퍼의 온도 균일도를 향상시키기 위한 델타형 모델 기반 제어시스템 및 제어방법을 제공하기 위한 것이다.

과제 해결수단

[0014] 상술한 문제를 해결하기 위한 본 발명의 제1 특징은 조작변수의 수가 종속변수의 수보다 많으며, 짧은 샘플링 시간을 갖는 회분공정의 제어 시스템에 있어서, 저주파 필터를 통해 상기 종속변수의 설정궤도를 부드러운 설정궤도로 변환하는 설정부; 상기 회분공정의 주기에 따라 종속변수 값을 통하여 인가 조작변수의 바이어스 값을 계산하는 반복학습 제어기; 상기 조작변수의 변화량이 최소가 되도록 하며, 상기 계산된 조작변수 바이어스 값에 현재 조작변수가 수렴하도록 조작변수를 계산하는 델타형 선형이차 가우시안 제어기; 및 실시간 측정 종속변수를 이용하여 상기 델타형 선형이차 가우시안(Linear Quadratic Gaussian; LQG) 제어기의 상태를 보정하는 상태추정기를 포함한다.

[0015] 여기서, 상기 샘플링 시간(h)은,

$$\gamma \triangleq \frac{\tau}{h} \geq 100$$

[0016]

[0017] (여기서, τ 는 공정의 시정수, h 는 공정의 샘플링 시간, γ 는 공정의 시정수와 공정의 샘플링 시간의 비율이다.) 인 조건을 충족하는 것을 특징으로 하는 델타형 모델기반 공정제어 시스템.

[0018] 또한, 상기 회분공정은 상기 조작변수가 열원에 인가되는 전력값이고, 상기 종속변수는 처리대상물의 온도를 나타내는 열처리 공정인 것이 바람직하고, 상기 설정부는 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기가 과도응답이 없는 설정궤도로 변환하는 것이 바람직하며, 상기 상태 추정기는 칼만 필터(Kalman filter; KF)를 포함하는 것이 바람직하다.

[0019] 그리고, 본 발명의 제2 특징은 조작변수의 수가 종속변수의 수보다 많으며, 짧은 샘플링 시간을 갖는 회분공정의 제어방법에 있어서, (a) 운전자에 의해 입력된 설정궤도를 델타형 선형이차 가우시안 제어기가 과도응답 없이 추적할 수 있도록 저주파 필터를 통해 변환하는 단계; (b) 반복학습 제어기가 조작변수의 편차를 계산하는 단계; (c) 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기가 앞먹임(feedforward) 신호를 계산하는 단계; (d) 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기가 설정궤도를 추적하기 위한 조박변수를 계산하는 단계; 및 (e) 상태추정기가 측정된 출력값을 이용하여 상기 델타형 가우시안 제어기의 상태를 추정하여 공정을 제어하는 단계를 포함한다.

[0020] 여기서, 바람직하게는 상기 샘플링 시간(h)은,

$$\gamma \triangleq \frac{\tau}{h} \geq 100$$

[0021]

[0022] (여기서, τ 는 공정의 시정수, h 는 공정의 샘플링 시간, γ 는 공정의 시정수와 공정의 샘플링 시간의 비율이다.) 인 조건을 충족하는 것일 수 있다.

[0023] 또한, 상기 공정은 반도체 소자의 열처리 공정인 것이 바람직하고, 회분마다 상기 반도체 소자를 가열시 온도측정장치가 설치되지 않은 어느 하나의 지점에서 상기 반도체 소자의 상부에 산소층의 두께를 측정하여 상기 지점에서의 온도를 계산하는 단계를 더 포함하는 것이 바람직하다.

[0024] 더하여, 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 목적함수를

$$\min_{\delta\bar{U}(\cdot)} \frac{1}{2}\left[\left\| r(N) - \Sigma Z(N) \right\|_M^2 + \sum_{t=0}^{N-1} \left\{ \left\| r(t) - \Sigma Z(t) \right\|_{Q(t)}^2 + \left\| \delta\bar{U}(t) \right\|_{R(t)}^2 \right\} \right]$$

$$where \quad \left\| r(N) - \Sigma Z(N) \right\|_M^2 \triangleq \left(r(N) - \Sigma Z(N) \right)^T M \left(r(N) - \Sigma Z(N) \right)$$

$$\left\| r(t) - \Sigma Z(t) \right\|_{Q(t)}^2 \triangleq \left(r(t) - \Sigma Z(t) \right)^T Q(t) \left(r(t) - \Sigma Z(t) \right)$$

$$\left\| \delta\bar{U}(t) \right\|_{R(t)}^2 \triangleq \left(\delta\bar{U}(t) \right)^T R(t) \left(\delta\bar{U}(t) \right)$$

$$r(t) \triangleq \left[\bar{r}(t)^T \quad U_b^T \right]^T, \; M \triangleq \mathrm{diag}\left[\bar{M}, \bar{S}(N) \right], \; Q(t) \triangleq diag\left[\bar{Q}(t), \bar{S}(t) \right]$$

[0025]

[0026] (여기서, M 은 한 회분의 마지막 시점에서의 제어오차에 대한 가중치 행렬이고, Q 는 한 회분의 마지막 시점을 제외한 나머지 시점에서의 제어오차에 대한 가중치 행렬이며, R 은 상기 열원인 램프 전력의 변화량에 대한 가중치 행렬이다.)로 정의된 표준형 선형이차 가우시안 목적함수로 변환되는 것이 바람직하고, 상기 (e) 단계에서 상기 상태 추정기는 칼만 필터를 이용하여 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 상태를 보정하는 것이 바람직하다.

효 과

[0027] 이와 같은 본 발명을 제공하면, 급속 공정처리장치를 운전하는데 있어서 짧은 샘플링 시간을 주기로 낮은 비트수의 연산제어장치를 이용하여 제어동작을 계산할 때에도 수치적으로 안정하게 계산을 수행하며, 과잉 입력 자유도를 갖는 급속 공정장치를 운전하는데 있어서 실시간으로 처리제어를 수행함과 동시에 회분마다 측정되는 공정 정보를 이용하여 공정 처리의 균일성을 향상시킬 수 있다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

[0028] 이하에서 도면을 참조하여 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다.

[0029] 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다. 그리고 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였다. 또한 어떤 부분이 어떤 구성요소를 “포함”한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다. 또한, 도면들에 도시된 요소(element)들은 장치, 하드웨어, 소프트웨어 또는 이들의 조합으로 된 여러 형태로 실시될 수 있다.

[0030] 도 1은 본 발명이 적용되는 일례로서, 웨이퍼 가공을 위한 급속 열처리 장치의 사진이다. 도 1에 나타낸 바와 같이, 급속 열처리장치는 최대 150 rpm으로 회전하는 12인치 웨이퍼의 가공을 위한 두 개의 동일한 챔버(chamber)를 가지고 있다. 챔버 벽면의 안쪽 표면은 최대 반사율을 위해 도금되어 있으며, 챔버 벽면의 온도는 벽면 안쪽을 순환하는 냉각수에 의해 조절된다. 한편, 본 발명의 실시예에 따른 급속 열처리장치에는 최대 0.7kw의 전구 형태의 텅스텐-할로겐 램프 220개가 10개의 동심원 모양으로 설치되어 있으며, 웨이퍼 가열을 위해 사용된다.

[0031] 10개의 램프 그룹에 입력되는 전력은 독립적으로 조절 가능하며 조작변수의 역할을 한다. 또한, 웨이퍼 표면의 온도는 6개의 고온계(pyrometer)를 통해 측정되며 종속변수의 역할을 한다. 이와 같이 본 발명의 실시예에 따른 급속 열처리장치는 조작변수의 수가 종속변수의 수보다 크며, 4개의 과잉 입력 자유도를 갖는 공정이 된다. 이러한 과잉 입력 자유도를 활용할 경우, 웨이퍼 전체 표면에 걸쳐 온도균일도를 향상시킬 수 있는 여지가 있으므로, 이를 활용하는 것이 바람직하다.

[0032] 한편, 급속 열처리장치는 회분을 주기로 웨이퍼 위에 쌓여진 산소층의 두께를 측정하게 된다. 웨이퍼의 온도가 높을수록 산소가 많이 쌓여 지므로, 산소층의 두께는 급속 열처리장치의 운전시 웨이퍼 표면의 온도가 적절하게 제어되었는지를 판별하는 척도가 된다.

[0033] 본 발명의 실시예에 따른 급속 열처리장치는 웨이퍼의 반경 방향으로 총 25개 지점에서 산소층의 두께를 측정한다. 웨이퍼의 반경 방향으로 고온계보다 더 많은 지점에서 산소층의 두께가 측정되므로, 이러한 측정된 산소층의 두께를 이용하면, 급속 열처리장치의 운전시 고온계가 설치되지 않은 지점에서의 온도를 예측할 수 있다. 따라서 회분마다 측정되는 산소층 두께 정보를 활용하여 급속 열처리장치 운전시 고온계가 설치되지 않은 지점에서의 온도오차 또한 최소화하는 제어루프를 구성하는 것이 바람직하다.

[0034] 도 2는 본 발명의 시스템에 적용되는 급속 열처리장치에 장착된 DSP보드의 사양을 도시한 표이다.

[0035] 도 2에 도시된 바와 같이, 급속 열처리장치에 장착된 DSP 보드는 32bit 연산제어장치로서, 지수(exponent)를 8bit로 표현하며 가수(mantissa; 假數)를 24bit로 표현한다. 현대의 컴퓨터가 64bit 연산제어장치로서, 지수를 16bit로 표현하며 가수를 48bit로 표현하는 것과 비교하면, 표현 가능한 유효숫자의 자리수가 상당히 작음을 알 수 있다. 이러한 연산제어장치의 유효숫자 표현의 한계는 제어동작 계산시 수치적인 오차를 유발하는 원인이 되며, 이는 결국 제어성능의 저하로 이어진다. 따라서 이러한 낮은 비트수의 연산제어장치에서도 수치적으로 안정하게 계산을 수행할 수 있도록 하는 것이 필요하다.

[0036] 일반적으로 급속 열처리장치 내 웨이퍼는 정해진 온도의 설정궤도을 따라 가공되는데, 보통 상온에서 400℃까지 열린-루프 상태로 운전되며, 400℃에서 985℃까지 75℃/초의 속도로 온도를 상승시킨 후, 985℃에서 약 30초간 운전하고 온도를 하강시키게 된다. 이때, 985℃의 정상상태로 운전하는 휴지(休止, dwell) 구간뿐만 아니라, 75℃/초의 빠른 온도 상승구간에서 온도를 정밀하게 제어하기 위해 짧은 샘플링 시간을 주기로 제어동작을 수행하는 것이 바람직하다.

[0037] 따라서, 본 발명에서는 과잉 입력 자유도 및 짧은 샘플링 시간에 적합한 회분공정의 델타형 모델 기반 시스템 및 제어방법을 착안하였다. 이하 본 발명의 실시예에 적용되는 델타연산자(delta operator)의 특징, 짧은 샘플링 시간 및 과잉 입력 자유도를 설명하고, 본 발명의 시스템 및 그 제어방법을 상세히 설명하기로 한다.

[0038] 도 3은 미분연산자(differential operator)를 이용한 연속시간 모델, 전진이동연산자를 이용한 이산시간 모델 및 델타연산자를 이용한 이산시간 모델이 안정하기 위한 고유값의 위치를 복소평면에 도시한 그래프이다.

[0039] 도 3의 (a)에 도시된 바와 같이, 미분연산자로 표현되는 연속시간 모델이 안정할 때, 그 모델의 고유값은 복소평면의 허수축 왼쪽에 위치하게 된다. 실제 공정은 모두 연속시간에 속한다.

[0040] 도 3의 (b)에 도시된 바와 같이, 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델이 안정하기 위해서는 그 모델의 고유값이 복소평면에서 중심이 원점이고 반지름이 1인 단위원 안에 위치해야 한다. 만약 고유값 중 한 개라도 단위원을 벗어나게 되면 그 모델은 불안정한 모델이 된다.

[0041] 도 3의 (a)와 (b)를 비교하면 알 수 있듯이, 연속시간에 속하는 실제 공정을 이산시간 모델로 근사하면, 복소평면에서 허수축 왼쪽의 고유값은 모두 단위원 안으로 사상(mapping; 寫像)된다. 이때, 이산시간 모델의 샘플링 시간이 짧을수록 고유값이 단위원의 경계부근으로 사상되는데, 이로 인해 측정 데이터에 잡음이 포함되어 있을 경우 고유값이 단위원을 쉽게 벗어나서 불안정해지는 특성을 지닌다.

[0042] 즉, 모델인식을 위한 실험데이터에 잡음이 포함되어 있는 경우 잡음의 영향으로 복소평면 상의 고유값의 위치가 조금 달라지게 되는데, 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델은 샘플링 시간이 짧을수록 고유값이 단위원 경계 부근에 위치하기 때문에 이러한 잡음에 의해 고유값의 위치가 조금 변경되었을 때, 고유값이 단위원을 벗어나서 불안정한 모델이 되기 쉽다.

[0043] 도 3의 (c)에 도시된 바와 같이, 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델이 안정하기 위한 고유값의 영역은 중심이 $(-1/h,0)$ 이고, 반지름이 $1/h$ 인 원이다. 여기서, h 는 샘플링 시간을 나타낸다. 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델이 안정하기 위한 고유값의 영역이 샘플링 시간인 h 가 작아질수록 복소평면의 허수축 왼쪽으로 넓어지는 것을 볼 수 있다.

[0044] 즉, 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델이 안정하기 위한 고유값의 영역은 샘플링 시간이 짧아질수록 도 3의 (a)에 도시된 연속시간 모델의 안정한 고유값의 영역과 비슷해진다. 이러한 특성은 샘플링 시간이 짧아질수록 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델이 연속시간 모델과 비슷해짐을 뜻한다. 실제로 샘플링 시간이 짧아질수록 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델의 계수(coefficient)는 연속시간 모델의 계수와 매우 비슷해진다.

[0045] 이러한 결과는 델타연산자가 미분연산자를 이산시간으로 근사한 연산자로서, 샘플링 시간이 무한대로 작아질 경

우 미분연산자에 근접한다는 사실에 기인한다. 이러한 특성으로 인해 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델은 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델과 달리 짧은 샘플링 시간에서도 수치적으로 쉽게 불안정해지지 않는다.

[0046] 다음은 본 발명의 실시예에 따른 델타연산자의 수치적 안정성을 도 4를 참조하여 설명한다.

[0047] 도 4는 미분연산자로 표현되는 연속시간 모델, 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델 및 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델의 32bit 제어연산장치에서의 계단응답을 도시한 그래프이다.

[0048] 도 4의 미분연산자로 표현되는 연속시간 모델의 계단응답은 다음 식으로 표현되는 시정수(time constant)가 5.91인 모델에 계단입력을 가하였을 때 나타나는 응답을 의미한다.

수학식 1

$$\frac{dX_C(t)}{dt} = A_C X_C(t) + B_C U(t)$$

$$Y(t) = C_C X_C(t)$$

$$A_C \triangleq \begin{bmatrix} -5.5 & -11.5 & -11.5 & -5.5 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_C \triangleq \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_C \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T$$

[0049]

[0050] 여기서, $U(t)$와 $Y(t)$는 각각 공정입력과 공정출력이며, $X_C(t)$는 연속시간 모델의 상태이다.

[0051] 도 4의 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델의 계단응답은 전진이동연산자를 이용하여 [수학식 1]의 연속시간 모델을 0.054의 샘플링 시간을 갖는 이산시간 모델로 변형하고, 이 모델에 계단입력을 가하였을 때 나타나는 응답을 의미한다. 이때 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델은 다음의 [수학식 2]와 같다.

수학식 2

$$X_q(t+1) = A_q X_q(t) + B_q U(t)$$

$$Y(t) = C_q X_q(t)$$

$$A_q \triangleq \begin{bmatrix} 4.7146 & -8.8893 & 8.3790 & -3.9483 & 0.7441 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_q \triangleq \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_q \triangleq 10^{-6} \begin{bmatrix} 0.0036 \\ 0.0881 \\ 0.2129 \\ 0.0798 \\ 0.0029 \end{bmatrix}^T$$

[0052]

[0053] 여기서, $U(t)$와 $Y(t)$는 각각 공정입력과 공정출력이며, $X_q(t)$는 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델의 상태이다.

[0054] 도 4의 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델의 계단응답은 델타연산자를 이용하여 [수학식 1]의 연속시간 모델을 0.054의 샘플링 시간을 갖는 이산시간 모델로 변형하고, 이 모델에 계단입력을 가하였을 때 나타나는 응답을

의미한다. 이때 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델은 다음의 [수학식 3]과 같다.

수학식 3

$$X_\delta(t+1) = X_\delta(t) + h\left(A_\delta X_\delta(t) + B_\delta U(t)\right)$$
$$Y(t) = C_\delta X_\delta(t)$$

$$A_\delta \triangleq \begin{bmatrix} -5.3104 & -10.7587 & -10.4505 & -4.8656 & -0.8633 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_\delta \triangleq \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_\delta \triangleq \begin{bmatrix} 6.6217*10^{-8} \\ 3.5423*10^{-5} \\ 0.0032 \\ 0.0940 \\ 0.8633 \end{bmatrix}^T$$

[0055]

[0056] 여기서, $U(t)$ 와 $Y(t)$ 는 각각 공정입력과 공정출력이며, $X_\delta(t)$ 는 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델의 상태이다.

[0057] 상기 [수학식 1], [수학식 2] 및 [수학식 3]에서, 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델과 달리 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델의 계수는 미분연산자로 표현되는 연속시간 모델의 계수와 상당히 유사함을 볼 수 있다. 이는 앞에서 설명한 델타연산자의 특징과 부합하는 것으로서, 이로 인해 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델은 짧은 샘플링 시간에서도 수치적으로 안정하게 된다.

[0058] 한편, 도 4의 계단응답은 32bit 제어연산장치에서 계산하였을 때 나타난 결과이다. 만약 더 낮은 비트수의 제어연산장치를 사용하여 계산을 수행할 경우, 표현 가능한 유효숫자의 자리수가 작아지기 때문에 이로 인한 수치적인 오차는 더욱 커지게 되며, 결국 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델은 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델에 비해 수치적으로 더욱 불안정해지게 된다. 즉, 제어연산장치의 비트수가 낮을수록 델타연산자의 수치적 장점은 더욱 큰 힘을 발휘하게 된다.

[0059] 다음은 본 발명의 실시예에 따른 “짧은 샘플링 시간을 갖는 공정”의 정의에 대해 설명한다.

[0060] 공정의 시정수는 공정의 응답이 얼마나 빠른가를 나타내는 지표이며, 계단응답 최종치의 63.2%에 이르는 시간으로부터 추정할 수 있다. 본 발명의 실시예에서 “짧은 샘플링 시간을 갖는 공정”이란 공정의 시정수와 샘플링 시간의 비율이 100보다 큰 공정을 의미한다. 이를 수학식으로 표현하면 다음과 같다.

수학식 4

$$\gamma \triangleq \frac{\tau}{h} \geq 100$$

[0061]

[0062] 여기서, τ 는 공정의 시정수, h 는 샘플링 시간을 나타내며, γ 는 상기 [수학식 4]와 같이 공정의 시정수와 샘플링 시간의 비율로 정의된다. 본 발명의 실시예에 따른 “짧은 샘플링 시간을 갖는 공정”이란 상기 [수학식 4]를 만족시키는 공정을 일컫는다. 이러한 짧은 샘플링 시간을 갖는 공정은 전진이동연산자를 이용한 이산시간 모델로 표현할 경우 수치적으로 쉽게 불안정해지는 특성을 지닌다.

[0063] 본 발명의 실시예에서는 상기 [수학식 4]를 만족시키는 공정을 제어하기 위해 델타연산자를 도입함으로써, 전진이동연산자에서 발생 가능한 수치적 불안정성의 문제를 해결하는 델타형 모델기반 제어시스템을

개발하였다.

[0064] 그리고, 본 발명의 실시예에 따른 “과잉 입력 자유도를 갖는 공정”의 정의에 대해 설명한다.

[0065] 입력 자유도는 공정입력의 수에서 공정출력의 수를 뺀 것으로 정의되며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

수학식 5

$$D_u \triangleq N_u - N_y$$

[0066]

[0067] 여기서, D_u 는 입력 자유도를 나타내며, N_u 와 N_y 는 각각 공정입력과 공정출력의 수이다. 따라서 공정입력의 수가 공정출력의 수와 같은 경우 입력 자유도는 0이다. 본 발명의 실시예에 따른 "과잉 입력 자유도를 갖는 공정"은 상기 [수학식 5]에서 입력 자유도 D_u 가 1 이상인 공정을 일컫는다.

[0068] 일반적으로 좋은 제어성능을 얻기 위해서는 공정입력의 수가 공정출력의 수보다 많거나 같아야 한다. 그 이유는 공정입력의 수가 공정출력의 수보다 작은 경우, 출력 오차를 모두 0으로 만드는 공정입력의 해를 찾기 어렵기 때문이다. 반대로 공정입력의 수가 공정출력의 수보다 많은 경우, 출력오차를 모두 0으로 만드는 공정입력의 해가 여럿 존재하게 된다.

[0069] 따라서 이러한 여러 해 중에서 공정출력이 측정되지 않는 지점에서의 제어오차 또한 최소화하는 해를 선택하는 것은 바람직하다. 즉, 공정입력의 수가 공정출력의 수보다 많은 공정의 경우, 과잉 입력 자유도를 활용함으로써 공정출력이 측정되지 않는 지점에서의 제어오차 또한 최소화할 수 있으며, 제어시스템은 이러한 과잉 입력 자유도를 활용할 수 있도록 개발되어야 한다.

[0070] 본 발명의 실시예에 따른 델타형 모델기반 제어시스템은 급속 열처리장치를 운전하는데 있어서 과잉 입력 자유도를 활용하여 온도가 측정되는 지점과 함께 온도가 측정되지 않는 지점에서의 제어오차 또한 최소화함으로써 온도균일도를 향상시킨다.

[0071] 이상에서 설명한 급속 열처리장치와 델타연산자의 특성을 토대로, 본 발명에서는 과잉 입력 자유도를 갖는 회분공정의 델타형 모델기반 제어시스템을 착안하였다.

[0072] 여기서, 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기에는 모델인식실험을 통해 제작된 선형 시불변(time-invariant) 델타형 모델을 탑재한다. 이때, 제어변수로서 6개의 고온계를 통해 측정되는 웨이퍼의 온도를 설정하였고, 공정변수로서는 10개의 텅스텐-할로겐 램프 그룹에 입력되는 전력을 설정한다.

[0073] 앞에서 설명한 것과 같이, 급속 열처리장치는 조작변수의 수가 종속변수의 수가 많아 과잉 입력 자유도를 갖는다. 따라서, 본 발명의 실시예에서는 이러한 과잉 입력 자유도를 활용하여 웨이퍼 전체 표면의 온도균일도를 향상시키기 위해, 종래에 잘 알려진 표준 선형이차 가우시안 제어기의 목적함수(objective function)를 변형하고 반복학습 제어기를 선형이차 가우시안 제어기의 상위에 설치함으로써, 다단제어(cascade control)루프 구조를 갖는 모델기반 제어시스템을 제공한다.

[0074] 한편, 앞에서 설명한 것과 같이, 급속 열처리장치는 낮은 비트수의 연산제어장치를 통해 짧은 샘플링 시간을 갖는 제어동작의 계산을 수행하므로, 수치적으로 쉽게 불안정해지는 특성을 지닌다. 따라서, 본 발명의 실시예에서는 이러한 수치적 불안정성을 극복하며 제어오차를 최소화하는 최적의 제어동작을 계산하기 위해, 델타연산자를 도입하고 선형이차 가우시안 제어기를 델타형으로 설계함으로써, 수치적으로 안정한 델타형 모델기반 제어시스템을 제공한다.

[0075] 도 5은 본 발명의 실시예에 따른 과잉 입력 자유도를 갖는 회분공정의 델타형 모델기반 제어시스템의 구성을 나타내는 도면이다.

[0076] 도 5에 도시한 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 델타형 모델기반 제어시스템은 급속 열처리장치(100),

설정부(200), 반복학습 제어기(300), 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400) 및 상태추정기(500)를 포함한다.

[0077] 급속 열처리장치(100)는 10개의 텅스텐-할로겐 가열램프에 입력되는 전력을 조작변수로 하며 6개의 고온계를 통해 측정되는 웨이퍼 온도를 종속변수로 하여 이루어지는 실제 제어의 대상이 되는 공정을 말한다. 본 발명의 실시예에 따른 급속 열처리장치(100)는 20~40초의 시정수를 갖는 공정이다.

[0078] 설정부(200)는 웨이퍼 가공을 위해 운전자가 입력한 온도의 설정궤도를 제어기가 과도응답 없이 추적할 수 있도록 저주파 필터를 통해 부드러운 설정궤도로 변환하는 역할을 한다. 이때 본 발명의 실시예에 따른 저주파 필터는 이득(gain)이 1이고 시정수가 0.5인 1차 전달함수(transfer function)로 표현된다. 이러한 저주파 필터는 당업자라면 쉽게 알 수 있는 사항이므로 이하에서는 구체적인 설명은 생략한다.

[0079] 반복학습 제어기(300)는 회분을 주기로 측정되는 산소층 두께 정보를 이용하여 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)에 입력할 램프 전력의 바이어스 값을 계산하는 역할을 한다. 이를 위해 산소층 두께와 램프 전력의 바이어스(bias) 값 사이의 정상상태 관계식이 필요하며, 이는 다음의 수학식으로 표현된다.

수학식 6

$$\Psi = KU_b + \Psi_b$$

[0080]

[0081] 여기서, U_b 와 Ψ 는 각각 램프 전력의 바이어스 값과 산소층 두께를 나타내는 벡터(Vector)이며, K는 램프 전력의 바이어스 값과 산소층 두께 사이의 정상상태 관계식을 나타낸다. Ψ_b 는 회분과 무관하게 동작하는 랜덤(random) 신호들을 포함하는 산소층 두께의 바이어스 항(term)이다. 한편, [수학식 6]은 다음의 [수학식 7]과 같이 정리된다.

수학식 7

$$E_{k+1} = E_k - K\Delta U_{b,k+1} + n_{k+1}$$
$$where \quad E \triangleq \Upsilon - \Psi,\ \Delta U_{b,k+1} \triangleq U_{b,k+1} - U_{b,k},\ n_{k+1} \triangleq \Psi_{b,k+1} - \Psi_{b,k}$$

[0082]

[0083] 여기서, Υ 는 산소층 두께의 설정 값이며, E 는 산소층 두께의 제어오차를 나타낸다. $\Delta U_{b,k+}$는 $k+1$번째 회분의 램프 전력의 바이어스 값인 $\Delta U_{b,k+1}$ 와 k 번째 회분의 램프 전력의 바이어스 값인 $U_{b,k}$의 차이를 나타낸다. n_{k+1}는 상기 [수학식 7]의 마지막 수학식과 같이 정의되며, 평균이 0인 랜덤벡터를 나타낸다.

[0084] 한편, $\Delta U_{b,k+1}$ 는 다음의 [수학식 8]로 표현되는 반복학습 제어기(300)의 목적함수를 만족시키는 해를 계산함으로써 구할 수 있다.

수학식 8

$$\min_{\Delta U_{b,k+1}} J = \frac{1}{2}\left\{\left\|E_{k+1|k}\right\|_{\Lambda}^{2} + \left\|\Delta U_{b,k+1}\right\|_{\Omega}^{2}\right\}$$

$$\text{subject to } \ 0 \le U_{b,k+1} \le 100$$

$$\textit{where } \left\|E_{k+1|k}\right\|_{\Lambda}^{2} \triangleq E_{k+1|k}^{T}\Lambda E_{k+1|k} \ , \ \left\|\Delta U_{b,k+1}\right\|_{\Omega}^{2} \triangleq \Delta U_{b,k+1}^{T}\Omega\Delta U_{b,k+1}$$

[0085]

[0086] 여기서, $E_{k+1|k}$ 는 k 번째 회분까지의 정보에 기초하여 예측한 $k+1$ 번째 회분의 산소층 두께의 제어오차를 나타내며, Λ 와 Ω 는 각각 산소층 두께의 제어오차인 $E_{k+1|k}$ 와 램프 전력 바이어스 값의 변화량인 $\Delta U_{b,k+1}$ 에 대한 가중치 행렬을 나타낸다. Λ 와 Ω 를 조절함으로써 반복학습 제어기(300)의 성능을 조율할 수 있다.

[0087] [수학식 8]에서 반복학습 제어기(300)은 주어진 제약조건을 만족시키며, 산소층 두께의 제어오차가 최소가 되며, 램프 전력의 바이어스 값의 변화량이 최소가 되도록, 램프 전력의 바이어스 값의 변화량을 계산한다. 이때, 본 발명의 실시예에 따르면 [수학식 8]의 해인 램프 전력의 바이어스 값의 변화량을 계산하기 위해 이차 계획법(quadratic programming method)을 사용된다.

[0088] 한편, 반복학습 제어기(300)는 급속 열처리장치(100)의 회분이 종료될 때마다 측정되는 산소층 두께 정보를 이용하여 램프 전력의 바이어스 값을 계산하고, 이를 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)로 제공한다. 이처럼 반복학습 제어기(300)는 회분마다 측정되는 공정의 정보를 이용하여 회분을 주기로 계산을 수행하므로 비교적 긴 샘플링 시간을 갖는다.

[0089] 따라서 델타연산자를 이용한 이산시간 모델로 표현하지 않고도 수치적으로 안정하게 좋은 제어성능을 얻을 수 있다. 이에 상기 [수학식 7] 및 [수학식 8]과 같이, 본 발명의 실시예에 따른 반복학습 제어기(300)는 전진이동연산자를 이용한 이산시간 모델로 표현된다.

[0090] 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)는 표준 선형이차 가우시안 제어기(400)의 목적함수가 램프 전력이 램프 전력의 바이어스 값으로부터 벗어나는 편차에 대한 페널티(penalty)항을 포함하도록 하기 위해, 표준 선형이차 가우시안 제어기의 목적함수를 변형하여 설계되며, 또한 수치적으로 안정하게 제어동작의 계산을 수행하기 위해 델타연산자를 통해 델타형으로 표현된다.

[0091] 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)는 상태추정기(500)를 통해 상태를 추정함과 동시에 제어동작을 취한다. 이때, 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)는 현재 급속 열처리장치(100)의 웨이퍼 온도가 설정부(200)로부터 입력된 설정궤도를 추적하도록 하기 위해, 텅스텐-할로겐 램프 그룹에 공급되는 전력을 조절하게 된다.

[0092] 그리고 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)는 고온계를 통해 측정되는 웨이퍼의 온도오차가 최소가 되도록 하고, 램프 전력의 변화량이 최소가 되도록 하며, 최종적으로 램프 전력이 반복학습 제어기(300)에 의해 제공된 램프 전력의 바이어스 값에 수렴하도록 램프 전력의 변화량을 계산한다. 이러한 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)의 제어 알고리즘에 대해서는 뒤에서 자세히 설명하기로 한다.

[0093] 상태추정기(500)는 급속 열처리장치(100)를 통해 실시간으로 측정되는 웨이퍼의 온도 정보를 이용하여 상기 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)의 상태를 보정하는 역할을 수행한다. 이때, 본 발명의 실시예에 따른 상태추정기(500)는 칼만 필터를 이용하여 상태를 추정한다.

[0094] 도 6은 본 발명에 따른 델타형 모델기반 제어방법의 흐름도를 예시한 도면이다. 이하, 도 6을 참조하여 설명한다.

[0095] 운전자가 웨이퍼를 가공할 온도의 설정궤도를 입력하면, 설정부(200)가 저주파 필터를 통해 입력된 설정궤도를 부드러운 설정궤도로 변환하고,(S100) 반복학습 제어기(300)가 산소층의 두께 정보를 이용하여 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)에 제공할 램프 전력의 바이어스 값을 계산한다.(S110)

[0096] 한편, 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)는 설정부(200)로부터 입력된 설정궤도를 이용하여 1 회분 동안의 앞먹임 신호를 미리 계산하고(S120), 계산된 앞먹임 신호에 더하여 주어진 설정궤도를 추적하기 위한 램프

전력의 되먹임 신호를 실시간으로 계산한다.(S130)

[0097] 이때, 상태추정기(500)는 실시간으로 측정되는 웨이퍼 온도를 이용하여 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)의 상태를 추정하며,(S140) 1회분의 운전이 종료되면, 웨이퍼 위에 쌓여진 산소층의 두께를 측정하여 반복학습 제어기에 입력한다. (S150)

[0098] 다음은 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)에서 사용되는 제어 알고리즘에 대하여 보다 상세하게 설명한다.

[0099] (1) 모델의 변형

[0100] 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)의 설계를 위해, 제어기에 탑재할 델타형 모델이 필요하다. 이때, 델타형 모델은 모델인식 실험을 통해 결정되며, 다음의 [수학식 9]와 같이 표현된다.

수학식 9

$$\delta\bar{X}(t) = \bar{A}_\delta \bar{X}(t) + \bar{B}_\delta \bar{U}(t)$$
$$\bar{Y}(t) = \bar{C}_\delta \bar{X}(t)$$

[0101]

[0102] 여기서, $(\bar{A}_\delta, \bar{B}_\delta, \bar{C}_\delta)$ 는 모델인식 실험을 통해 결정된 델타형 상태공간 모델이며, $\bar{X}(t)$는 상태를 나타낸다. $\bar{U}(t)$ 와 $\bar{Y}(t)$ 는 각각 램프 전력과 고온계를 통해 측정되는 웨이퍼 온도를 나타낸다. 한편, δ 는 델타연산자를 나타내며 다음의 수식과 같이 정의된다.

수학식 10

$$\delta \triangleq \frac{q-1}{h}$$

[0103]

[0104] 여기서, h 는 샘플링 시간이며, q 는 전진이동연산자를 나타낸다. 상기 [수학식 10]에 의해 알 수 있듯이, 델타연산자는 샘플링 시간이 짧아질수록 연속시간의 미분연산자와 비슷해진다.

[0105] 제어기에 자연스럽게 적분기능이 포함되도록 하기 위해, 상기 [수학식 9]로 표현되는 델타형 모델을 행렬식으로 재정리하면 다음과 같다.

수학식 11

$$\delta\bar{Z}(t) = \bar{\Phi}\bar{Z}(t) + \bar{\Gamma}\delta\bar{U}(t)$$
$$\bar{Y}(t) = \bar{\Sigma}\bar{Z}(t)$$
$$where\ \ \bar{Z}(t) \triangleq \begin{bmatrix} \delta\bar{X}(t) \\ \bar{Y}(t) \end{bmatrix},\ \bar{\Phi} \triangleq \begin{bmatrix} \bar{A}_\delta & 0 \\ \bar{C}_\delta & 0 \end{bmatrix},\ \bar{\Gamma} \triangleq \begin{bmatrix} \bar{B}_\delta \\ 0 \end{bmatrix},\ \bar{\Sigma} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix}$$

[0106]

[0107] 여기서, $(\bar{\Phi}, \bar{\Gamma}, \bar{\Sigma})$ 는 새롭게 정리된 델타형 상태공간 모델이며, 상기 [수학식 11]과 같이 정의된다. $\bar{Z}(t)$는 상기 새롭게 정리된 델타형 상태공간 모델의 상태이며, 상기 [수학식 11]과 같이 정의된다. 한편, 앞에서 설명한 것과 같이, $\bar{U}(t)$ 와 $\bar{Y}(t)$ 는 각각 램프 전력과 고온계를 통해 측정되는 웨이퍼 온도를 나타낸다.

[0108] (2) 제어 알고리즘

[0109] 본 발명의 실시예에 따른 제어의 목적은 램프 전력의 변화량을 최소화하고, 웨이퍼 온도를 온도 설정궤도에 부합하도록 조절하며, 최종적으로 램프 전력을 반복학습 제어기(300)에 의해 제공된 램프 전력 바이어스 값에 수렴시키는 것이다. 이러한 제어의 목적을 달성하기 위해, 표준 선형이차 가우시안 제어기의 설정궤도 추적을 위한 목적함수는 다음의 식과 같이 변형된다.

수학식 12

$$\min_{\delta\bar{U}(\cdot)} \frac{1}{2}\left[\left\|\bar{r}(N)-\bar{\Sigma}\bar{Z}(N)\right\|_{\bar{M}}^2 + \sum_{t=0}^{N-1}\left\{\left\|\bar{r}(t)-\bar{\Sigma}\bar{Z}(t)\right\|_{\bar{Q}(t)}^2 + \left\|\delta\bar{U}(t)\right\|_{R(t)}^2 + \left\|\bar{U}(t)-U_b\right\|_{\bar{S}(t)}^2\right\}\right]$$

$$where \quad \left\|\bar{r}(N)-\bar{\Sigma}\bar{Z}(N)\right\|_{\bar{M}}^2 \triangleq \left(\bar{r}(N)-\bar{\Sigma}\bar{Z}(N)\right)^T \bar{M}\left(\bar{r}(N)-\bar{\Sigma}\bar{Z}(N)\right)$$

$$\left\|\bar{r}(t)-\bar{\Sigma}\bar{Z}(t)\right\|_{\bar{Q}(t)}^2 \triangleq \left(\bar{r}(t)-\bar{\Sigma}\bar{Z}(t)\right)^T \bar{Q}(t)\left(\bar{r}(t)-\bar{\Sigma}\bar{Z}(t)\right)$$

$$\left\|\delta\bar{U}(t)\right\|_{R(t)}^2 \triangleq \left(\delta\bar{U}(t)\right)^T R(t)\left(\delta\bar{U}(t)\right)$$

$$\left\|\bar{U}(t)-U_b\right\|_{\bar{S}(t)}^2 \triangleq \left(\bar{U}(t)-U_b\right)^T \bar{S}(t)\left(\bar{U}(t)-U_b\right)$$

[0110]

[0111] 여기서, $\bar{r}$ 은 설정부(200)를 통해 완만한 모양으로 변환된 웨이퍼 온도의 설정궤도이다. $\bar{Z}$ 와 $\bar{\Sigma}$는 각각 상기 [수학식 11]의 델타형 상태공간 모델의 상태와 출력행렬(output matrix)이다.

[0112] N는 한 회분 동안의 총 샘플링 횟수이다. $\bar{U}$ 는 램프 전력이며, U_b 는 반복학습 제어기(300)에 의해 제공되는 램프 전력의 바이어스 값이다. $\bar{M}$ 는 한 회분의 마지막 시점에서의 웨이퍼 온도 오차에 대한 가중치 행렬이다. $\bar{Q}$ 는 한 회분의 마지막 시점을 제외한 나머지 시간에서의 웨이퍼 온도 오차에 대한

[0113] 가중치 행렬을 나타낸다. R 은 램프 전력 변화량에 대한 가중치 행렬이며, $\bar{S}$ 는 램프 전력과 램프 전력의 바이어스 값의 차분에 대한 가중치 행렬이다.

[0114] 상기 [수학식 12]의 목적함수의 마지막 항은 램프 전력을 반복학습 제어기(300)에 의해 제공된 램프 전력 바이어스 값에 수렴시키기 위함이다. 이러한 램프 전력이 램프 전력 바이어스 값으로부터 벗어나는 편차에 대한 페널티 항은 표준 선형이차 가우시안 제어기의 목적함수에는 없는 것으로서, 본 발명의 실시예에서는 이러한 입력 편차에 대한 페널티 항을 고려함으로써 램프 전력이 웨이퍼 온도 균일도를 향상시키는 방향으로 수렴하도록 조절하였다.

[0115] 상기 [수학식 12]의 목적함수를 표준형 선형이차 가우시안 목적함수로 변경하기 위해, 상기 [수학식 11]의 델타형 상태공간 모델을 다음과 같이 변형한다.

수학식 13

$$\delta Z(t) = \Phi Z(t) + \Gamma \delta \bar{U}(t)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}(t) \\ \bar{U}(t) \end{bmatrix} = \Sigma Z(t)$$

$$where \quad Z(t) \triangleq \begin{bmatrix} \bar{Z}(t) \\ \bar{U}(t) \end{bmatrix}, \ \Phi \triangleq \begin{bmatrix} \bar{\Phi} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \ \Gamma \triangleq \begin{bmatrix} \bar{\Gamma} \\ I \end{bmatrix}, \ \Sigma \triangleq \begin{bmatrix} \bar{\Sigma} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

[0116]

[0117] 여기서, $(\bar{\Phi}, \bar{\Gamma}, \bar{\Sigma})$ 는 상기 [수학식 11]에 제시된 델타형 상태공간 모델이며, $\bar{U}(t)$와 $\bar{Y}(t)$각각 램프 전력과 고온계를 통해 측정되는 웨이퍼 온도이다. Z 는 [수학식 13]에 의해 새롭게 정리된 델타형 상태공간 모델의 상태이다.

[0118] [수학식 13]을 [수학식 12]에 적용하면, 다음과 같이 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)의 목적함수를 표준형 선형이차 가우시안 목적함수의 형태로 전환할 수 있다.

수학식 14

$$\min_{\delta \bar{U}(\cdot)} \frac{1}{2}\left[\left\| r(N) - \Sigma Z(N) \right\|_M^2 + \sum_{t=0}^{N-1} \left\{ \left\| r(t) - \Sigma Z(t) \right\|_{Q(t)}^2 + \left\| \delta \bar{U}(t) \right\|_{R(t)}^2 \right\} \right]$$

$$where \quad \left\| r(N) - \Sigma Z(N) \right\|_M^2 \triangleq \left(r(N) - \Sigma Z(N) \right)^T M \left(r(N) - \Sigma Z(N) \right)$$

$$\left\| r(t) - \Sigma Z(t) \right\|_{Q(t)}^2 \triangleq \left(r(t) - \Sigma Z(t) \right)^T Q(t) \left(r(t) - \Sigma Z(t) \right)$$

$$\left\| \delta \bar{U}(t) \right\|_{R(t)}^2 \triangleq \left(\delta \bar{U}(t) \right)^T R(t) \left(\delta \bar{U}(t) \right)$$

$$r(t) \triangleq \left[\bar{r}(t)^T \quad U_b^T \right]^T, \ M \triangleq \mathrm{diag}\left[\bar{M}, \bar{S}(N) \right], \ Q(t) \triangleq diag\left[\bar{Q}(t), \bar{S}(t) \right]$$

[0119]

[0120] 여기서, M 은 상기 [수학식 14]와 같이 정의되며, 한 회분의 마지막 시점에서의 제어오차에 대한 가중치 행렬이다. 마찬가지로, Q 는 상기 [수학식 14]와 같이 정의되며, 한 회분의 마지막 시점을 제외한 나머지 시점에서의 제어오차에 대한 가중치 행렬이다. 앞에서 설명한 것과 같이, R 은 램프 전력의 변화량에 대한 가중치 행렬이다. 따라서 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)는 상기 [수학식 14]의 가중치 행렬인 M , Q , R 을 조절함으로써 제어성능을 조율할 수 있다.

[0121] 상기 [수학식 14]의 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)의 목적함수는 표준형 성형이차 가우시안 목적함수의 형태이므로, 그 해는 다음과 같이 주어진다.

수학식 15

$$\delta\bar{U}(t) = K_{fb}(t+1)Z(t) + K_{ff}(t+1)b(t+1)$$

where

$$K_{fb}(t+1) = -\left(R(t) + h\Gamma^T P(t+1)\Gamma\right)^{-1}\Gamma^T P(t+1)\left(I + h\Phi\right)$$

$$K_{ff}(t+1) = \left(R(t) + h\Gamma^T P(t+1)\Gamma\right)^{-1}\Gamma^T$$

$$P(t) = P(t+1) + h\Big[\Sigma^T Q(t)\Sigma + \Phi^T P(t+1) + P(t+1)\Phi + h\Phi^T P(t+1)\Phi$$
$$-K_{fb}(t+1)^T\left(R(t) + h\Gamma^T P(t+1)\Gamma\right)K_{fb}(t+1)\Big],\ P(N) = h\Sigma^T M\Sigma$$

$$b(t) = b(t+1) - h\Big[\left(I + h\Phi^T\right)\Big(P(t+1) - hP(t+1)\Gamma K_{ff}(t+1)P(t+1)\Big)\Gamma R(t)^{-1}\Gamma^T b(t+1)$$
$$-\Phi^T b(t+1) - \Sigma^T Q(t)r(t)\Big],\ b(N) = h\Sigma^T Mr(N)$$

[0122]

[0123] 여기서, h 는 샘플링 시간이며, (Φ, Γ, Σ) 는 상기 [수학식 13]에 의해 정의된 델타형 상태공간 모델이다. Z 는 [수학식 13]에 의해 정의된 델타형 상태공간 모델의 상태이며, M , Q , R은 상기 [수학식 14]의 가중치 행렬과 동일하다. K_{fb} 는 되먹임 신호의 이득행렬이며, K_{ff} 는 앞먹임 신호의 이득행렬이다.

[0124] 한편, 상기 [수학식 15]에 제시된 것과 같이, P 와 b 는 한 회분의 마지막 시점에서부터 거꾸로 계산된다. 상기 [수학식 15]에서 Z 는 공정의 상태를 나타내는 변수로서, 직접 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)를 실제 공정의 제어에 적용하기 위해서, Z 는 상태추정기(500)를 통해 추정된 값인 $\hat{Z}$ 으로 대체되어야 한다.

[0125] 다음은 본 발명의 실시예에 따른 상태추정기(500)에 대해 보다 상세하게 설명한다. 본 발명의 실시예에 따른 상태추정기(500)는 급속 열처리장치(100)의 고온계를 통해 측정되는 웨이퍼의 온도를 이용하여 칼만 필터를 통해 [수학식 15]의 상태변수 Z 를 추정한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

수학식 16

$$\delta\hat{Z}(t\,|\,t) = \Phi\hat{Z}(t\,|\,t) + \Gamma\delta\bar{U}(t)$$

$$\hat{Z}(t+1\,|\,t+1) = \hat{Z}(t+1\,|\,t) + K(t+1)\left(\begin{bmatrix}\bar{Y}(t+1)\\ \bar{U}(t+1)\end{bmatrix} - \Sigma\hat{Z}(t+1\,|\,t)\right)$$

[0126]

[0127] 여기서, $\hat{Z}(t\,|\,t)$ 는 t 시점까지의 정보를 이용한 $Z(t)$ 의 최적 추정치(optimal estimate)를 나타낸다. $\bar{U}(t+1)$ 와 $\bar{Y}(t+1)$ 는 각각 램프 전력과 고온계를 통해 측정된 웨이퍼 온도를 나타낸다. (Φ, Γ, Σ) 는 [수학식 13]에 의해 정의된 델타형 상태공간 모델이며, $K(t+1)$ 은 시변 칼만 이득(time-varying Kalman gain)을 나타낸다.

[0128] 상태추정기(500)를 통해 추정된 상태변수 $\hat{Z}$ 는 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)에 입력된다. 즉, 델타형 선형이차 가우시안 제어기(400)를 실제 공정의 제어에 적용할 경우 [수학식 15]의 Z 는 [수학식 16]에 의해 계산된 $\hat{Z}$ 로 대체되어 적용된다.

[0129] 본 발명의 실시예에 따른 과잉 입력 자유도를 갖는 회분공정의 델타형 모델기반 제어시스템의 델타형 선형이차 가우시안 제어기는 실제 급속 열처리장치를 대상으로 제어실험을 수행함으로써 그 성능이 검증된다.

[0130] 도 1의 급속 열처리장치의 웨이퍼 온도제어에 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기를 적용된다. 온도의 설정궤도는 웨이퍼 온도를 720℃부터 985℃까지 약 50℃/초의 속도로 상승한 후, 985℃에서 20초 동안 머무르도록 요구한다. 이때, 제어동작은 0.05초의 샘플링 시간을 주기로 수행된다.

[0131] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 제어성능을 검증하기 위해, 제어기를 급속 열처리장치의 웨이퍼 온도제어에 적용하였을 때 얻어진 웨이퍼 온도와 설정궤도를 도시한 그래프이다. 굵은 선은 설정궤도를 나타내며, 6개의 얇은 선은 고온계를 통해 측정된 웨이퍼의 온도를 나타낸다. 도 7의 결과로부터 빠른 온도 상승 구간에서뿐만 아니라, 985℃로 온도를 일정하게 유지하는 구간에서도 델타형 선형이차 가우시안 제어기가 웨이퍼 온도를 설정궤도에 부합하도록 잘 제어하는 것을 알 수 있다.

[0132] 도 8은 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 제어성능을 검증하기 위해, 제어기를 급속 열처리장치의 웨이퍼 온도제어에 적용하였을 때 얻어진 램프 전력의 변화를 도시한 그래프이다. 급속 열처리장치에서 10개의 텅스텐-할로겐 램프그룹은 웨이퍼 가열을 위해 사용되며, 각각의 램프에 입력되는 전력은 조작변수의 역할을 한다. 이때 램프에 입력되는 전력은0~100% 사이의 값으로 정규화(normalized)되어 입력된다.

[0133] 이상에서는 본 발명의 실시예에 대해서 설명하였으나, 이 외에도 여러가지 다양한 변경 및 변형이 가능하다. 예컨대, 본 발명의 실시예에서는 설정부의 저주파 필터로서, 이득이 1이고 시정수가 0.5인 1차 전달함수를 사용하였으나 이외의 다른 지연공정(Lag process)을 나타내는 전달함수도 사용할 수 있다. 또한, 본 발명의 실시예에서는 상태추정기로서 칼만 필터를 사용하였으나 이외의 다른 선형 상태추정기를 사용할 수도 있다. 한편, 본 발명의 실시예에서는 반복학습 제어기의 목적함수의 해를 구하기 위한 방법으로 이차 계획법을 사용하였으나, 이외에도 뉴튼 랩손방법(Newton Raphson Method) 등의 최적화 방법을 사용할 수도 있다.

[0134] 또한, 이상에서 설명한 본 발명의 실시예는 장치 및 방법을 통해서만 구현이 되는 것은 아니며, 본 발명의 실시예의 구성에 대응하는 기능을 실현하는 프로그램 또는 그 프로그램이 기록된 기록 매체를 통해 구현될 수도 있으며, 이러한 구현은 앞서 설명한 실시예의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야의 전문가라면 쉽게 구현할 수 있는 것이다.

[0135] 더하여, 본 발명의 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리 범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

도면의 간단한 설명

[0136] 도 1은 본 발명이 적용되는 일례로서, 웨이퍼 가공을 위한 급속 열처리 장치의 사진,

[0137] 도 2는 본 발명의 시스템에 적용되는 급속 열처리장치에 장착된 DSP보드의 사양을 도시한 표,

[0138] 도 3은 미분연산자(differential operator)를 이용한 연속시간 모델(a), 전진이동연산자를 이용한 이산시간 모델(b) 및 델타연산자를 이용한 이산시간 모델(c)이 안정하기 위한 고유값의 위치를 복소평면에 도시한 그래프,

[0139] 도 4는 미분연산자로 표현되는 연속시간 모델, 전진이동연산자로 표현되는 이산시간 모델 및 델타연산자로 표현되는 이산시간 모델의 32bit 제어연산장치에서의 계단응답을 도시한 그래프,

[0140] 도 5은 본 발명의 실시예에 따른 과잉 입력 자유도를 갖는 회분공정의 델타형 모델기반 제어시스템의 구성을 나타내는 도면,

[0141] 도 6은 본 발명에 따른 델타형 모델기반 제어방법의 흐름도를 예시한 도면,

[0142] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 제어성능을 검증하기위해, 제어기를 급속 열처리장치의 웨이퍼 온도제어에 적용하였을 때 얻어진 웨이퍼 온도와 설정궤도를 도시한 그래프,

[0143] 도 8은 본 발명의 실시예에 따른 델타형 선형이차 가우시안 제어기의 제어성능을 검증하기 위해, 제어기를 급속 열처리장치의 웨이퍼 온도제어에 적용하였을 때 얻어진 램프 전력의 변화를 도시한 그래프이다.

도면

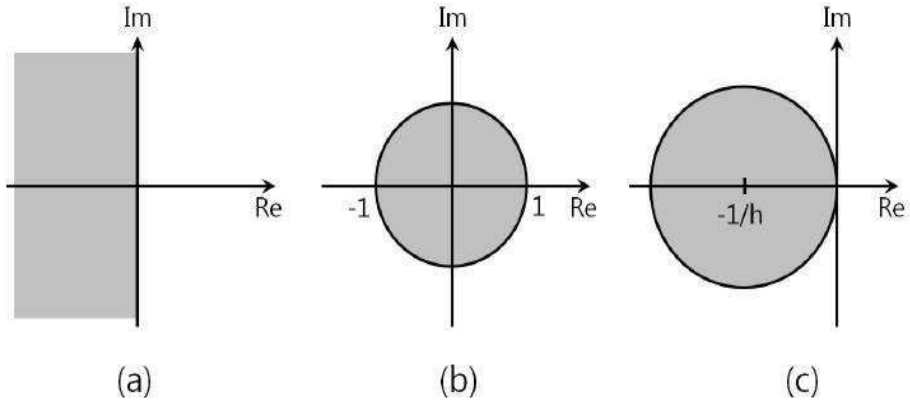
도면1



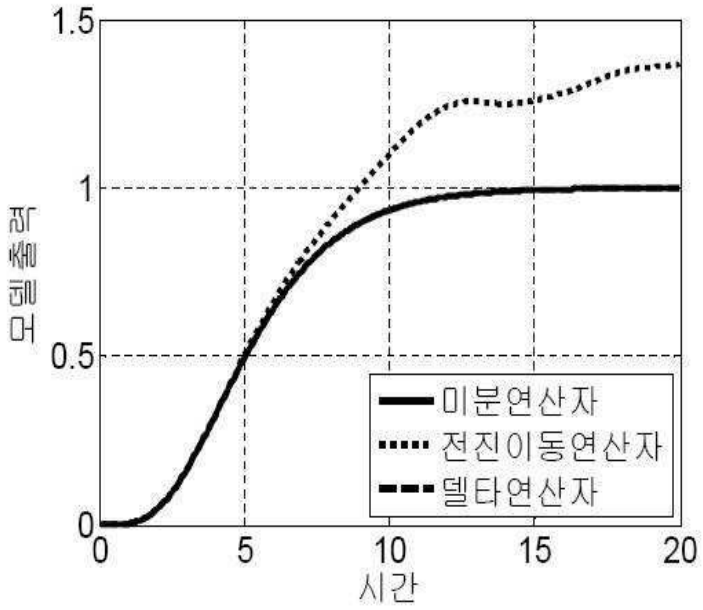
도면2

Specification of floating-point digital signal processor (DSP)	
Module name	Kornic DSP6000f
Process	TMS320C6713@300MHz (32bit processor)
SDRAM	64M Bytes
ROM	2M Bytes Flash ROM
ADC	16CH (AD7655 x 4)
DAC	16CH (AD5582 x 4)

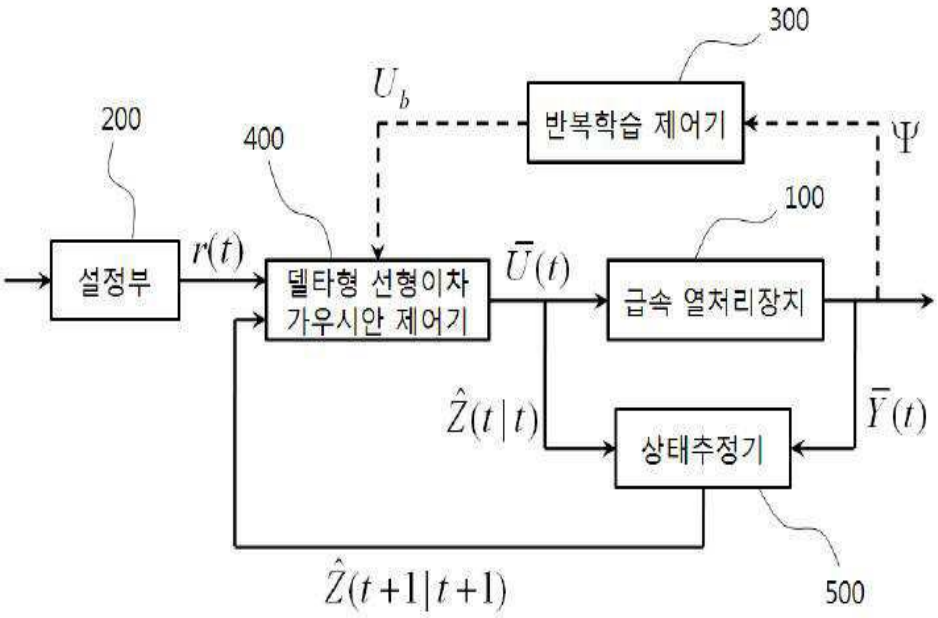
도면3


Im
Re
(a)
Im
-1
1
Re
(b)
Im
-1/h
Re
(c)

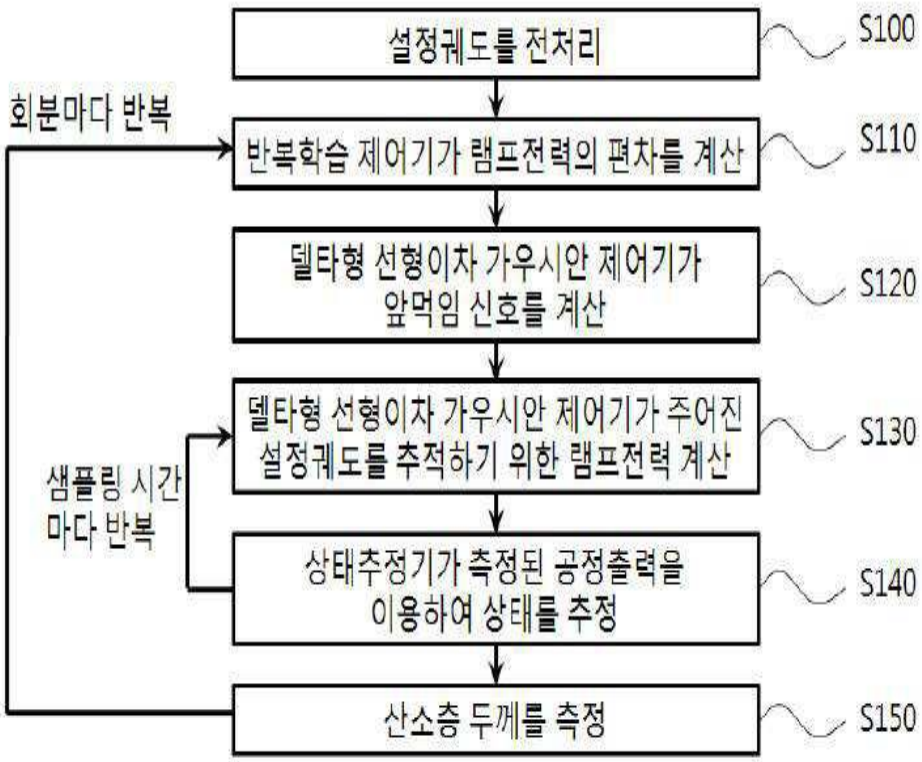
도면4


1.5
1
0.5
0
0
5
10
15
20
시간
미분연산자
전진이동연산자
델타연산자

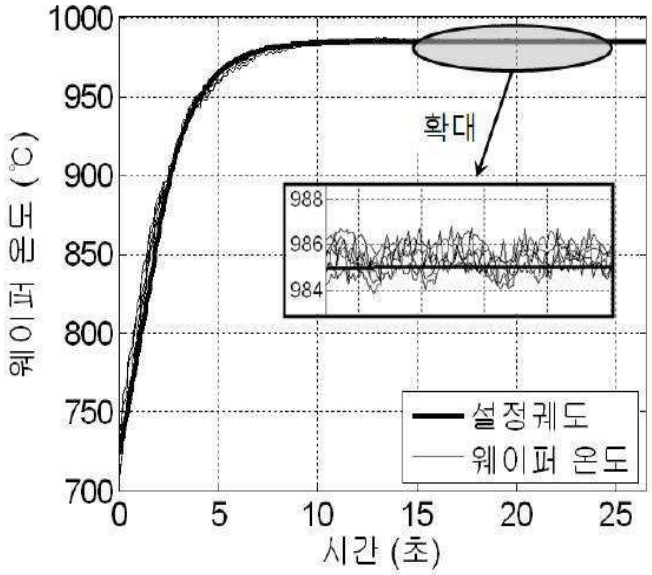
도면5


300
U_b
반복학습 제어기
Ψ
200
400
100
$r(t)$
설정부
델타형 선형이차
가우시안 제어기
$\bar{U}(t)$
급속 열처리장치
$\hat{Z}(t|t)$
$\bar{Y}(t)$
상태추정기
$\hat{Z}(t+1|t+1)$
500

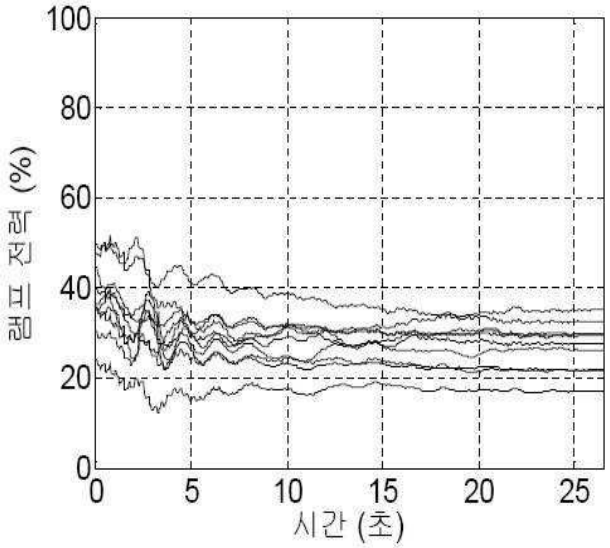
도면6


설정궤도를 전처리
S100
회분마다 반복
반복학습 제어기가 램프전력의 편차를 계산
S110
델타형 선형이차 가우시안 제어기가
앞먹임 신호를 계산
S120
델타형 선형이차 가우시안 제어기가 주어진
설정궤도를 추적하기 위한 램프전력 계산
S130
샘플링 시간
마다 반복
상태추정기가 측정된 공정출력을
이용하여 상태를 추정
S140
산소층 두께를 측정
S150

도면7


1000
950
900
850
800
750
700
웨이퍼 온도 (℃)
확대
988
986
984
설정궤도
웨이퍼 온도
0
5
10
15
20
25
시간 (초)

도면8


100
80
60
40
20
0
램프 전력 (%)
0
5
10
15
20
25
시간 (초)