



등록특허 10-2467933



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년11월16일
(11) 등록번호 10-2467933
(24) 등록일자 2022년11월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 21/67 (2006.01) G01K 1/02 (2021.01)
(52) CPC특허분류
H01L 21/67248 (2013.01)
G01K 1/02 (2021.01)
(21) 출원번호 10-2021-0075546
(22) 출원일자 2021년06월10일
심사청구일자 2021년06월10일
(56) 선행기술조사문헌
KR101598557 B1
(뒷면에 계속)

(73) 특허권자
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
김진균
경기도 수원시 영통구 매영로310번길 27, 645동 1201호 (영통동, 신원미주아파트)
안창욱
경기도 수원시 영통구 매영로247번길 20, 116동 305호 (원천동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김종선, 이형석

전체 청구항 수 : 총 10 항

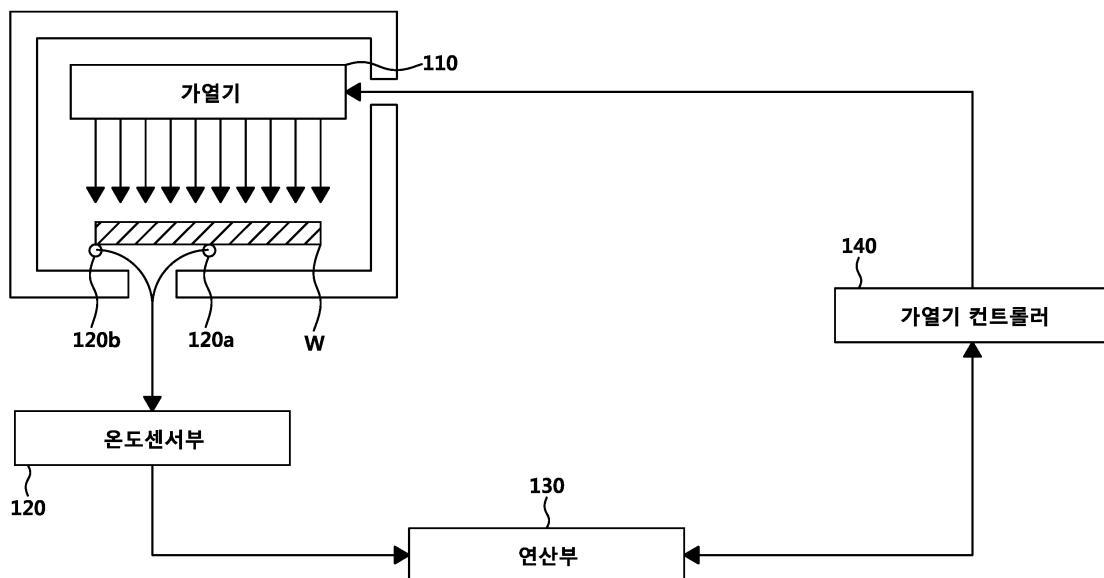
심사관 : 이재일

(54) 발명의 명칭 디지털 트윈 기반의 온도분포 예측방법 및 온도분포 예측장치

(57) 요약

본 발명에 따른 온도분포 예측방법은 상기 기관의 형상 및 열적 거동에 대한 수치모델을 구축하는 구축단계, 온도센서에 의해 측정된 상기 기관의 측정온도의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정하는 설정단계, 복수의 가열기로부터 상기 기관이 받은 열원을 예측하는 민감도 계수 행렬을 생성하는 생성단계, 가열기 각각에 입력되
(뒷면에 계속)

대표도 - 도3



는 전력비에 기초하여 상기 민감도 계수 행렬을 응축하는 응축단계 및 소정의 온도 데이터가 입력되면, 상기 수치모델, 안정기 파라미터 및 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 상기 기관의 전체 온도분포를 예측하는 예측단계를 포함한다. 이에 의하면, 디지털 트윈 기술을 활용하여 점 측정된 온도 데이터를 가공하여 온도 분포 예측이 가능해지므로, 다수의 온도 센서를 대체하여 계측 비용 절감 효과를 기대할 수 있다. 또한, 온도분포 정보는 가열기를 더욱 정밀하게 제어하기 위한 필수적인 정보가 될 뿐만 아니라, 기관의 온도 균일도를 엄격하게 계산할 수 있는 근거가 되므로, 제조되는 반도체 장치의 품질 및 수율을 향상시키는 기술적 효과를 도모할 수 있다.

(52) CPC특허분류

H01L 21/67115 (2013.01)

G01K 2213/00 (2013.01)

(72) 발명자

이지원

전라북도 전주시 덕진구 동부대로 785, 301동 207호 (호성동1가, 동신아파트)

백인찬

경기도 수원시 영통구 매영로425번길 16, 201호 (영통동)

권도형

경기도 수원시 영통구 청명로59번길 59-1, 204호 (영통동)

(56) 선행기술조사문헌

KR1020150092712 A

KR1020100115865 A

KR1020100017948 A

KR1020050014877 A

명세서

청구범위

청구항 1

열처리 대상 기관의 온도분포를 측정하는 온도분포 측정방법으로,
 상기 기관의 형상 및 열적 거동에 대한 수치모델을 구축하는 구축단계;
 온도센서에 의해 측정된 상기 기관의 측정온도의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정하는 설정단계;
 복수의 가열기로부터 상기 기관이 받은 열원을 예측하는 민감도 계수 행렬을 생성하는 생성단계;
 상기 가열기 각각에 입력되는 전력비에 기초하여 상기 민감도 계수 행렬을 응축하는 응축단계; 및
 소정의 온도 데이터가 입력되면, 상기 수치모델, 안정기 파라미터 및 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 상기 기관의 전체 온도분포를 예측하는 예측단계;를 포함하는 온도분포 예측방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
 상기 응축단계는,
 가열기 컨트롤러가 각 가열기의 전력비 정보를 산출하는 단계; 및
 상기 전력비 정보를 상기 가열기 컨트롤러로부터 수신하여 상기 민감도 계수 행렬을 응축하는 단계;를 포함하는 온도분포 예측방법.

청구항 3

제1항에 있어서,
 상기 예측단계는, 복수의 가열기 중 일부의 열원만 연산하고, 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 나머지 열원을 복원하는 온도분포 예측방법.

청구항 4

제1항에 있어서,
 상기 온도센서에서 측정된 상기 소정의 온도 데이터를 이용하여 예측된 전체 온도분포와 온도검증용 온도센서를 이용하여 측정된 온도 데이터를 실시간으로 비교하는 모니터링 단계;를 더 포함하는 온도분포 예측방법.

청구항 5

제1항에 있어서,
 상기 설정단계는,
 최초 테스트 구동시의 온도 데이터에 기초하여 최초 안정기 파라미터를 설정하는 단계;
 열처리가 수행되는 동안 메모리에 저장된 온도 데이터에 기초하여 소정 주기로 안정기 파라미터의 교정값을 연산하는 단계; 및
 상기 교정값을 상기 안정기 파라미터로 설정하는 단계;를 포함하는 온도분포 예측방법.

청구항 6

열처리 대상 기관에 열원을 공급하는 복수의 가열기;
 상기 복수의 가열기에 의해 변화하는 상기 기관의 온도를 측정하는 온도센서부; 및
 상기 온도센서부로부터 소정의 온도 데이터가 입력되면 상기 기관의 전체 온도분포를 예측하는 연산부;를 포함

하고,

상기 연산부는,

상기 기관의 형상 및 열적 거동에 대한 수치모델을 구축하는 수치모델 구축부;

상기 온도센서부에 의해 측정된 상기 기관의 측정온도의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정하는 파라미터 설정부;

상기 복수의 가열기로부터 상기 기관이 받은 열원을 예측하는 민감도 계수 행렬을 생성하고, 상기 가열기 각각에 입력되는 전력비에 기초하여 상기 민감도 계수 행렬을 응축하는 행렬 생성부; 및

소정의 온도 데이터가 입력되면, 상기 수치모델, 안정기 파라미터 및 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 상기 기관의 전체 온도분포를 예측하는 예측부;를 포함하는 온도분포 예측장치.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 복수의 가열기 각각의 전력비 정보를 산출하는 가열기 컨트롤러;를 더 포함하고,

상기 행렬 생성부는, 상기 가열기 컨트롤러로부터 상기 전력비 정보를 수신하여 상기 민감도 계수 행렬을 응축하는 온도분포 예측장치.

청구항 8

제6항에 있어서,

상기 예측부는, 복수의 가열기 중 일부의 열원만 연산하고, 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 나머지 열원을 복원하는 온도분포 예측장치.

청구항 9

제6항에 있어서,

상기 온도센서부는 측정용 온도센서 및 검증용 온도센서를 포함하고,

상기 측정용 온도센서에서 측정된 상기 소정의 온도 데이터를 이용하여 예측된 전체 온도분포와 상기 검증용 온도센서를 이용하여 측정된 온도 데이터를 실시간으로 비교하는 모니터부;를 더 포함하는 온도분포 예측장치.

청구항 10

제6항에 있어서,

상기 파라미터 설정부는,

최초 테스트 구동시의 온도 데이터에 기초하여 최초 안정기 파라미터를 설정하고, 열처리가 수행되는 동안 메모리에 저장된 온도 데이터에 기초하여 소정 주기로 안정기 파라미터의 교정값을 연산하며, 상기 교정값을 상기 안정기 파라미터로 설정하는 온도분포 예측장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 반도체 장치 제조시 급속 열처리가 이루어지는 동안 웨이퍼(wafer)의 전체 온도분포를 예측하는 방법 및 장치에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 극소수의 점 측정 온도 데이터만으로 웨이퍼의 온도분포를 예측할 수 있는 온도분포 예측방법 및 온도분포 예측장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002]

반도체 장치 제조에 있어 급속 열처리(Rapid Thermal Processing, 이하, 'RTP'라 칭함) 단계에서는 웨이퍼의 온도가 가파르게 상승한다. 이때 웨이퍼의 온도분포를 균일하게 유지하지 못하면, 뒤틀림(warping), 균열(crack), 전위(dislocation)와 같은 문제들이 발생한다. 따라서, RTP 단계에서 온도분포를 균일하게 유지하는 것이 중요

하며, 이를 위해 웨이퍼의 온도분포 측정기술이 요구된다.

- [0003] 웨이퍼의 온도 측에는 접촉식 온도 센서인 열전대(Thermocouple)와 비접촉식 온도 센서인 고온계(Pyrometer)가 주로 이용된다. 열전대를 이용하여 온도를 측정하는 경우 웨이퍼의 전체 온도 분포를 측정을 위해 상당히 많은 수의 센서를 필요로 하며, 이는 열전대의 열 저항 증가로 인한 오차를 야기하며, 사용이 계속됨에 따라 오차가 커진다는 문제점이 있다.
- [0004] 따라서, 종래의 RTP 장비에서는 고온계를 이용한 온도 측정이 주류를 이루었다. 고온계로 전체 온도 분포를 측정하는 경우 웨이퍼의 한 포인트 혹은 다수 포인트에서 나오는 광자량을 측정하게 된다. 하지만, RTP 과정 중에는 웨이퍼의 온도 변화 폭이 매우 크기 때문에, 물체의 복사도(Emissivity)가 변화하게 된다. 이는 고온계를 이용한 정확한 온도 측정을 어렵게 만들었다.
- [0005] 열전대에 비하여 상대적으로 고가임에도 불구하고 고온계가 RTP 장비의 온도 측에서 주류를 이룬 이유는 열전대를 이용한 온도 측치에는 상당한 수의 센서를 필요로 하기 때문에 반도체 장치의 대량 생산시에는 결국 생산 비용의 상승을 야기하기 때문이다.
- [0006] 결국, 현존하는 하드웨어 장비에만 의존하여 웨이퍼의 전체 온도 분포를 측정하는 것은 매우 어려운 문제이며, 이는 웨이퍼의 균일도를 계산하는 문제로 이어진다. 박막 균일도에 대한 계산 공식은 장비 또는 업체별로 상이할 수 있지만, 주로 $(\max - \min) / (2 * \text{avg})$ 와 $(\max - \min) / (\max + \min)$ 와 같이 $\max / \min$ 값을 이용하여 계산된다. 이는 측정 데이터가 불충분하기 때문이며, 만약, 측정 데이터가 충분하다면 공간에 대한 표준편차(Standard deviation)를 계산하여 정밀한 균일도 계산이 가능해질 수 있다.
- [0007] 한국공개특허공보 제10-2021-0000731호(발명의 명칭: 공간적으로 분해된 웨이퍼 온도 제어를 위한 가상 센서, 출원인: 어플라이드 머티리얼스, 인코포레이티드)는 기관 처리 중의 기관의 온도 감지 및 제어를 위한 방법 및 장치에 관한 것으로, 기관 처리 중의 기관 온도를 직접 측정하기가 어렵다는 기술적 문제를 해결하고자, 가열기의 전력 출력 변화에 따른 기관의 온도 변화를 예측하기 위한 모델을 기계 학습 기법을 통해 구축하고, 이를 향후의 프로세싱 동작들에 대한 가열기 설정점들을 조정하는 데 사용하는 방식을 개시한다.
- [0008] 하지만 한국공개특허공보 제10-2021-0000731호에 개시된 발명은 두 가지 문제점을 내포한다. 하나는 모델을 구축하기 위해 방대한 사전 데이터를 필요로 한다는 비용 문제이고, 다른 하나는 시간 경과에 따른 프로세스 챔버의 노화로 인하여 기관과 챔버 사이의 열전달 변화가 야기되고, 결국, 가열기의 소정 설정점을 유지하는 것이 기관 온도를 목표 기관 온도로 유지한다는 것을 보장하지 않는다는 문제이다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0009] (특허문헌 0001) 한국 공개특허공보 제10-2021-0000731호 (2021년4월15일 공개)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 본 발명은 상술한 문제점을 감안하여 안출된 것으로, 본 발명의 목적은 웨이퍼 상의 소수의 점측정 온도 데이터를 가공하여 온도분포를 예측하는 방법 및 장치를 제공함에 있다. 구체적으로, 본 발명은 상술한 문제점을 해결하고자 디지털 트윈(Digital Twin) 기법을 도입한다. 본 발명에 있어 디지털 트윈은 실제 구조물과 동일한 구조물의 물리적 거동 및 물리적 응답을 보이게 되는 가상의 수치 모델을 형성하고, 측정 장치를 통해서 측정된 단 몇 개의 데이터를 미리 구축해 놓은 가상의 수치 모델에 적용함으로써 실제 구조물의 계속되지 않은 전 범위의 물리적 현상을 예측하는 기술로 이용한다.

과제의 해결 수단

- [0011] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 온도분포 예측방법은, 열처리 대상 기관의 형상 및 열적 거동에 대한 수치모델을 구축하는 구축단계; 온도센서에 의해 측정된 상기 기관의 측정온도의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정하는 설정단계; 복수의 가열기로부터 상기 기관이 받은 열원을 예측하는 민감도 계수 행렬을 생성하는 생성단계; 상기 가열기 각각에 입력되는 전력비에 기초하여 상기 민감도 계수 행렬을 응축하는

응축단계; 및 소정의 온도 데이터가 입력되면, 상기 수치모델, 안정기 파라미터 및 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 상기 기관의 전체 온도분포를 예측하는 예측단계;를 포함한다.

[0012] 상기 응축단계는, 가열기 컨트롤러가 각 가열기의 전력비 정보를 산출하는 단계; 및 상기 전력비 정보를 상기 가열기 컨트롤러로부터 수신하여 상기 민감도 계수 행렬을 응축하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0013] 상기 예측단계는, 복수의 가열기 중 일부의 열원만 연산하고, 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 나머지 열원을 복원할 수 있다.

[0014] 상기 온도센서에서 측정된 상기 소정의 온도 데이터를 이용하여 예측된 전체 온도분포와 온도검증용 온도센서를 이용하여 측정된 온도 데이터를 실시간으로 비교하는 모니터링 단계;를 더 포함할 수 있다.

[0015] 상기 설정단계는, 최초 테스트 구동시의 온도 데이터에 기초하여 최초 안정기 파라미터를 설정하는 단계; 열처리가 수행되는 동안 메모리에 저장된 온도 데이터에 기초하여 소정 주기로 안정기 파라미터의 교정값을 연산하는 단계; 및 상기 교정값을 상기 안정기 파라미터로 설정하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0016] 한편, 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 온도분포 예측장치는 열처리 대상 기관에 열원을 공급하는 복수의 가열기; 상기 복수의 가열기에 의해 변화하는 상기 기관의 온도를 측정하는 온도센서부; 및 상기 온도센서부로부터 소정의 온도 데이터가 입력되면 상기 기관의 전체 온도분포를 예측하는 연산부;를 포함하고, 상기 연산부는, 상기 기관의 형상 및 열적 거동에 대한 수치모델을 구축하는 수치모델 구축부; 상기 온도센서부에 의해 측정된 상기 기관의 측정온도의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정하는 파라미터 설정부; 상기 복수의 가열기로부터 상기 기관이 받은 열원을 예측하는 민감도 계수 행렬을 생성하고, 상기 가열기 각각에 입력되는 전력비에 기초하여 상기 민감도 계수 행렬을 응축하는 행렬 생성부; 및 소정의 온도 데이터가 입력되면, 상기 수치모델, 안정기 파라미터 및 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 상기 기관의 전체 온도분포를 예측하는 예측부;를 포함한다.

[0017] 상기 복수의 가열기 각각의 전력비 정보를 산출하는 가열기 컨트롤러;를 더 포함하고, 상기 행렬 생성부는, 상기 가열기 컨트롤러로부터 상기 전력비 정보를 수신하여 상기 민감도 계수 행렬을 응축할 수 있다.

[0018] 상기 예측부는, 복수의 가열기 중 일부의 열원만 연산하고, 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 나머지 열원을 복원할 수 있다.

[0019] 상기 온도센서부는 측정용 온도센서 및 검증용 온도센서를 포함하고, 상기 측정용 온도센서에서 측정된 상기 소정의 온도 데이터를 이용하여 예측된 전체 온도분포와 상기 검증용 온도센서를 이용하여 측정된 온도 데이터를 실시간으로 비교하는 모니터부;를 더 포함할 수 있다.

[0020] 상기 파라미터 설정부는, 최초 테스트 구동시의 온도 데이터에 기초하여 최초 안정기 파라미터를 설정하고, 열처리가 수행되는 동안 메모리에 저장된 온도 데이터에 기초하여 소정 주기로 안정기 파라미터의 교정값을 연산하며, 상기 교정값을 상기 안정기 파라미터로 설정할 수 있다.

발명의 효과

[0021] 본 발명에 따른 온도분포 예측방법 및 온도분포 예측장치에 의하면, 디지털 트윈 기술을 활용하여 점 측정된 온도 데이터를 가공하여 온도 분포 예측이 가능해지므로, 다수의 온도 센서를 대체하여 계측 비용 절감 효과를 기대할 수 있다. 또한, 온도분포 정보는 가열기를 더욱 정밀하게 제어하기 위한 필수적인 정보가 될 뿐만 아니라, 기관의 온도 균일도를 엄격하게 계산할 수 있는 근거가 되므로, 제조되는 반도체 장치의 품질 및 수율을 향상시키는 기술적 효과를 도모할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0022] 도 1은 반도체 장비 제조용 급속 열처리 장치의 개략도이다.

도 2는 본 발명에 따른 온도분포 예측방법을 나타내는 흐름도이다.

도 3은 본 발명에 따른 온도분포 예측장치를 나타내는 개략도이다.

도 4는 본 발명에 따른 온도분포 예측장치를 이용한 급속 열처리 방법의 전체적인 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 명세서에 개시된 실시예를 상세히 설명하되, 도면 부호에 관계없이 동일하거나 유사한 구성요소는 동일한 참조 번호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 본 명세서에 개시된 실시예를 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 명세서에 개시된 실시예의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다. 또한, 첨부된 도면은 본 명세서에 개시된 실시예를 쉽게 이해할 수 있도록 하기 위한 것일 뿐, 첨부된 도면에 의해 본 명세서에 개시된 기술적 사상이 제한되지 않으며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0024] 도 1은 반도체 장비 제조용 급속 열처리 장치의 개략도이다. 도 1에 도시된 바와 같이, RTP는 진공 챔버(chamber) 내에서 작업이 이루어진다. 히터 대신 할로겐이나 텅스텐 할로겐 램프 등을 이용하여 적외선 복사광선을 발생시켜 레이저빔을 집광 렌즈에 모아 웨이퍼에 순간적으로 주사하는 방식을 이용한다. 퍼니스(furnace) 장비를 이용한 열처리에 비하여, RTP는 매우 빠른 속도로 웨이퍼의 열처리가 가능하며, 공정 및 주변환경 제어가 용이하다는 장점이 있다.

[0025] 퍼니스 장비를 이용한 열처리는 퍼니스 내부의 온도를 측정하는 방식으로 온도측정이 이루어지나, RTP에서는 웨이퍼 표면의 온도를 직접 측정하는 방식을 이용한다. 이때, 웨이퍼의 온도 측정에는 도 1에 도시된 바와 같이 접촉식 온도 센서인 열전대(Thermocouple)나 비접촉식 온도 센서인 고온계(Pyrometer) 등을 이용할 수 있다.

[0026] 도 2는 본 발명에 따른 온도분포 예측방법을 나타내는 흐름도이다. 도 2에 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 온도분포 예측방법은 수치모델 구축단계(S100), 안정기 파라미터 설정 단계(S110), 열원 예측을 위한 민감도 계수 행렬(Sensitivity coefficient matrix) 생성단계(S120), 전력비에 기초한 민감도 계수 행렬 응축단계(S130) 및 온도 데이터 입력에 의한 전체 온도분포 예측단계(S140)를 포함한다.

[0027] 먼저, 열원과 전체 온도분포는 아래의 (수식1)에 의하여 계산될 수 있다.

[0028] (수식1)

$$[0029] \Delta t = t^{i+1} - t^i,$$

$$[0030] \Delta q^{i+1} = [(X_s^{i+1})^T (X_s^{i+1}) + \alpha I]^{-1} (X_s^{i+1})^T (Y^{i+1} - \bar{T}_s^{i+1}),$$

$$[0031] q^{i+1} = q^i + \Delta q^{i+1},$$

$$[0032] T^{i+1} = T^i + X_s^{i+1} \Delta q^{i+1}$$

[0033] 여기서, t^i 는 과거 시점 시간, t^{i+1} 은 현재 시점 시간, Δt 는 측정 시간 간격, q^{i+1} 은 예측된 열원 벡터, Y^{i+1} 은 측정 온도 벡터, T^{i+1} 은 예측된 전체 온도 벡터(온도센서 구비 지점 외의 온도 포함)를 의미한다. 또한, $\bar{T}_s^{i+1}$ 은 T_s^i 를 q^i 로 일정하게 가열했을 때 온도센서 구비 지점의 가상 온도 벡터이며, 온도센서가 1개인 경우에는 상수가 된다. 그리고, X_s^{i+1} 은 센서 위치의 민감도 계수 행렬이며 아래의 (수식2)로 정의된다.

[0034] (수식2)

$$[0035] X_s^{i+1} = \frac{\partial T_s^{i+1}}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1^{i+1}}{\partial q_1} & \frac{\partial T_1^{i+1}}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial T_1^{i+1}}{\partial q_M} \\ \frac{\partial T_2^{i+1}}{\partial q_1} & \frac{\partial T_2^{i+1}}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial T_2^{i+1}}{\partial q_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial T_N^{i+1}}{\partial q_1} & \frac{\partial T_N^{i+1}}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial T_N^{i+1}}{\partial q_M} \end{bmatrix}$$

[0036] 여기서, N은 각각 사용된 센서의 개수에 대응되고, M은 공간적으로 분해된 가열기의 개수에 대응된다. 예를 들

어, 3개의 센서와 100개의 가열기가 사용된다면, X_s^{i+1} 은 3×100 의 행렬이 된다. X^{i+1} 도 같은 방식으로 정의되며, 열의 개수는 M으로 동일하지만, 행의 개수는 후술할 수치모델의 전체 자유도와 같다. 예를 들어, 수치모델 구축단계에서 구축된 웨이퍼의 수치모델의 자유도가 100이라면, X^{i+1} 는 100×100 행렬이 된다.

- [0037] 이하에서는 본 발명에 따른 온도분포 예측방법의 각 단계에 대하여 상세히 설명한다.
- [0038] 먼저, 웨이퍼의 열적 거동을 표현할 열전달 모델이 구축되어야 하는데, 수치모델 구축단계(S100)에서는 기관의 형상 및 열적 거동에 대한 수치모델을 구축한다. RTP 공정을 거치는 웨이퍼는 일반적으로 박막이기 때문에 2D 수치모델 구축이 합리적이지만, 이에 한정되지 않는다.
- [0039] 수치모델의 구축은 유한요소법(Finite Element Method), 유한차분법(Finite Difference Method), 경계요소법(Boundary Element Method) 등의 다양한 기술이 사용될 수 있다.
- [0040] 수치해석 기법은 어떤 현상을 지배하는 법칙과 조건을 수학적으로 모델링하고, 근사해(approximate solution)를 구하기 위해 답을 보간함수(interpolation function)의 조합으로 표현한 뒤 각 기저함수의 크기를 계산한다. 이때, 기본적으로 수학적 표현을 기저함수(basis function)의 계수를 계산하기 위한 행렬 방정식으로 전환하게 되며, 기저함수의 정의 방식에 따라 수치해석 기법의 종류가 결정된다.
- [0041] 예를 들어, 유한요소법은 기저함수의 체계적 정의를 위하여, 대상이 되는 물체, 즉, 웨이퍼의 공간상의 영역을 유한 요소(finite element)라 불리는 소영역으로 나누어 수치해석을 수행한다.
- [0042] 유한차분법은 미분방정식을 자연현상의 대상이 되는 기하학적 영역 내에서 수치적분(numerical integration)을 취해 행렬방정식을 유도하는데, 기하학적 영역 내에 생성된 유한개의 점들을 격자(grid)라 부르고 격자의 조밀도에 따라 근사해의 정확도가 향상된다.
- [0043] 경계요소법은 미분방정식 형태의 수학적 표현식과 그린함수(green function)라 불리는 핵함수(kernel function)의 곱을 대상물체의 전체 영역에 걸쳐 적분을 취한다. 이후, 그린의 정리(green theorem)에 따라 영역 전체에 대한 적분을 물체의 경계에 따른 경계적분(boundary integral) 형식으로 변환하고, 경계 조건(boundary condition)을 적용하는 방식으로 수치해석을 수행한다.
- [0044] 수치모델 구축단계(S100)는 위에서 설명한 것 외의 다양한 방식의 수치해석 기법을 이용할 수 있으며, 본 발명의 권리범위는 어느 특정 수치모델 기법에 한정되지 않는다.
- [0045] 안정기 파라미터 설정 단계(S110)는 온도센서에 의해 측정된 상기 기관의 측정온도의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정한다. 위의 (수식1)에서 α 는 안정기의 성능을 결정하는 변수이다. 안정기 파라미터는 시스템에 사용되는 온도센서의 노이즈에 대한 안정성(stability)을 보장하기 위해 필요하다. 즉, 안정기 파라미터인 α 값은 센서의 개수, 위치, 웨이퍼의 열확산도(thermal diffusivity), 챔버의 성능에 의해서 결정되는 값인데, 패널티를 주어 측정 오차로 인한 (수식1)의 불안정성을 억제하는 역할을 하기 때문에, 적절한 값을 입력하는 것이 중요하다.
- [0046] α 값을 설정하는 방법은, ①초기 장비 생산시 한주기의 프로세싱을 거친 웨이퍼의 시간에 따른 온도정보를 수집하는 단계, ②수집한 온도를 후처리로 필터링(filtering)하여 노이즈가 제거된 필터링 데이터로 변환하는 단계, ③상기 (수식1)에서 α 값을 변화시키면서 필터링 데이터와 최소제곱오차(Least Square Error)가 최소가 되는 α 값을 결정하는 단계로 이루어진다.
- [0047] α 값은 센서와 챔버의 성능에 의하여 결정되므로, 장비의 노화에 따라 측정 노이즈가 증가하므로 장비 노화에 대한 대비가 필요하다. 즉, 장비가 작동되는 동안 연산장치의 메모리에 일정 주기의 온도 데이터(정보)를 수집하고, 노이즈의 증가량을 관측한다. 이때, 노이즈의 증가량은 교차검증(Generalized Cross Validation) 등의 기법을 활용하여 관측될 수 있고, 노이즈의 증가량에 따라 상기 방법으로 α 값의 교정을 수행할 수 있다. 안정기의 자동 교정으로 인하여 누구나 쉽게 장비를 사용하고, 유지/관리할 수 있게 된다. 정리하면, 안정기의 자동 교정 방법은 ①최초 테스트 구동시의 온도 데이터에 기초하여 최초 안정기 파라미터를 설정하는 단계, ②열처리가 수행되는 동안 메모리에 저장된 온도 데이터에 기초하여 소정 주기로 안정기 파라미터의 교정값을 연산하는

단계, ③교정값을 안정기 파라미터로 설정하는 단계로 이루어질 수 있다.

[0048] 민감도 계수 행렬 생성단계(S120)는 복수의 가열기로부터 상기 기관이 받은 열원을 예측한다. 민감도 계수 행렬 생성단계(S120)에서는 상기 (수식2)의 X^{i+1} 과 X_s^{i+1} 을 입력받는 단계이다. X_s^{i+1} 는 가열기로부터 웨이퍼에 도달한 열원을 계산하기 위해 사용되며, 계산된 열원과 X^{i+1} 로 전체 온도분포를 예측한다.

[0049] 예측된 전체 온도분포가 유일하게 존재하기 위해서는 X_s^{i+1} 의 열과 행의 수가 같거나, 열보다 행의 수가 많아야 하는데, 이는 가열기의 수보다 센서의 수가 많아야 함을 의미한다. 일반적으로는 센서의 수보다 공간적으로 분해된 가열기의 수가 더 많기 때문에 위의 조건을 보장할 수 있는 방법이 필요하며, 그렇지 못한 경우 수학적으로 ill-posed problem이 되어 유일하지 않은 여러 개의 해가 존재하는 결과를 야기한다. 본 발명은 민감도 계수 행렬 응축단계(S130)를 통해 이 문제를 해결한다.

[0050] 민감도 계수 행렬 응축단계(S130)는 가열기 각각에 입력되는 전력 비율 정보에 기초하여 민감도 계수 행렬을 응축한다. 각각의 가열기로 입력되는 전력비를 이용하면 위의 (수식2)를 아래의 (수식3)으로 다시 적을 수 있다.

[0051] (수식3)

[0052]
$$X_s^{i+1} = [X_{s1}^{i+1} X_{s2}^{i+1} \dots X_{sM}^{i+1}]$$
,

[0053]
$$\tilde{X}_s^{i+1} = \frac{q_1}{q_1} X_{s1}^{i+1} + \frac{q_2}{q_1} X_{s2}^{i+1} + \dots + \frac{q_M}{q_1} X_{sM}^{i+1}$$

[0054] 여기서, $\tilde{X}_s^{i+1}$ 는 전력비를 이용하여 응축한 민감도 계수 벡터를 의미한다. 예를 들어, 3개의 센서를 사용하는 경우에는 3×1 벡터가 된다. 행의 수가 열의 수보다 크기 때문에 유일한 해가 보장될 수 있으며, 이에 의하여 위에서 언급한 문제점이 해소된다. (수식3)을 이용하여 1번 가열기의 열원만 계산하지만, 전력비를 이용하여 나머지 가열기의 열원도 복원이 가능해진다. 즉, 민감도 계수행렬의 응축 구성을 통하여 본 발명은 단 1개의 온도센서를 통해 획득된 극소수의 온도 데이터만으로도 다수의 열원을 복원시킬 수 있게 된다.

[0055] 따라서, 민감도 계수 행렬 응축단계(S130)는 가열기 컨트롤러가 각 가열기의 전력비 정보를 산출하는 단계를 포함할 수 있다. 가열기 컨트롤러에 의하여 산출된 전력비 정보에 기초하여, 위와 같이 응축된 민감도 계수 행렬을 도출할 수 있게 된다.

[0056] 전체 온도분포 예측단계(S140)는 소정의 온도 데이터가 입력되면, 수치모델, 안정기 파라미터 및 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 기관의 전체 온도분포를 예측한다. 구체적으로, 복수의 가열기 중 일부의 열원만 연산하고, 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 나머지 열원을 복원함으로써 전체 온도분포를 획득할 수 있게 된다.

[0057] 도 3은 본 발명에 따른 온도분포 예측장치를 나타내는 개략도이다. 도 3에 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 온도분포 예측장치는 가열기(110), 온도센서부(120), 연산부(130) 및 가열기 컨트롤러(140)를 포함한다.

[0058] 가열기(110)는 열처리 대상 기관(W)에 열원을 공급한다. 가열기(110)는 복수 개로 구비될 수 있고, 적외선 복사광선을 발생시키는 할로젠 램프나 텅스텐 할로젠 램프 등으로 구현될 수 있지만, 이에 한정되지 않는다.

[0059] 온도센서부(120)는 복수의 가열기(110)에 의해 변화하는 기관(W)의 온도를 측정한다. 온도센서(120)는 측정용 온도센서(120a)와 검증용 온도센서(120b)를 포함할 수 있다. 측정용 온도센서(120a)와 검증용 온도센서(120b)는 접촉 방식 또는 비접촉 방식의 다양한 온도센서를 이용할 수 있다.

[0060] 연산부(130)는 온도센서부(120)로부터 소정의 온도 데이터가 입력되면 기관의 전체 온도분포를 예측한다. 연산부(130)는 수치모델 구축부, 파라미터 설정부, 행렬 생성부 및 예측부를 포함한다. 각 구성은 연산부(130)의 별개 기능을 구성으로 표현한 것일 뿐, 반드시 물리적으로 분리된 구성임을 요하지 않는다.

[0061] 수치모델 구축부는 기관의 형상 및 열적 거동에 대한 수치모델을 구축한다. 이와 관련해서는 본 발명에 따른 온도분포 예측방법의 수치모델 구축단계(S100)와 관련하여 설명한 바와 같으므로 중복 설명은 생략한다.

[0062] 파라미터 설정부는 온도센서부에 의해 측정된 기관의 측정온도의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터인 (수식

2)의 α 값을 설정한다. 이와 관련해서는 본 발명에 따른 온도분포 예측방법의 안정기 파라미터 설정 단계(S110)와 관련하여 설명한 바와 같으므로 중복 설명은 생략한다.

[0063] 행렬 생성부는 복수의 가열기로부터 상기 기관이 받은 열원을 예측하는 민감도 계수 행렬을 생성하고, 가열기 각각에 입력되는 전력비에 기초하여 민감도 계수 행렬을 응축한다. 이와 관련해서는 본 발명에 따른 온도분포 예측방법의 민감도 계수 행렬 생성단계(S120) 및 민감도 계수 행렬 응축단계(S130)와 관련하여 설명한 바와 같으므로 중복 설명은 생략한다.

[0064] 예측부는 소정의 온도 데이터가 입력되면, 수치모델 구축부에 의하여 구축된 수치모델, 파라미터 설정부에서 설정된 안정기 파라미터 및 행렬 생성부에서 생성된 응축 민감도 계수 행렬에 기초하여 상기 기관의 전체 온도분포를 예측한다. 이와 관련해서는 본 발명에 따른 온도분포 예측방법의 전체 온도분포 예측단계(S140)와 관련하여 설명한 바와 같으므로 중복 설명은 생략한다.

[0065] 한편, 가열기 컨트롤러(140)는 응축된 민감도 계수 행렬을 생성하기 위해 기초가 되는 복수의 가열기 각각의 전력비 정보를 산출한다. 이에 따라, 가열기에 비해 상대적으로 적은 수의 온도센서를 이용함에도 불구하고, 행렬 생성부는 전체 온도분포의 예측에 있어서 유일한 해를 도출할 수 있게 된다.

[0066] 즉, 복수의 가열기 중 1개 혹은 일부의 열원만 연산해도 응축된 민감도 계수 행렬에 기초하여 나머지 열원을 복원할 수 있게 된다.

[0067] 한편, 측정용 온도센서(120a)에서 측정된 소정의 온도 데이터를 이용하여 예측된 전체 온도분포와 검증용 온도센서(120b)를 이용하여 측정된 온도 데이터를 실시간으로 비교하는 모니터부를 더 포함할 수 있다.

[0068] 본 발명에 따른 온도분포 예측장치에 의하면, 열전대 또는 고온계에 무관하게 단 하나만으로도 전체 온도분포의 예측이 가능하며, 센서 개수를 변형하여 정밀도를 조절할 수 있다. 즉, 센서의 개수가 증가하면 정밀도가 향상될 수 있다.

[0069] 또한, 본 발명에 따른 온도분포 예측장치에 의하면, 모니터부를 통하여 현재 장비의 상태를 관측할 수 있다. 구체적으로, 온도분포 예측을 위해 사용되는 측정용 온도센서 외에 검증용 온도센서를 임의의 위치에 부착하고, 예측된 온도 데이터와 검증용 온도 데이터를 비교함으로써 현재 장비의 상태를 판단할 수 있게 된다. 도 4는 본 발명에 따른 온도분포 예측장치를 이용한 모니터링 방법을 나타내는 흐름도이다.

[0070] 도 4에 도시된 바와 같이, 먼저 공정 데이터를 초기화한다(S200). 이후, 측정용 온도센서에 의한 챔버 내 웨이퍼 물리 온도 데이터를 수집하며(S210), 위에서 설명한 바와 같이 소정 목표값에 도달하기 위한 변수(파라미터)를 설정한다(S220). 가열기 컨트롤러(140)는 설정된 변수에 기초하여 가열기(110)를 제어한다(S230).

[0071] 이후, 동일 위치에서 측정용 온도센서(120a)를 이용하여 예측된 온도 데이터와 검증용 온도센서(120b)에서 측정된 온도 데이터를 비교하는 실시간 모니터링을 수행한다(S240). 위의 각 단계를 반복한 뒤 목표값 도달시 공정을 종료한다(S250).

[0072] 본 발명에 따른 온도분포 예측방법 및 온도분포 예측장치에 의하면, 디지털 트윈 기술을 활용하여 점 측정된 온도 데이터를 가공하여 온도 분포 예측이 가능해지므로, 다수의 온도 센서를 대체하여 예측 비용 절감 효과를 기대할 수 있다. 또한, 온도분포 정보는 가열기를 더욱 정밀하게 제어하기 위한 필수적인 정보가 될 뿐만 아니라, 기관의 온도 균일도를 엄격하게 계산할 수 있는 근거가 되므로, 제조되는 반도체 장치의 품질 및 수율을 향상시키는 기술적 효과를 도모할 수 있다.

[0073] 한편, 본 발명에 따른 디지털 트윈 기반의 온도분포 예측방법은 컴퓨터 시스템 상에서 구현될 수 있고, 하나 이상의 컴퓨터로 구성된 시스템은 소프트웨어, 펌웨어, 하드웨어 또는 이들의 조합을 작동중 시스템이 작업들을 수행하도록 하는 시스템에 설치함으로써 위에서 설명한 방법의 각 단계를 수행하도록 구성될 수 있다. 하나 이상의 컴퓨터 프로그램은 데이터 처리 장치에 의해 실행될 때 장치로 하여금 동작들을 수행하게 하는 명령어들을 포함함으로써 특정 동작들 또는 작업들을 수행하도록 구성될 수 있다.

[0074] 한편, 위에서 설명한 디지털 트윈 기반의 온도분포 예측방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프

와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상기된 하드웨어 장치는 본 발명의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

[0075] 이상에서 실시예들에 설명된 특징, 구조, 효과 등은 본 발명의 하나 의 실시예에 포함되며, 반드시 하나의 실시예에만 한정되는 것은 아니다. 나아가, 각 실시예에서 예시된 특징, 구조, 효과 등은 실시예들이 속하는 분야의 통상의 지식을 가지는 자에 의해 다른 실시예들에 대해서도 조합 또는 변형되어 실시 가능하다. 따라서 이러한 조합과 변형에 관계된 내용들은 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

[0076] W: 기판(웨이퍼)

110: 가열기

120: 온도센서부

120a: 측정용 온도센서

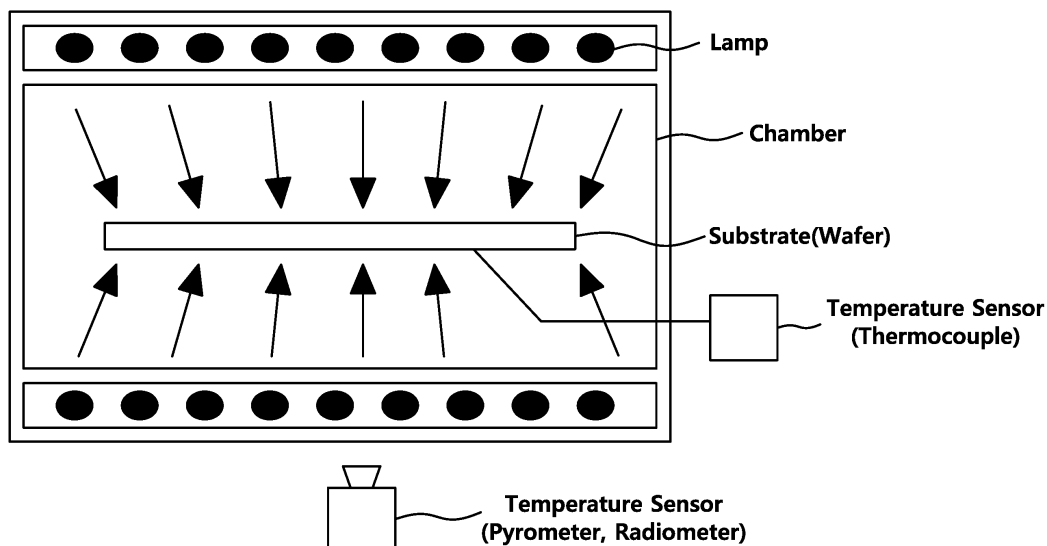
120b: 검증용 온도센서

130: 연산부

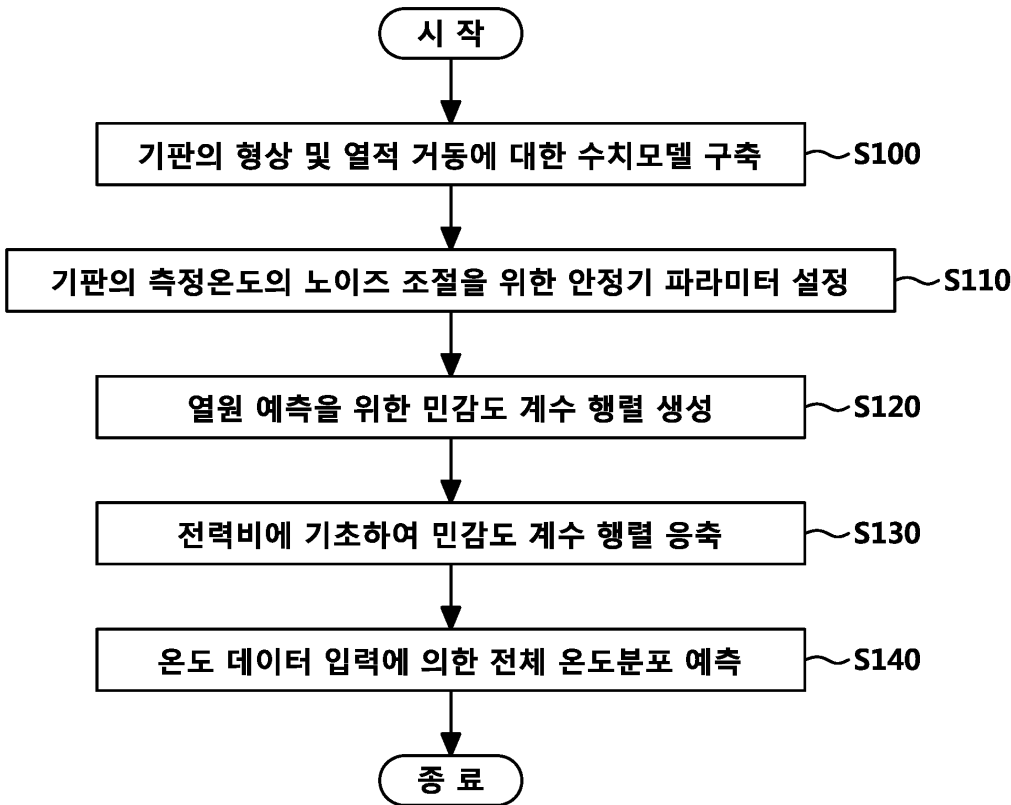
140: 가열기 컨트롤러

도면

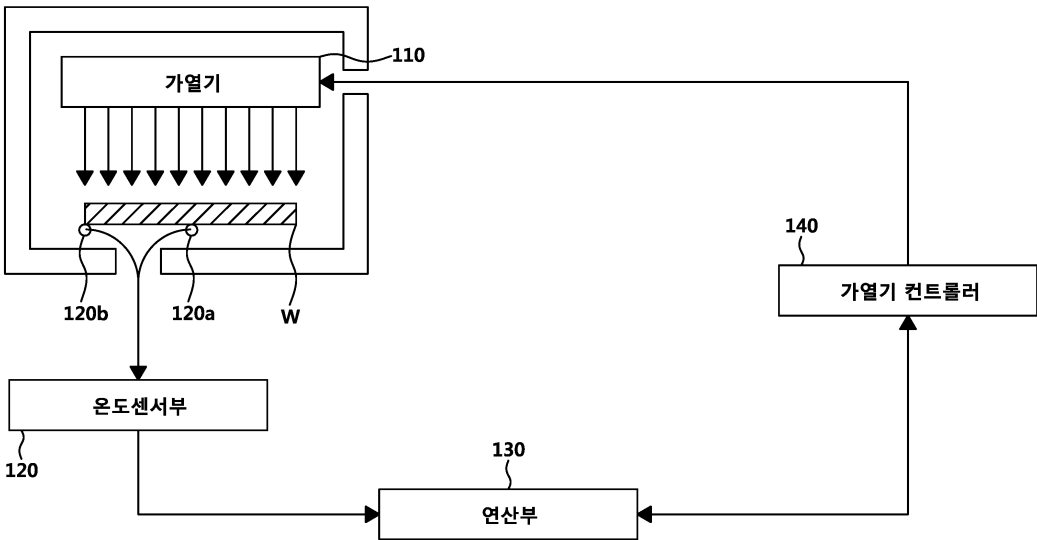
도면1



도면2



도면3



도면4

