



등록특허 10-2765386



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2025년02월07일  
(11) 등록번호 10-2765386  
(24) 등록일자 2025년02월05일

- (51) 국제특허분류 (Int. Cl.)  
*H01L 21/3065* (2006.01) *H01L 21/3213*  
(2006.01)  
*H01L 21/67* (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
*H01L 21/3065* (2013.01)  
*H01L 21/31116* (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2017-0017259
- (22) 출원일자 2017년02월08일  
심사청구일자 2022년01월25일
- (65) 공개번호 10-2017-0094094
- (43) 공개일자 2017년08월17일
- (30) 우선권주장  
15/018,708 2016년02월08일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌  
JP2004253516 A  
(뒷면에 계속)

전체 청구항 수 : 총 29 항

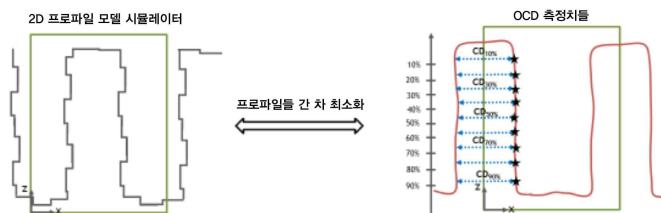
심사관 : 김학규

(54) 발명의 명칭 반사율 스펙트럼 매칭 및 표면 운동 모델 최적화에 의한 에칭 프로파일 최적화를 위한 방법들 및 장치들

### (57) 요 약

독립적인 입력 파라미터들의 세트 (a)에 반도체 기판 상의 피처의 에칭 프로파일을 관리시키는 컴퓨터 모델을 복수의 모델 파라미터들 (b)의 사용을 통해 최적화하는 방법들이 개시된다. 일부 실시예들에서, 방법들은 모델로부터 생성된 계산된 반사율 스펙트럼과 하나 이상의 a의 값들의 세트들에 대해 대응하는 실험적인 반사율 스펙트럼 간의 차들을 나타내는 메트릭을 감소시키도록 하나 이상의 b의 값들을 변경하는 단계를 포함할 수도 있다. 일부 실시예들에서, 메트릭을 계산하는 단계는 계산된 대응하는 실험적 반사율 스펙트럼을 감소된-치수의 부분 공간 (subspace) 상으로 사영하는 (projecting) 동작 및 부분 공간 상으로 사영될 때 반사율 스펙트럼 간의 차를 계산하는 동작을 포함할 수도 있다. 또한 이러한 최적화된 컴퓨터 모델들을 구현하는 에칭 시스템들이 개시된다.

### 대 표 도



도 1

도 2

(52) CPC특허분류  
*H01L 21/32136* (2013.01)  
*H01L 21/67069* (2013.01)

(72) 발명자  
**베일리 3세 앤드류 디.**  
미국, 캘리포니아 94588, 플레즌튼, 세이지우드 코트 3363

**페터슨 알렉스**  
미국, 캘리포니아 95120, 산호세, 별우드 드라이브 1008

**고트초 리차드 에이.**  
미국, 캘리포니아 94566, 플레즌튼, 캐슬우드 드라이브 18

---

(56) 선행기술조사문현  
KR1020120139802 A  
KR1020170074772 A  
US20030118917 A1  
US20150079500 A1  
JP2005277361 A

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

독립 입력 파라미터들의 세트에 반도체 기판들 상의 피쳐들의 예칭 프로파일들을 관련시키는 컴퓨터 모델을 최적화하는 컴퓨터 구현된 방법에 있어서,

(a) 최적화될 하나 이상의 모델 파라미터들에 대한 값들을 식별하는 단계로서, 상기 모델 파라미터들은 상기 컴퓨터 모델 실행에 사용되는, 상기 식별 단계;

(b) 독립 입력 파라미터들의 세트의 값들을 사용하여 수행된 실험 예칭 프로세스를 사용하여 예칭된 하나 이상의 반도체 기판들의 광학적 측정치들로부터 생성된 실험 반사율 스펙트럼을 수신하는 단계;

(c) 컴퓨터 프로세서를 사용하여, 상기 단계 (b)에서 명시된 상기 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 값들 및 상기 단계 (a)에서 식별된 상기 모델 파라미터들의 값들을 사용하여 상기 컴퓨터 모델을 실행함으로써 계산된 반사율 스펙트럼을 생성하는 단계; 및

(d) 컴퓨터 프로세서를 사용하여, 상기 독립 입력 파라미터들의 세트의 상기 값들에 대해 상기 단계 (b)에서 수신된 상기 실험 반사율 스펙트럼과 상기 단계 (c)에서 생성된 대응하는 계산된 반사율 스펙트럼 사이의 차들을 나타내는 메트릭 (metric)을 감소시키도록 상기 단계 (a)에서 식별된 상기 하나 이상의 모델 파라미터들의 값들을 수정하고, 상기 하나 이상의 모델 파라미터들의 상기 수정된 값들로 상기 단계 (c)를 반복하여, 반도체 기판들 상의 피쳐들의 예칭 프로파일들을 상기 독립 입력 파라미터들의 세트에 관련시키는 상기 컴퓨터 모델에서 사용하기 위한 상기 하나 이상의 모델 파라미터들에 대한 수정된 값들을 생성하는 단계를 포함하는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 계산된 반사율 스펙트럼 중 적어도 일부는,

(i) 상기 모델을 사용하여 일련의 예칭 프로파일 좌표들에 의해 나타낸 계산된 예칭 프로파일을 생성하는 프로세스; 및

(ii) 상기 프로세스 (i)에서 생성된 상기 계산된 예칭 프로파일로부터, 상기 계산된 예칭 프로파일로부터 전자기 복사의 반사를 시뮬레이팅함으로써 계산된 반사율 스펙트럼을 생성하는 프로세스에 의해 생성되는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 단계 (b)에서 수신된 상기 실험 반사율 스펙트럼은 예칭 프로세스들의 상이한 지속기간들을 나타내는 예칭 시간들의 시퀀스에 대응하는 반사율 스펙트럼을 포함하고, 그리고

상기 단계 (c)에서 생성된 상기 계산된 반사율 스펙트럼은 상기 단계 (b)의 상기 예칭 시간들의 시퀀스에 대응하도록 상기 모델로부터 계산된 반사율 스펙트럼을 포함하는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 4

제 3 항에 있어서,

상기 실험 반사율 스펙트럼은 상기 예칭 시간들의 시퀀스의 진행하는 예칭 프로세스를 동안 취해진 광학적 측정치들로부터 상기 단계 (b)에서 수신되는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 예칭 시간들의 시퀀스의 적어도 일부에 대해 연속하는 예칭 시간들은 0.01 내지 1 초로 분리되는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 6

제 4 항에 있어서,

상기 단계 (b)에서 수신된 상기 실험 반사율 스펙트럼의 적어도 일부는 다양한 지속기간들의 기판 예칭 프로세스들에 대해, 그리고 기판 예칭 프로세스들의 종료 후 취해진 광학적 측정치들과의 비교에 기초하여 조정되는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 다양한 지속기간의 상기 종료된 예칭 프로세스들에 대응하는 상기 광학적 측정치들은 상기 대응하는 예칭된 기판들이 예칭되는 프로세싱 챔버들로부터 제거된 후 취해지는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 단계 (d)를 반복하는 단계를 더 포함하는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 하나 이상의 모델 파라미터들에 대한 여러의 실질적으로 국부적인 최소값이 획득될 때까지 상기 단계 (d)를 더 반복하는 단계를 더 포함하는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 10

제 1 항에 있어서,

상기 컴퓨터 모델은 시간의 함수로서 상기 반도체 기판 상의 상기 피처의 상기 예칭 프로파일을 나타내는 점들의 그리드에서 국부적인 예칭 레이트들을 연산하는 (calculate), 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 하나 이상의 모델 파라미터들은 반응 레이트 상수들, 반응물질 부착 계수들, 생성물 부착 계수들, 반응물질 확산 상수들, 및/또는 생성물 확산 상수들을 포함하는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 12

제 1 항에 있어서,

PCA를 수행함으로써 상기 독립 입력 파라미터들의 세트를 식별하는 단계를 더 포함하는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 13

제 12 항에 있어서,

상기 PCA는 독립 입력 파라미터들 및 대응하는 측정된 예칭 프로파일들의 연관된 벡터들에 대해 수행되는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 14

제 1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 모델 파라미터들의 상기 수정된 값들과 상기 컴퓨터 모델을 사용하여 결정된 예칭 조건들의 세트를 사용하거나 조정하여 반도체 기판을 예칭하는 단계를 더 포함하는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 15

제 1 항에 있어서,

상기 컴퓨터 모델은 예칭 프로세스 파라미터들의 전개를 인에이블하고, 상기 컴퓨터 모델은 상기 단계 (d)에서 생성된 바와 같이, 상기 하나 이상의 모델 파라미터들에 대해 상기 수정된 값들로 최적화되는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 16

제 1 항에 있어서,

상기 컴퓨터 모델은 예칭 프로세스들에 대해 리소그래피 마스크들의 현상을 인에이블하고, 상기 컴퓨터 모델은 상기 단계 (d)에서 생성된 바와 같이, 상기 하나 이상의 모델 파라미터들에 대해 상기 수정된 값들로 최적화되는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 17

컴퓨터 모델을 인코딩하는 컴퓨터 실행가능 인스트럭션들이 제공되는, 비일시적인 컴퓨터 관독가능 매체를 포함하는 최적화된 컴퓨터 모델에 있어서, 상기 컴퓨터 모델은 반도체 기판들 상의 피처들의 예칭 프로파일들을 하나 이상의 모델 파라미터들에 대해 수정된 값들로 구성되는 독립 입력 파라미터들의 세트와 관련시키고,

상기 컴퓨터 모델은 제 1 항에 기재된 상기 단계 (a) 내지 상기 단계 (d)에 의해 최적화되는, 최적화된 컴퓨터 모델.

#### 청구항 18

제 17 항에 있어서,

상기 컴퓨터 실행가능 인스트럭션들은 예칭 프로세스들에 대해 리소그래피 마스크들을 현상하기 위한 인스트럭션들을 더 포함하는, 최적화된 컴퓨터 모델.

#### 청구항 19

제 17 항에 있어서,

상기 컴퓨터 실행가능 인스트럭션들은 예칭 프로세스 파라미터들을 전개하기 위한 인스트럭션들을 더 포함하는, 최적화된 컴퓨터 모델.

#### 청구항 20

예칭 프로세스에 의해 반도체 기판 상의 피처가 예칭된 후 상기 반도체 기판 상의 상기 피처의 프로파일을 근사적으로 결정하는 컴퓨터 구현된 방법에 있어서,

예칭 프로세스에 대응하는 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 테스트 값들을 명시하는 단계; 및

컴퓨터 프로세서에 의해, 상기 독립 입력 파라미터들의 세트에 대해 상기 명시된 테스트 값들과 제 17 항에 기재된 최적화된 컴퓨터 모델을 사용하여 예칭 프로파일을 생성하는 단계를 포함하는, 컴퓨터 구현된 방법.

#### 청구항 21

반도체 기판 상의 피처가 예칭 프로세스에 의해 예칭된 후 상기 반도체 기판 상의 상기 피처의 목표된 예칭 프로파일을 근사적으로 산출할 상기 예칭 프로세스에 대해 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 값들의 세트를 결정하는 방법에 있어서,

- (a) 예칭 프로세스에 대응하는 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 테스트 값들을 명시하는 단계;
- (b) 상기 독립 입력 파라미터들에 대해 상기 명시된 테스트 값들의 세트와 제 17 항에 기재된 최적화된 컴퓨터 모델을 사용하여 계산된 예칭 프로파일을 생성하는 단계;

(c) 상기 목표된 예칭 프로파일과 상기 계산된 예칭 프로파일 간의 차를 나타내는 메트릭 (metric) 을 계산하는 단계; 및

(d) 상기 단계 (b) 및 상기 단계 (c) 를 반복함으로써 확인될 때 상기 목표된 예칭 프로파일과 상기 계산된 예칭 프로파일 간의 상기 차를 감소시키도록 상기 단계 (a) 에 명시된 상기 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 하나 이상의 값들을 수정하는 단계를 포함하는, 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 값들의 세트를 결정하는 방법.

### 청구항 22

제 21 항에 있어서,

(e) 상기 단계 (d) 에서 선택된 상기 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 상기 값들에 대해 여러의 실질적으로 국부적인 최소값이 획득될 때까지 상기 단계 (d) 를 반복하는 단계를 더 포함하는, 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 값들의 세트를 결정하는 방법.

### 청구항 23

반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템에 있어서,

반도체 기판들을 예칭하기 위한 예칭기 장치로서, 상기 예칭기 장치의 동작은 독립 입력 파라미터들의 세트에 의해 조정되는, 상기 예칭기 장치; 및

상기 예칭기 장치의 상기 동작을 제어하기 위한 제어기로서, 상기 제어기는 프로세서 및 메모리를 포함하는, 상기 제어기를 포함하고,

상기 메모리는 제 1 항에 기재된 상기 단계 (a) 내지 상기 단계 (d) 에 의해 최적화된 예칭된 피쳐 프로파일 모델을 저장하고, 그리고

상기 프로세서는 상기 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 값들의 세트로부터 예칭된 피쳐 프로파일을 계산하도록 상기 메모리에 저장된 상기 예칭된 피쳐 프로파일 모델을 사용하도록 구성되는, 반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템.

### 청구항 24

제 23 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 계산된 예칭된 피쳐 프로파일에 응답하여 상기 독립 입력 파라미터들의 세트의 하나 이상의 값들을 가변시킴으로써 상기 예칭기 장치의 상기 동작을 조정하는, 반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템.

### 청구항 25

제 24 항에 있어서,

상기 독립 입력 파라미터들의 세트의 값들이 상기 계산된 예칭된 피쳐 프로파일에 응답하여 가변되는, 상기 독립 입력 파라미터들의 세트는 RF 플라즈마 주파수 및 RF 플라즈마 전력 레벨로부터 선택된 하나 이상의 파라미터들을 포함하는, 반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템.

### 청구항 26

제 23 항에 있어서,

상기 예칭기 장치는,

프로세싱 챔버;

상기 프로세싱 챔버 내에 기판을 홀딩하기 위한 기판 홀더;

상기 프로세싱 챔버 내에서 플라즈마를 생성하기 위한 플라즈마 생성기로서, 상기 플라즈마 생성기는 RF 전력 공급부를 포함하는, 상기 플라즈마 생성기;

상기 프로세싱 챔버 내로 하나 이상의 프로세스 가스들을 흘리기 위한 하나 이상의 밸브-제어된 프로세스 가스

유입부들; 및

상기 프로세싱 챔버로부터 가스들을 배기하기 위한 하나 이상의 진공 펌프들에 유체적으로 연결된 하나 이상의 가스 유출부들을 포함하는, 반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템.

### 청구항 27

제 26 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 계산된 예칭된 피쳐 프로파일에 응답하여 상기 프로세싱 챔버 내의 상기 플라즈마의 특성을 개질하도록 상기 RF 전력 공급부의 주파수 및/또는 전력 레벨을 조정하도록 구성되는, 반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템.

### 청구항 28

제 26 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 계산된 예칭된 피쳐 프로파일에 응답하여 상기 프로세싱 챔버 내로의 하나 이상의 프로세스 가스들의 플로우 레이트들을 조정하도록 상기 하나 이상의 밸브-제어된 프로세스 가스 유입부들을 동작시키도록 구성되는, 반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템.

### 청구항 29

제 26 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 계산된 예칭된 피쳐 프로파일에 응답하여 상기 프로세싱 챔버 내의 온도 및/또는 압력을 조정하도록 구성되는, 반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템.

### 청구항 30

삭제

### 청구항 31

삭제

### 청구항 32

삭제

### 청구항 33

삭제

### 청구항 34

삭제

## 발명의 설명

### 배경 기술

[0001] 플라즈마-보조된 예칭 프로세싱의 성능은 종종 반도체 프로세싱 워크플로우의 성공에 중요하다. 그러나, 예칭 프로세싱을 최적화하는 것은 어렵고 시간 소모적일 수 있으며, 종종 프로세스 엔지니어가 목표된 타깃 피쳐 프로파일을 생성하도록 시도하는 임시 방편적인 (ad hoc) 방식에서 예칭 프로세스 파라미터들을 수동으로 조정하는 (tweaking) 것을 수반한다. 현재 단순히 미리 결정된 목표된 예칭 프로파일을 발생할 프로세싱 파라미터들의 값들을 결정하기 위해 프로세싱 엔지니어들이 신뢰할 수도 있는 충분한 정확도의 자동화된 절차가 없다.

[0002] 일부 모델은 예칭 프로세스들 중에 반도체 기판 표면에서 발생하는 물리적 화학 프로세스들을 시뮬레이션하려고 시도한다. 예들은 M. Kushner와 동료들의 예칭 프로파일 모델뿐만 아니라 Cooperberg 및 동료의 예칭 프로파일 모델도 포함한다. 전자는 Y. Zhang, "Low Temperature Plasma Etching Control through Ion Energy Angular Distribution and 3-Dimensional Profile Simulation", Chapter 3, dissertation, University of Michigan

(2015)에 기술되고, 후자는 Cooperberg, Vahedi 및 Gottscho의, "Semiempirical profile simulation of aluminum etching in  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$  plasma", J. Vac. Sci. Technol. A 20 (5), 1536 (2002)에 기술되어 있으며, 이들 각각은 모든 목적을 위해 그 전체가 참고 문헌으로 본 명세서에 인용된다. M. Kushner 및 동료들의 에칭 프로파일 모델에 대한 추가 기술은 J. Vac. Sci. Technol. A 15 (10), 1913 (1997), J. Vac. Sci. Technol. B 16 (10), 2102 (1998), J. Vac. Sci. Technol. A 16 (9), 3274 (1998), J. Vac. Sci. Technol. A 19 (2), 524 (2001), J. Vac. Sci. Technol. A 22 (10), 1242 (2004), J. Appl. Phys. 97, 023307 (2005)에 기재되어 있으며, 이들 각각은 또한 모든 목적을 위해 그 전체가 본 명세서에 참조로서 인용된다. 이러한 모델들을 개발하기 위해 수행된 광범위한 작업에도 불구하고 반도체 프로세싱 산업에서 상당한 사용을 발견하기에 목표된 정확성과 신뢰성을 아직 갖고 있지 않다.

### 발명의 내용

[0003]

독립 입력 파라미터들의 세트 (A)에 반도체 기판 상의 피처의 에칭 프로파일을 관련시키는 컴퓨터 모델을 복수의 모델 파라미터들 (B)의 사용을 통해 최적화하는 방법들이 개시된다. 방법들은 최적화될 모델 파라미터들 (B)의 선택된 세트에 대한 값들의 세트를 식별하는 단계; 및 최적화할 선택된 독립 입력 파라미터들의 세트 (A)에 대한 복수의 값들의 세트들을 식별하는 단계를 포함할 수도 있다. 이어서, (A)의 값들의 세트 각각에 대해, 방법들은 (A)의 명시된 값들의 세트를 사용하여 수행된 실험 에칭 프로세스의 광학적 측정치로부터 생성된 실험 반사율 스펙트럼을 수신하는 단계, 및 또한 (A) 및 (B)의 값들의 세트를 사용하여 모델로부터 계산된 (computed) 반사율 스펙트럼을 생성하는 단계를 더 포함할 수도 있다. 이러한 특정한 실시예들에서, 방법들은 (B)의 하나 이상의 값들을 수정하고 실험 반사율 스펙트럼과 (A)의 하나 이상의 값들의 세트들에 대하여 대응하는 계산된 반사율 스펙트럼 간의 차들을 나타내는 메트릭을 감소시키도록 (B)의 수정된 값들의 세트를 이제 사용하여 모델로부터 계산된 반사율 스펙트럼의 생성을 반복하는 단계를 더 포함할 수도 있다.

[0004]

일부 실시예들에서, 메트릭을 연산하는 (calculate) 단계는, 계산된 반사율 스펙트럼과 대응하는 실험 반사율 스펙트럼 간의 차들을 연산하는 동작 및 감소된-치수의 부분 공간 (subspace) 상으로 차들을 사영하는 (projecting) 동작, 및/또는 계산된 반사율 스펙트럼 및 대응하는 실험 반사율 스펙트럼을 감소된-치수의 부분 공간 상으로 사영하는 동작 및 부분 공간 상으로 사영될 때 반사율 스펙트럼 간 차를 연산하는 동작을 포함할 수도 있다.

[0005]

일부 실시예들에서, 계산된 반사율 스펙트럼 중 적어도 일부는, 모델을 사용하여 일련의 에칭 프로파일 좌표들에 의해 나타낸 계산된 에칭 프로파일을 생성하는 프로세스, 및 계산된 에칭 프로파일로부터, 계산된 에칭 프로파일로부터 전자기 복사의 반사를 시뮬레이팅함으로써 계산된 반사율 스펙트럼을 생성하는 프로세스에 의해 생성될 수도 있다.

[0006]

일부 실시예들에서, 실험 반사율 스펙트럼은 에칭 프로세스들의 상이한 지속기간들을 나타내는 에칭 시간들의 시퀀스에 대응하는 반사율 스펙트럼을 포함하고, 그리고 계산된 반사율 스펙트럼은 동일한 에칭 시간들의 시퀀스에 대응하도록 모델로부터 계산된 반사율 스펙트럼을 포함한다. 이러한 특정한 실시예들에서, 실험 반사율 스펙트럼은 에칭 시간들의 시퀀스에서 진행중인 에칭 프로세스를 동안 취해진 광학적 측정치들로부터 생성되고, 일부 경우들에서, 에칭 시간들의 시퀀스의 적어도 일부 동안 연속하는 에칭 시간들은 0.01 내지 1 초만큼 분리된다.

[0007]

또한 전술한 방법론들에 따라 최적화된 계산된 에칭 프로파일들을 생성하기 위한 컴퓨터 모델들이 본 명세서에 개시된다. 또한 피처가 에칭 프로세스에 의해 에칭된 후 반도체 기판 상의 피처의 프로파일을 근사적으로 결정하는 방법들이 본 명세서에 개시된다. 이들 방법들은 에칭 프로세스에 대응하는 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 값들의 세트를 명시하는 단계, 및 독립 입력 파라미터들에 대해 명시된 값들의 세트를 사용하여 전술한 최적화된 컴퓨터 모델을 사용하여 에칭 프로파일을 생성하는 단계를 포함할 수도 있다. 또한 반도체 기판 상의 피처의 목표된 에칭 프로파일을 근사적으로 산출할 에칭 프로세스에 의해 반도체 기판 상의 피처를 에칭한 후 에칭 프로세스에 대한 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 값들의 세트를 결정하기 위해 전술한 최적화된 모델들을 사용하는 방법들이 개시된다.

[0008]

또한 반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템들이 본 명세서에 개시된다. 이들 시스템들은 반도체 기판들을

에칭하기 위한 에칭기 장치로서, 에칭기 장치의 동작은 독립 입력 파라미터들의 세트에 의해 조정되는, 에칭기 장치, 및 에칭기 장치의 동작을 제어하기 위한 제어기를 포함할 수도 있다. 제어기는 통상적으로 프로세서 및 메모리를 포함한다. 메모리는 임의의 전술한 모델 최적화 방법들에 의해 최적화된 에칭된 피쳐 프로파일 모델을 저장할 수도 있다. 프로세서는 독립 입력 파라미터들의 세트에 대한 값들의 세트로부터 에칭된 피쳐 프로파일을 계산하도록 메모리에 저장된 최적화된 에칭된 피쳐 프로파일 모델을 사용하도록 구성될 수도 있다.

[0009]

본 개시의 이들 및 다른 특징들은 연관된 도면들을 참조하여 이하에 제시될 것이다.

### 도면의 간단한 설명

[0010]

도 1은 에칭 프로세스의 표면 운동 모델 (surface kinetic model)로부터 계산적으로 생성된 에칭 프로파일의 예를 나타낸다.

도 2는 도 1에 도시된 에칭 프로파일과 유사하지만, 이 도면에서, 하나 이상의 광학적 계측 툴들로 이루어진 실험 측정치들로부터 계산된 에칭 프로파일의 예를 나타낸다.

도 3은 에칭 프로파일 좌표 공간에 대해 에칭 프로파일 모델들을 최적화하기 위한 절차들을 나타내는 프로세스 플로우 차트이다.

도 4a는 에칭 프로파일 모델들, 특히 이러한 모델들에 사용된 특정한 모델 파라미터들을 최적화하기 위한 절차들을 나타내는 프로세스 플로우 차트들이다.

도 4b는 에칭 프로파일 모델들, 특히 이러한 모델들에 사용된 특정한 모델 파라미터들을 최적화하기 위한 절차들을 나타내는 프로세스 플로우 차트들이다.

도 5는 본 개시에 따라 최적화된 모델들을 사용하여 식별될 수도 있는 표준 (canonical) 에칭 프로파일들의 예시적인 세트를 도시한다.

도 6은 반사율 스펙트럼 공간에 대해 에칭 프로파일 모델들을 최적화하기 위한 절차들을 나타내는 프로세스 플로우 차트이다.

도 7a는 에칭 프로세스 동안 진전됨에 따라 에칭 프로파일의 반사율 스펙트럼 이력의 예시이다.

도 7b는 3-D 데이터 블록 (데이터 블록의 3 개의 인덱스들은 웨이퍼 수 (i), 스펙트럼 파장 (j), 및 에칭 프로세스 시간 (k)에 대응함)의 형태로 많은 웨이퍼들에 대해 수집된 스펙트럼 반사율 데이터의 세트, 뿐만 아니라 PLS 스펙트럼 이력 분석에 대한 독립 데이터로서 역할을 할 수도 있는 2-D 데이터 블록으로 전개된 (unfold) 3-D 데이터 블록들, 도면에 또한 표시된 에칭 프로파일 좌표들인 종속 데이터를 개략적으로 제시한다.

도 8은 PLS 모델의 최적화에 채용될 계산된 반사율 스펙트럼의 생성에 사용되는, EPM을 동시에 최적화하면서 에칭 프로세스 동안 에칭 프로파일들에 대한 PLS 모델 관련 에칭 스펙트럼 반사율 이력을 최적화하기 위한 반복적인 절차를 예시하는 프로세스 플로우 차트이다.

도 9a 내지 도 9c는 조정가능-캡 CCP (capacitively-coupled plasma) 반응기의 실시예를 예시한다.

도 10은 ICP (inductively-coupled plasma) 반응기의 실시예를 예시한다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0011]

도입

[0012]

상기 참조된 EPM들 (etch profile models) (및 다른 유사한 모델들) 이, 반도체 프로세싱 산업계에서 신뢰하기에 충분히 우수한 근사치들인 반도체 피쳐 에칭 프로파일들의 충분히 정밀한 표현들을 생성하는데 사용될 수도 있도록 상기 모델들의 실용적인 유용성을 개선하기 위한 절차들이 본 명세서에 개시된다. 일반적으로, 본 발명의 절차들은 이들 모델들의 예측력을 개선한다.

[0013]

일반적으로, EPM들 및 유사한 모델들은 시간에 따라 기판 피쳐의 에칭 프로파일 진화 (evolution) -즉, 피쳐의 표면 상의 다양한 공간적 위치들에서 피쳐의 형상의 시간 의존적 변화- 를 이들 공간적 위치들 각각에서 에칭 프로세스와 연관된 반응 레이트들을 계산함으로써, 시뮬레이션하려고 시도하고, 반응 레이트들은 반응 챔버에서 설정된 플라즈마 조건들의 특징적인 에천트 및 중착 종의 입사 플럭스로부터 발생하고, 시뮬레이션된 에칭 프로

세스 내내 그렇게 한다. 출력은 프로파일의 형상을 공간적으로 맵핑하는 데이터 포인트들의 개별 세트 -즉, 프로파일 좌표들-로 나타내는 시뮬레이션된 에칭 프로파일이다. 이러한 시뮬레이션된 에칭 프로파일의 예가 도1에 도시되고; 시뮬레이션된 프로파일은 도 2에 도시된 바와 같이 실제 측정된 에칭 프로파일에 대응할 수도 있다. 시뮬레이션된 에칭 프로파일의 시간에 따른 진화는 이론적으로 모델링되고, 공간적으로 분해된 국부적인 에칭 반응 레이트들에 의존하고, 물론 에칭 프로세스의 기본적인 화학 및 물리학에 의존한다. 이와 같이, 에칭 프로파일 시뮬레이션은 에칭 프로세스들의 기본적인 화학 반응 메커니즘들 및 또한 일반적으로 프로세스 엔지니어의 통제 하에 있는 캠버 환경 -온도, 압력, 플라즈마 전력, 반응물 플로우 레이트, 등- 을 특징으로 할 수도 있는 모든 물리적 및 화학적 파라미터와 관련된 다양한 물리적 및 화학적 파라미터에 의존한다.

[0014] 전술한 바와 관련하여, 따라서 에칭 프로파일 모델은, 일반적으로 독립적으로 제어할 수 없는 그리고/또는 심지어 프로세스 엔지니어가 직접적으로 알 수 있지만 그럼에도 불구하고 시뮬레이션에 대한 입력으로 명시되어야 하는 "근본적인" 화학적 및 물리적 입력 파라미터 세트 -반응 확률, 부착 계수, 화산 상수, 이온 및 중성 플럭스 등과 같은 예들-를 필요로 한다. 따라서 "근본적인" 또는 "기계론적" 입력 파라미터들의 이러한 세트들은 일반적으로 문헌에서 취해진 특정 값을 갖는 것으로 가정되며, 이들의 사용은 모델링될 에칭 프로세스의 기본적인 물리적 메커니즘 및 화학적 메커니즘의 특정한 단순화 (그리고 근사치)를 암시적으로 언급한다.

[0015] 본 개시는 기판 에칭 프로세스들의 이들 EPM들의 실제 산업적 적용성을 향상시키기 위해 실험 기법들 및 데이터 분석 방법들을 결합하는 절차를 제시한다. "기판 에칭 프로세스"라는 문구는 마스크 층을 에칭하는 프로세스들, 또는 보다 일반적으로, 기판 표면 상에 중착된 그리고/또는 기판 표면 상에 머물러 있는 (reside) 임의의 재료 층을 에칭하는 프로세스들을 포함한다는 것을 주의한다. 이 기법들은 이 모델에 채용되는 "근본적인" 화학적 및 물리적 입력 파라미터들에 중점을 두고, 이러한 "근본적인" 파라미터들에 대해 결정된 최적 값들이 문헌 (또는 다른 실험들) 이 이들 파라미터들에 대한 "실제" 물리적/화학적 값들로 결정할 수도 있는 것과 상이하더라도 이들 파라미터들에 대해 보다 효과적인 -에칭 모델의 정확도를 개선하는 관점에서 효과적인- 값들의 세트로 간주될 수도 있는 것을 결정하는 절차를 사용하여 이 모델을 개선한다.

[0016] 도 3 및 도 4는, 이하에 보다 완전히 논의된, 개선된 에칭 프로파일 모델들을 생성하기 위한 예시적인 프로세스들을 예시하는 플로우 차트들이다. 예를 들어, 도 3에서, 도시된 프로세스 흐름은, 일 브랜치는 실험 측정치들로부터이고 다른 브랜치는 아직 최적화되지 않은 버전인 모델의 현재 버전으로부터의 2 개의 입력 브랜치들을 갖는다. 실험 브랜치와 예측 모델 브랜치 양자는 에칭 프로파일 결과들을 생성한다. 이러한 결과들은 비교되고 비교는 결과들 간의 편차가 감소되도록 모델을 개선하도록 사용된다.

[0017] EPM에 의한 출력으로서 2 차원 또는 3 차원의 에칭 프로파일 데이터를 상세히 특징화하는 것은 모델을 최적화하기 위한 특정 도전 과제를 제시한다. 본 명세서에 개시된 다양한 실시예들에서, 프로파일 데이터는 각각이 두께를 갖는 일련의 상승부 슬라이스로 나타낸다. 다른 실시예들에서, 프로파일은 공통 원점으로부터의 일련의 벡터들로서 또는 사다리꼴과 같은 일련의 기하학적 형태들로서 나타낸다. 프로파일의 이들 상승부 슬라이스 또는 다른 컴포넌트들을 많이 사용하는 경우, 실험 및 EPM 프로파일 간의 에러를 최소화하는 최적화 문제는 계산적으로 요구될 수 있다. 필요한 계산을 저감하기 위해, 주 컴포넌트 분석과 같은 차원 감소 기술은 다양한 프로파일 컴포넌트들로부터 최적화에 사용된 전체 물리적 프로파일까지 상관된 기여도들을 식별하기 위해 사용된다. 에칭 프로파일을 감소된 차원 공간의 몇몇 주 컴포넌트들 또는 다른 벡터들에 제공함으로써 에칭 프로파일 모델들의 예측 능력을 개선하는 프로세스를 크게 단순화할 수 있다. 부가적으로, 이러한 주 컴포넌트들은 서로 직교하여 독립 프로파일 기여도가 개별적으로 최적화될 수 있다는 것을 보장한다.

[0018] 다음 용어들이 본 명세서에서 사용된다.

[0019] 독립 변수 - 일반적으로 이해되는, 독립 변수는 응답을 유발하는 모든 변수이다. 에칭 프로파일 모델은 반응기 프로세스 조건들 (예를 들어, 온도, 압력, 가스 조성, 플로우 레이트들, 플라즈마 전력, 등), 국부적인 플라즈마 조건들 및 국부적인 반응 조건들과 같은 다양한 타입들의 독립 변수들을 포함할 수도 있다.

[0020] 결과 변수 - 일반적으로 이해되는, 결과 변수는 독립 변수들로부터 발생하는 변수이다. 종종 결과 모델은 모델에 의해 출력된다. 일부 맥락들에서, 결과 변수는 용어 종속 변수와 동의어이다. 본 개시에서 에칭 프로파일은 일 타입의 결과 변수이다.

[0021] 입력 변수 - 입력 변수는 독립 변수와 유사하지만, 일부 독립 변수들은 많은 실행들에 대해 고정될 수도 있고 따라서 이러한 실행들에 대한 변수들을 기술적으로 "입력"하지 않을 수도 있어서 보다 구체적일 수도 있다. 입력 변수는 고찰 중인 실행에 대한 입력으로서 제공된다.

- [0022] 기계론적 파라미터 - 기계론적 파라미터는 반응기 내 또는 예칭을 겪는 기관에서 하나 이상의 특정한 위치들에서 물리적 및/또는 화학적 조건을 나타내는 일 타입의 독립 변수이다.
- [0023] 플라즈마 파라미터 - 플라즈마 파라미터는 국부적인 플라즈마 조건들 (예를 들어, 기관 상의 특정한 위치들에서 플라즈마 밀도 및 플라즈마 온도) 을 기술하는 일 타입의 기계론적 파라미터이다.
- [0024] 반응 파라미터 - 반응 파라미터는 국부적인 화학적 또는 물리-화학적 조건을 기술하는 일 타입의 기계론적 파라미터이다.
- [0025] 프로세스 파라미터 - 프로세스 파라미터는 프로세스 엔지니어가 제어하는 반응기 파라미터 (예를 들어, 챔버 압력 및 페데스탈 온도) 이다. 기관 특성들과 함께 프로세스 파라미터들은 예칭 반응기 내에서 기계론적 파라미터들의 값들을 제어할 수도 있다.
- [0026] 모델 파라미터 - 모델 파라미터는 최적화된 일 타입의 독립 파라미터이다. 이는 통상적으로 기계론적 파라미터 예컨대 화학적 반응 파라미터이다. 모델 파라미터들의 초기 값들은 최적화되지 않았다.
- [0027] 예칭 프로파일들
- [0028] 예칭 프로파일 모델들의 상세들과 이들의 개선 절차들을 살펴보기 전에, 피처의 예칭 프로파일 개념을 기술하는 것이 유용하다. 일반적으로, 예칭 프로파일 (EP) 은 반도체 기관 상의 예칭된 피처의 형상을 특징화하도록 사용될 수도 있는 하나 이상의 기하학적 좌표들의 세트에 대한 임의의 값들의 세트를 지칭한다. 간단한 경우에, 예칭 프로파일은 피처를 통해 2 차원 수직 단면 슬라이스를 통해 볼 때 피처의 베이스까지의 중간 (halfway) (기관의 표면 상의 피처의 베이스 (또는 하단부) 와 피처의 상단 개구부 사이의 중간 지점) 에서 결정된 피처의 폭으로 근사화될 수 있다. 보다 복잡한 예에서, 예칭 프로파일은 동일한 2 차원 수직 단면 슬라이스를 통해 보았을 때 피처의 베이스 위의 다양한 높이에서 결정된 일련의 피처 폭일 수도 있다. 도 2는 이의 예시를 제공한다. 실시예에 따라, 폭은 리세스 피처의 일 측벽과 다른 측벽 사이의 거리 -즉, 예칭된 영역의 폭- 일 수도 있고 또는 폭은 어느 측면에서 예칭된 컬럼의 폭을 나타낼 수도 있다는 것을 주의한다. 후자는 도 2에 개략적으로 예시된다. 일부 경우들에서, 이러한 폭은 "임계 치수" (도 2에서 "CD"로 라벨링됨) 로 지칭되고, 피처의 베이스로부터의 상승부는 높이 또는 소위 임계 치수의 z-좌표 (도 2에서 백분율로 라벨링됨) 로 지칭될 수도 있다는 것을 주의한다. 언급된 바와 같이, 예칭 프로파일은 사다리꼴 또는 삼각형과 같은 형상의 스택 또는 공통 원점으로부터의 벡터들의 그룹과 같은 다른 기하학적 참조로 또는 보우 (bow), 직선 또는 테이퍼된 측벽, 라운딩된 (rounded) 하단부, 패싯 (facet), 등과 같은 통상적인 예칭 프로파일을 규정하는 특징 형상 파라미터들의 그룹으로 나타낼 수도 있다.
- [0029] 이런 방식으로, 피처의 프로파일의 이산화된 묘사와 일련의 기하학적 좌표들 (예를 들어, 상이한 상승부들에서 피처 폭) 이 맵핑된다. 상이한 상승부들에서 피처 폭을 나타내는 일련의 좌표들을 표현하기 위한 많은 방식들이 있다는 것을 주의한다. 예를 들어, 좌표 각각은 일부 피처 폭 (평균 피처 폭 또는 수직으로 평균된 피처 폭과 같은) 으로부터의 부분적인 편차 (fractional deviation) 를 나타내는 값을 가질 수도 있으며, 또는 좌표 각각은 수직으로 인접한 좌표, 등으로부터의 변화를 나타낼 수도 있다. 어떤 경우든, "폭" 및 일반적으로 예칭 프로파일을 나타내도록 사용된 프로파일 좌표들의 세트에 사용되는 스킴으로 지칭되는 것은 문맥 및 사용법에서 분명해 질 것이다. 좌표들의 세트는 피처의 예칭된 프로파일의 형상을 나타내도록 사용된다는 것이 발상이다. 일련의 기하학적 좌표들은 또한 기관 표면 상의 예칭된 실린더 또는 트렌치의 형상과 같은 피처의 예칭된 프로파일의 완전한 3 차원 형상 또는 다른 기하학적 특성을 기술하는데 사용될 수 있다는 것을 또한 주의해야 한다. 따라서, 일부 실시예들에서, 예칭 프로파일 모델은 모델링되는 피처의 완전한 3-D 예칭 형상을 제공할 수도 있다.
- [0030] 예칭 프로파일 모델들
- [0031] EPM들 (예칭 프로파일 모델들) 은 기본적인 물리적 및 화학적 예칭 프로세스들 및 반응 메커니즘들을 특징으로 하는 입력 예칭 반응 파라미터들 (독립 변수들) 의 세트로부터 이론적으로 결정된 예칭 프로파일을 계산한다. 이들 프로세스들은 예칭되는 피처와 그 주변을 나타내는 그리드에서 시간과 위치의 함수로 모델링된다. 입력 파라미터들의 예들은 이온 플럭스와 같은 플라즈마 파라미터들 및 특정 화학 반응이 발생할 확률과 같은 화학적 반응 파라미터들을 포함한다. 이들 파라미터들 (특히, 일부 실시예들에서, 플라즈마 파라미터들) 은, 여기에는 일반적인 반응기 구성을 및 압력, 기관 온도, 플라즈마 소스 파라미터들 (예를 들어, 플라즈마 소스에 제공된 전력, 주파수들, 둔티 사이클들), 반응물질들 및 이들의 흘로우 레이트들과 같은 프로세스 조건들로부터 파라미터들을 계산하는 다른 모델들을 포함하여, 다양한 소스들로부터 얻을 수도 있다. 이러한 모델들은 EPM의 일부

일 수도 있다.

[0032] 설명된 바와 같이, EPM들은 반응 파라미터를 독립 변수로서 취하고 응답 변수로서 예치 프로파일들을 기능적으로 생성한다. 다시 말해, 독립 변수들의 세트는 모델에 대한 입력들로서 사용된 물리적/화학적 프로세스 파라미터들이고, 응답 변수들은 모델에 의해 계산된 예치 프로파일 특징들이다. EPM들은 반응 파라미터들과 예치 프로파일 간의 하나 이상의 관계들을 채용한다. 이 관계들은, 예치 프로파일들과 관련된, 응답 변수들을 생성하도록 규정된 방식으로 독립 변수들에 적용되는 예를 들어, 계수들, 가중치들, 및/또는 다른 모델 파라미터들 (뿐만 아니라, 반응 파라미터들 및/또는 다른 모델 파라미터들의 2 차 이상의 고차 다항 함수의 선형 함수, 등) 을 포함할 수도 있다. 이러한 가중치들, 계수들, 등은 하나 이상의 상기 기술된 반응 파라미터들을 나타낼 수도 있다. 이들 모델 파라미터들은 본 명세서에 기술된 최적화 기법들 동안 튜닝되거나 조정된다. 일부 실시예들에서, 반응 파라미터들 중 일부는 최적화될 모델 파라미터이지만, 다른 파라미터들은 독립 입력 변수들로 사용된다. 예를 들어, 화학 반응 파라미터들은 최적화 가능한 모델 파라미터들일 수 있지만, 플라즈마 파라미터들은 독립 변수들일 수도 있다.

[0033] 일반적으로 "응답 변수"는 출력 및/또는 효과를 나타내고 그리고/또는 그 효과인지 여부가 테스트된다. "독립 변수"는 입력 및/또는 원인 (cause) 을 나타내며, 원인인지 여부가 테스트된다. 따라서, 응답 변수는 독립 변수가 가변함에 따라 가변하는지 그리고 얼마나 가변하는지를 알기 위해 연구될 수도 있다. 독립 변수는 또한 "예측 변수", "회귀 변수 (regressor)", "제어 변수", "조작 변수", "설명 변수" 또는 "입력 변수"로 공지될 수도 있다.

[0034] 설명된 바와 같이, 일부 EPM은 근본적인 반응 기계론적 파라미터들로 특징화될 수도 있고 기본적인 화학 및 물리에 대해 근본적인 것으로 간주될 수도 있는 (독립 변수의 일 타입) 입력 변수를 채용하고 따라서 일반적으로 실험 프로세스 엔지니어는 이 양들을 제어하지 않는다. 예치 프로파일 모델에서, 이들 변수들은 규정된 시간 단계들로 분리된 복수의 시간들에서 그리고 그리드의 위치 각각에 적용된다. 일부 구현예들에서, 그리드 해상도는 대략 수 Å 내지 약 1  $\mu\text{m}$  사이에서 가변할 수도 있다. 일부 구현예들에서, 시간 단계들은 약 1e-15 내지 1e-10 초 사이에서 가변할 수도 있다. 특정한 실시예들에서, 최적화는 (1) 국소 플라즈마 파라미터들 및 (2) 국소 화학 반응 파라미터들의 두 가지 타입의 기계론적 독립 변수들을 채용한다. 이러한 파라미터들은 위치의 함수, 일부 경우들에서 그리드의 해상도까지 가변할 수도 있다는 점에서 "국부적"이다. 플라즈마 파라미터들의 예들은 플러스 및 이온, 라디칼, 광자, 전자, 여기된 종, 증착 종과 같은 입자의 에너지 및 이들의 에너지 및 각도 분포 등과 같은 국부적인 플라즈마 특성들을 포함한다. 화학적 및 물리 화학적 반응 파라미터들의 예들은 레이트 상수들 (예를 들어, 특정한 화학적 반응이 특정한 시간에 발생할 확률들), 부착 계수, 확산 상수, 예치 에너지 임계 값, 기준 에너지, 스퍼터 수율, 각도 수율 함수 및 그 파라미터들을 규정하기 위한 에너지의 지수 등을 포함한다. 또한, 파라미터화된 화학 반응들은 반응물질들이 예치될 물질 및 예천트를 포함하는 반응들을 포함한다. 화학 반응 파라미터들은 기판을 직접 예치하는 반응에 부가하여 다양한 타입의 반응들을 포함할 수도 있다는 것이 이해되어야 한다. 이러한 반응들의 예들은 기생 반응, 증착 반응, 부산물의 반응 등을 포함하는 부 반응들을 포함한다. 이들 모두는 전체 예치 레이트에 영향을 줄 수도 있다. 이 모델은 상술한 플라즈마 및 화학 반응 입력 파라미터에 부가하여 다른 입력 파라미터들을 요구할 수도 있다는 것이 또한 이해되어야 한다. 이러한 다른 파라미터들의 예들은 반응 사이트들의 온도, 부분 압력 또는 반응물질 등을 포함한다. 일부 경우들에, 이들 및/또는 다른 비 기계식 파라미터들은 기계적 파라미터들 중 일부를 출력하는 모듈에 입력될 수도 있다.

[0035] 일부 실시예들에서, EPM 모델 변수들, 뿐만 아니라 최적화 동안 고정되는 독립 변수들 (예를 들어, 일부 실시예들에서 플라즈마 파라미터들)에 대한 최초 (최적화되지 않은) 값들은 문헌, 다른 계산적 모듈들 또는 모델들, 등에 의한 연산들과 같은 다양한 소스들로부터 획득될 수도 있다. 일부 실시예들에서, 독립 입력 변수들 -예컨대 플라즈마 파라미터들- 은 플라즈마 파라미터들의 경우에 대해, 예치 챔버 플라즈마 모델로부터와 같이, 모델을 사용함으로써 결정될 수도 있다. 이러한 모델들은 프로세스 엔지니어가 제어하는 (예를 들어, 높 (knob) 을 돌림으로써) 다양한 프로세스 파라미터들로부터 적용가능한 입력 EPM 파라미터들 -예를 들어, 압력, 플로우 레이트, 플라즈마 전력, 웨이퍼 온도, ICP 코일 전류들, 바이어스 전압들/전력, 펄싱 주파수, 펄스 듀티 사이클, 등과 같은 챔버 분위기 파라미터들- 을 계산할 수도 있다.

[0036] EPM을 실행할 때, 일부 독립 변수들은 실험들을 수행하는데 사용된 공지되거나 예상된 파라미터 값들로 설정된다. 예를 들어, 플라즈마 파라미터들은 모델링된 도메인 내의 위치들에서 공지되거나 예상된 값들로 고정될 수도 있다. -모델 또는 모델 파라미터들의 파라미터들과 같은 본 명세서에 기술된- 다른 독립 변수들은 이하에 기술된 최적화 절차에 의해 튜닝되도록 선택된 파라미터들이다. 예를 들어, 화학적 반응 파라미터들은 튜닝된

모델 파라미터들일 수도 있다. 따라서, 미리 결정된 측정된 실험 예칭 프로파일에 대응하는 일련의 실행들에서, 모델 파라미터들은 모델을 최상으로 최적화하는 이들 파라미터들의 값들을 선택하는 방법을 설명하기 위해 가변된다.

[0037]

EPM들은 많은 상이한 형태들 중 어느 형태를 취할 수도 있다. 궁극적으로, 이들은 독립 변수와 응답 변수 간의 관계를 제공한다. 관계는 선형 또는 비선형일 수도 있다. 일반적으로, EPM은 셀-기반 Monte Carlo 표면 반응 모델로 당업계에서 지칭된다. 다양한 형태들의 이들 모델들은 반도체 웨이퍼 제조의 관점에서 시간에 따른 웨이퍼 피처의 지형적 (topographical) 진화를 시뮬레이팅하도록 동작한다. 이 모델들은 웨이퍼 상의 임의의 방사상 위치들에 대한 플라즈마 모델 또는 실험 진단들에 의해 생성된 에너지 및 각도 분포들을 갖는 의사-입자들 (pseudo-particles) 을 런칭한다 (launch). 의사-입자들은 표면으로의 라디칼들 및 이온들의 플러스들을 나타내도록 통계적으로 가중된다. 이 모델들은 프로파일 진화를 예측하도록 예칭, 스퍼터링, 혼합, 및 표면 상의 증착을 발생시키는 다양한 표면 반응 메커니즘들을 어드레싱한다. Monte Carlo 적분 동안, 다양한 이온 및 중성 의사-입자들의 궤적들은 이들이 계산 도메인과 반응하거나 떠날 때까지 웨이퍼 피처 내에서 추적된다. EPM은 다양한 재료들에 대해 예칭, 스트립핑, ALE (atomic layer etching), 이온화된 금속 PVD (physical vapor deposition), 및 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) 를 예측하기 위한 발전된 능력을 갖는다. 일부 실시예들에서, EPM은 2 차원 또는 3 차원에서 직선 (rectilinear) 메쉬를 활용하고, 이 메쉬는 웨이퍼 피처의 치수들을 적절히 어드레싱/모델링하기 충분한 정밀 해상도를 갖는다 (비록, 원리 상, (2D이든 3D이든) 메쉬는 또한 비-직선 좌표들을 활용할 수 있지만). 이 메쉬는 2차원 또는 3차원의 그리드-지점들의 어레이로 보여질 수도 있다. 이는 또한 그리드-지점 각각 (에 중심을 둔) 과 연관된 2D에서 국부적인 면적, 또는 3D에서 체적을 나타내는 셀들의 어레이로 보여질 수도 있다. 메쉬 내 셀 각각은 상이한 고체 재료 또는 재료들의 혼합물을 나타낼 수도 있다. 모델링을 위한 기준으로서 2D 또는 3D 메쉬가 선택되는지는 모델링될 웨이퍼 피처의 부류 (class) 태입에 의존할 수도 있다. 예를 들어, (예를 들어, 폴리실리콘 기판에서) 긴 트렌치 피처를 모델링하기 위해 2D 메쉬가 사용될 수도 있고, 2D 메쉬는 트렌치의 단부들의 기하학적 구조가 트렌치의 단부들로부터 트렌치의 길이의 대부분으로 아래로 발생하는 반응 프로세스들과 많은 관련이 없다는 가정 (즉, 이 단면 2D 모델의 목적을 위해, 트렌치는 무한한 것으로 가정되고, 다시 단부들로부터 트렌치 피처에 대한 합리적인 가정) 하에서 트렌치의 단면 형상을 설명한다. 다른 한편으로, 이는 (피처의 x, y 수평 치수들이 서로 동등하기 때문에) 3D 메쉬를 사용하는 원형 비아 피처 (TSV (through-silicon via)) 를 모델링하기 적절할 수도 있다.

[0038]

메쉬 간격 (mesh spacing) 은 나노미터 이하 (sub-nanometer) (예를 들어, 1 Å으로부터) 최대 수  $\mu\text{m}$  (예를 들어, 10  $\mu\text{m}$ ) 의 범위일 수도 있다. 일반적으로, 메쉬 셀 각각은 (예를 들어, 피처에 의해 점유되지 않은 공간적 영역 내에서) 프로파일 진화 동안 변화할 수도 있는 재료 아이덴티티 (identity), 예를 들어, 포토레지스트, 폴리실리콘, 플라즈마를 할당받는다. 고체 상 좋은 계산 셀의 아이덴티티로 나타내고, 가스 상 좋은 계산 의사-입자들로 나타낸다. 이러한 방식으로, 메쉬는 웨이퍼 피처의 기하학적/토풀로지가 반응성 예칭 프로세스에서 시간에 따라 진전됨에 따라, 웨이퍼 피처 및 주변 가스 분위기 (예를 들어, 플라즈마) 의 (예를 들어, 계산 목적을 위해) 상당히 상세한 표현을 제공한다.

[0039]

예칭 실험들 및 프로파일 측정치들

[0040]

이전 섹션에 제공된 EPM들을 트레이닝하고 최적화하기 위해, 다양한 실험들이 예칭 프로세스 파라미터들의 다양한 세트들에 의해 명시된 바와 같은 다양한 프로세스 조건들 하에서 수행된 실제 예칭 프로세스들로부터 발생된 실제 예칭 프로파일들을 -실험들로 하여금 정확하게- 결정하도록 수행될 수도 있다. 따라서, 예를 들어, 일 실험은 예칭 프로세스 파라미터들 -예컨대 예천트 플로우 레이트, 플라즈마 전력, 온도, 압력, 등- 의 세트에 대한 값들의 제 1 세트를 명시하고, 이에 따라 예칭 챔버 장치를 셋업하고, 예천트를 챔버 내로 흘리고, 플라즈마를 스트라이킹하는 등하고, 제 1 예칭 프로파일을 생성하도록 제 1 반도체 기판의 예칭으로 진행한다. 이어서, 일 실험은 동일한 세트의 예칭 프로세스 파라미터들에 대한 값들의 제 2 세트를 명시하고, 제 2 프로파일을 생성하도록 제 2 기판을 예칭하고, 그렇게 계속한다.

[0041]

다양한 조합들의 프로세스 파라미터들이 EPM을 트레이닝하기 위해 적절하게 넓거나 포커싱된 프로세스 공간을 나타내도록 사용될 수도 있다. 이어서 동일한 조합들의 프로세스 파라미터들이 실험 결과들에 대해 비교될 수 있는 예칭 프로파일 출력들 (응답 변수들) 을 제공하도록 EPM에 대한 (독립) 입력 파라미터들, 예컨대 기계론적 파라미터들을 계산하도록 사용된다. 실험은 비용이 많이 들고 시간 소모적이기 때문에, EPM을 최적화하기 위한 견고한 트레이닝 세트를 제공하기 위해 수행되어야 하는 실험들의 수를 감소시키는 방식으로 실험들을 설계하기 위한 기법들이 채용될 수 있다. DOE (design of experiments) 와 같은 기법들이 이 목적을 위해 채용될 수도 있다. 일반적으로, 이러한 기법들은 다양한 실험들에 사용할 프로세스 파라미터들의 세트들을 결정한다. 프로

세스 파라미터들, 랜덤화 (randomization), 등 간의 통계적 상호작용들을 고려함으로써 프로세스 파라미터들의 조합들을 선택한다. 예로서, DOE는 종료된 (finalized) 프로세스의 중심 지점 주변의 제한된 범위의 파라미터들을 커버하는 작은 수의 실험들을 식별할 수도 있다.

[0042] 통상적으로, 연구자는 모델 최적화 프로세스 초반에 모든 실험들을 수행할 것이고 수렴할 때까지 최적 루틴 반복들의 실험들만을 사용할 것이다. 대안적으로, 실험 설계자는 최적화의 초반 반복들을 위한 일부 실험들 및 최적화가 진행됨에 따른 나중의 부가적인 실험들을 수행할 수도 있다. 최적화 프로세스는 평가될, 따라서 나중의 반복들 동안 실행될 특정한 실험들을 실험 설계자에게 통보할 수도 있다.

[0043] 하나 이상의 인시츄 또는 오프라인 계측 툴들이 실험 에칭 프로세스 동작들로부터 발생하는 실험 에칭 프로파일들을 측정하도록 사용될 수도 있다. 측정들은 에칭 프로세스들 동안 에칭 프로세스들의 종료시 또는 에칭 프로세스들 동안 1 회 이상 이루어질 것이다. 측정들이 에칭 프로세스의 종료시 이루어질 때, 측정 방법론은 파괴적일 수도 있고, 에칭 프로세스 동안 인터벌들로 이루어질 때, 측정 방법론은 일반적으로 비-파괴적일 것이다 (따라서 에칭을 방해하지 않을 것이다). 적절한 계측 기법들의 예들은, 이로 제한되지 않지만, LSR, OCD, 및 단면 SEM을 포함한다. 계측 툴은 예컨대 (실험이 기본적으로 피처의 에칭 프로파일을 이미징하는) SEM의 경우 피처의 프로파일을 직접적으로 측정할 수도 있고, 또는 예컨대 (실제 측정된 데이터로부터 피처의 에칭 프로파일을 철회하도록 일부 포스트-프로세싱이 이루어지는) OCD 측정의 경우에서 피처의 에칭 프로파일을 간접적으로 결정할 수도 있다는 것을 주의한다.

[0044] 어떠한 경우든, 에칭 실험들 및 계측 절차들의 결과는 각각 피처의 프로파일의 형상을 나타내는 그리드 값들의 세트 또는 일련의 좌표들에 대한 일련의 값들을 포함하는 측정된 에칭 프로파일들의 세트이다. 일 예가 도 2에 도시된다. 이어서 에칭 프로파일들은 이하에 기술된 바와 같은 컴퓨터화된 에칭 프로파일 모델들을 트레이닝, 최적화하고 그리고 개선하기 이한 입력들로서 사용될 수도 있다.

#### 모델 파라미터 튜닝/최적화

[0046] 측정된 실험 에칭 프로파일 각각은 컴퓨터화된 에칭 프로파일 모델을 튜닝하기 위한 벤치마크를 제공한다. 따라서, 에칭 프로파일들의 예측의 현실성으로부터 모델이 얼마나 벗어나는지를 보여주도록 실험 에칭 프로파일들을 적용함으로써 일련의 연산들이 에칭 프로파일 모델을 사용하여 수행된다. 이 정보를 사용하여, 모델이 개선될 수도 있다.

[0047] 도 3은 상기 기술된 바와 같이, 에칭 프로파일 모델을 튜닝하고 그리고/또는 최적화하기 위한 동작들 (300)의 세트를 예시하는 플로우차트를 제공한다. 일부 실시예들에서, 이러한 튜닝된 그리고/또는 최적화된 모델은 에칭 실험들을 수행한 결과로서 측정된 에칭 프로파일들과 모델로부터 생성된 대응하는 계산된 에칭 프로파일들 간의 결합된 차들과 관련된 (나타내는, 정량화하는, 등) 메트릭을 감소시킨다 -그리고 일부 경우들에서 실질적으로 최소화한다-. 즉, 개선된 모델은 (-EPM에 대한 독립 입력 파라미터들을 계산하도록 사용되는- 선택된 프로세스 파라미터들의 상이한 세트들의 명시된 값들로 지정된) 상이한 실험 프로세스 조건들에 대해 결합된 에러를 감소시킬 수도 있다.

[0048] 도 3에 도시된 바와 같이, 최적화 절차 (300)는 최적화될 모델 파라미터들의 세트의 선택 동작 310으로 시작된다. 다시, 이들 모델 파라미터들은 프로세스 엔지니어가 제어하지 않는 기본적인 화학적 물리적 프로세스들을 특징으로 하는 파라미터들로 선택될 수도 있다. 일부 또는 모든 파라미터들은 모델을 개선하도록 실험 데이터에 기초하여 조정될 것이다. 일부 실시예들에서, 이들 모델 파라미터들은 반응 파라미터들일 수도 있고, 반응 확률들 그리고/또는 (열적) 레이트 상수들, 반응물질 부착 계수들, 생성물 부착 계수들, 반응물질 확산 상수들, 생성물 확산 상수들, 물리적 또는 화학적 스퍼터링을 위한 에칭 문턱값 에너지들, 에너지에 대한 지수 의존도, 에칭 각도 수율 의존도들 및 각도 수율 곡선과 연관된 파라미터들, 등을 포함한다. 일부 실시예들에서, 하나 이상의 모델 파라미터들은 반응 레이트 상수들, 반응물질 부착 계수들, 생성물 부착 계수들, 반응물질 확산 상수들, 및/또는 생성물 확산 상수들을 포함한다. 일반적으로, (에칭 프로세스가 진행됨에 따라 에칭 챔버의 화학적 조성이 변화될 것이라는 것이 이해되어야 하지만) 에칭 챔버 내로 흐른 화학적 종의 특정한 미리 결정된/명시된 혼합물에 대한 최적화가 이루어진다는 것을 주의한다. 일부 실시예들에서, 반응 파라미터들은 다른 입력 파라미터들 (예컨대 플라즈마 파라미터들)로부터 분리된 입력 파일의 EPM 내로 피딩된다 (fed).

[0049] 일부 실시예들에서, 모델 파라미터들은 에칭 프로세스에 의해 모델링될 특정한 화학적 반응들의 명세를 포함할 수도 있다. 당업자는 미리 결정된 에칭 프로세스에 대해, 언제나 에칭 챔버 내에서 발생하는 많은 반응들이 진행 중일 수도 있다는 것을 이해할 것이다. 이들은 주 에칭 반응 자체를 포함하지만, 주 에칭 프로세스의 부 반

응들 및 주 에칭 반응의 부산물들을 수반하는 반응들, 부산물들 간의 반응들, 부산물들을 수반하는 반응들, 등을 또한 포함할 수도 있다. 따라서, 일부 실시예들에서, 모델 파라미터들의 선택은 어느 반응들을 모델 내에 포함할지를 수반한다. 아마도, 포함되는 반응들이 보다 많을수록, 보다 정확한 모델 및 보다 정확한 대응하는 계산된 에칭 프로파일이 포함된다. 그러나, 보다 많은 반응들을 포함시킴으로써 모델의 복잡도를 증가시키는 것은 시뮬레이션의 계산 비용을 상승시킨다. 이는 또한 보다 많은 반응 파라미터들이 최적화되게 한다. 이는 부가된 특정한 반응이 전체 에칭 운동들에 중요하다면 좋을 수도 있다. 그러나, 부가적인 반응이 중요하지 않다면, 또 다른 세트의 반응 파라미터들의 부가는 최적화 절차를 수렴하기 보다 어렵게 할 수도 있다. 다시, 포함할 반응들 및 이들 반응들과 연관된 반응 상수들 또는 반응 확률들의 선택들은 (예를 들어, 플라즈마 파라미터들과 분리된) 고유의 입력 파일 내 EPM 내로 피딩될 수도 있다. 특정한 실시예들에서, 미리 결정된 반응물질 종의 세트에 대해, 종 각각에 대한 다양한 대안적/경쟁 반응 경로들의 확률들은 하나로 합산되어야 한다. 그리고, 다시, (예를 들어, 입력 파일 내) 반응 확률들, 등 포함할 반응들의 명세들은 에칭 프로세스/반응을 수행하도록 에칭 챔버 내로 흐르는 화학 종의 미리 결정된/명시된 혼합물에 대해 이루어질 것 (그리고 일부 실시예들에서, 일 화학적 혼합물에 대해 학습되는 것으로 알 수 있는 최적화는 유사한/관련된 화학적 혼합물들에 적용될 수도 있지만, 최적화는 일반적으로 미리 결정된 혼합물에 대해 이루어질 것) 이라는 것이 이해되어야 한다.

[0050] 어떠한 경우든, 도 3의 플로우차트에 도시된 최적화 프로세스를 시작하기 위해, 초기 값들은 일반적으로 최적화될 다양한 모델 파라미터들 (예컨대 반응 확률들, 부착 계수들, 확산 상수들, 등)에 대해 선택되어야 한다. 이는 동작 310에서 이루어진다. 초기 값들은 문헌에서 발견될 수도 있거나, 다른 시뮬레이션들에 기초하여 연산될 수도 있거나, 실험으로부터 결정될 수도 있거나, 이전 최적화 절차들로부터 공지되거나 할 수도 있다.

[0051] 동작 310에서 선택되고 초기화된 모델 파라미터들은 동작 320에서 복수의 값들의 세트들이 주어진 독립 입력 파라미터들의 세트에 대해 최적화된다. 이러한 독립 입력 파라미터들은 반응 챔버 내에서 플라즈마를 특징화하는 파라미터들을 포함할 수도 있다. 일부 실시예들에서, 이들 플라즈마 파라미터들은 (방금 기술된) 반응 파라미터들에 대해 사용된 입력 파일로부터 분리된 입력 파일을 통해 EPM 내로 피딩된다. 따라서 독립 입력 파라미터들 (예를 들어, 플라즈마 파라미터들)에 대한 복수의 값들의 세트들은 선택된 독립 입력 파라미터들의 공간 내의 상이한 지점들을 명시한다. 예를 들어, 최적화되도록 선택된 입력 파라미터들이 온도, 에천트 풀렉스, 및 플라즈마 밀도이고, 이들 선택된 입력 파라미터들에 대해 5 세트의 값들이 선택된다면, 그러면 온도, 에천트 풀렉스, 및 플라즈마 밀도의 선택된 3차원 입력 파라미터 공간에서 5 개의 고유의 지점들 -이 공간에서 5 개의 지점들 각각은 온도, 에천트 풀렉스, 및 플라즈마 밀도의 상이한 조합에 대응- 이 식별된다. 언급된 바와 같이, DOE와 같은 실험 설계 절차는 입력 파라미터들의 세트들을 선택하도록 채용될 수도 있다.

[0052] 입력 파라미터들의 조합 각각에 대해, 일단 선택되면, 동작 330에서 에칭 실험이 실험 에칭 프로파일을 측정하도록 수행된다. (일부 실시예들에서, 예를 들어 복수의 에칭 실험이 입력 파라미터들에 대한 동일한 값들의 조합에 대해 수행되고 발생되는 에칭 프로파일 측정치들은 함께 (아마도 가외값들을 폐기한 후, 등) 평균된다.) 다음과 같이 모델을 튜닝하고 최적화하기 위해 이 벤치마크들의 세트가 사용된다: 동작 335에서 에칭 프로파일은 입력 파라미터들의 값들의 조합 각각에 대해 계산되고, 그리고 동작 340에서 입력 파라미터들에 대한 값들의 상이한 세트들 모두에 대해 실험 에칭 프로파일과 계산된 에칭 프로파일 간의 차를 나타내는 (관련된, 정량화하는, 등) 에러 메트릭이 계산된다.

[0053] (에러 메트릭이 계산되는) 계산된 에칭 프로파일들의 세트는 동작 310에서 명시된 바와 같이 이전에 선택된 모델 파라미터들의 세트에 대응하는 것을 주의한다. 최적화 절차의 목표는 이들 모델 파라미터들에 대해 보다 효과적인 선택들을 결정하는 것이다. 따라서, 동작 350에서 현재 명시된 모델 파라미터들이 동작 340에서 계산된 에러 메트릭이 (모델 파라미터들의 공간의 관점에서) 국부적으로 최소화되도록 하는지 여부가 결정되고, 그렇지 않다면, 모델 파라미터들의 세트의 하나 이상의 값들이 동작 360에서 수정되고, 이어서 새로운 세트의 에칭 프로파일들을 생성하도록 사용되고 -도 3의 플로우차트에서 개략적으로 나타낸 바와 같이 동작 335를 반복- 그후 동작 340의 반복시 새로운 에러 메트릭이 연산된다. 이어서 프로세스는 모델 파라미터들의 이 새로운 조합이 에러 메트릭에 의해 평가된 모든 입력 파라미터들의 세트들에 대해 국부적 최소값을 나타내는지 여부가 결정되는 동작 350으로 다시 진행한다. 그렇다면, 도면에 나타낸 바와 같이 최적화 절차는 종결된다. 그렇지 않다면, 모델 파라미터들은 동작 360에서 다시 수정되고 사이클은 반복된다.

[0054] 도 4a는 에칭 프로파일 모델에서 모델 파라미터들을 개량하기 (refining) 위한 방법 (470)의 플로우차트를 제공한다. 도시된 바와 같이, 방법 (470)은 제어된 일련의 에칭 챔버 파라미터 세트들에 대해 생성된 실험 에칭 프로파일들을 수집함으로써 시작한다. 나중의 스테이지에서, 방법은 이들 실험으로 생성된 에칭 프로파일들을

예칭 프로파일 모델을 사용하여 생성된 이론적으로 생성된 예칭 프로파일과 비교한다. 실험으로 생성된 예칭 프로파일들을 예칭 프로파일과 이론적으로 생성된 예칭 프로파일을 생성함으로써, 예칭 프로파일 모델에 의해 사용된 모델 파라미터들의 세트는 예칭 프로파일들을 예측하는 모델의 능력을 개선하도록 개량될 수 있다.

[0055] 도시된 방법에서, 프로세스는 프로세스 파라미터들의 세트들이 계산 스테이지와 실험 스테이지 양자에서 사용하도록 선택되는 동작 472에서 시작된다. 이들 프로세스 파라미터들은 비교가 수행되는 조건들의 범위를 규정한다. 프로세스 파라미터들의 세트 각각은 예칭 챔버를 동작시키기 위한 설정들의 컬렉션을 나타낸다. 언급된 바와 같이, 프로세스 파라미터들의 예들은 챔버 압력, 페데스탈 온도, 및 예칭 챔버 내에서 선택되고 그리고/또는 측정될 수 있는 다른 파라미터들을 포함한다. 대안적으로, 또는 이에 더하여, 프로세스 파라미터들의 세트 각각은 예칭될 워크 피스의 조건 (예를 들어, 예칭을 통해 형성된 라인 폭 및 라인 피치) 을 나타낸다.

[0056] 실험 실행들을 위한 프로세스 파라미터들의 세트들을 선택한 후 (EPM 최적화를 위한 독립 입력 파라미터들의 세트는 프로세스 파라미터들의 세트 각각에 대응할 (및/또는 세트 각각으로부터 산출될) 것이라는 것을 주의한다), 실험들이 시작된다. 이는 복수의 파라미터 세트들에 대해 루프로 도시되고 동작들 474, 476, 478, 및 480을 포함한다. 동작 474은 단순히 새로운 실험을 실행하기 위해 다음 프로세스 파라미터 세트 (Parameter Set(i)) 로 증분을 나타낸다. 일단 파라미터 세트가 업데이트되면, 방법은 현재 파라미터 세트의 파라미터들을 사용하여 새로운 예칭 실험을 실행한다 (블록 476). 다음에, 방법은 현재 파라미터 세트를 사용하여 예칭 실험이 실행된 후 워크 피스 상에서 측정된 실험 예칭 프로파일을 생성하고 저장한다 (블록 478). "예칭 프로파일 생성 및 저장" 동작은 상기 설명된 바와 같은, 감소된 차원 공간에서의 예칭 프로파일, 예컨대 예칭 프로파일의 기본 컴포넌트들 표면을 제공한다.

[0057] 실험에서 새로운 프로세스 파라미터 세트가 사용될 때마다, 방법은 판단 블록 480에 예시된 바와 같이 임의의 추가 파라미터 세트들이 있는지 여부를 결정한다. 부가적인 파라미터 세트들이 있다면, 다음 파라미터 세트는 블록 474에 예시된 바와 같이 초기화된다. 궁극적으로, 처음으로 규정된 프로세스 파라미터 세트들 전부가 고려된 후, 판단 블록 480은 고려할 추가 파라미터 세트들이 없다고 결정한다. 이 지점에서, 프로세스는 프로세스 흐름의 모델 최적화 부분으로 핸드오프 (handed off) 된다.

[0058] 처음에 프로세스 흐름의 모델 최적화 부분에서, 모델 파라미터들의 세트 (Model Parameters(j)) 는 블록 482에 예시된 바와 같이 초기화된다. 설명된 바와 같이, 이들 모델 파라미터들은 모델이 예칭 프로파일들을 예측하도록 사용되는 파라미터들이다. 이 프로세스 흐름의 맥락에서, 이들 모델 파라미터들은 EPM의 예측 능력을 개선하도록 수정된다. 일부 실시예들에서, 모델 파라미터들은 예칭 챔버 내에서 발생할 하나 이상의 반응들을 나타내는 반응 파라미터들이다. 일 예에서, 모델 파라미터들은 특정한 반응들이 일어날 확률들 또는 반응 레이트 상수들이다. 또한, 본 명세서의 다른 곳에 설명된 바와 같이, 예칭 프로파일 모델은 최적화 루틴 동안 고정된 채로 남는 다른 파라미터들을 채용할 수도 있다. 이러한 파라미터들의 예등은 물리적 파라미터들, 예컨대 플라즈마 조건들을 포함한다.

[0059] 동작 482에서 모델 파라미터들이 초기화된 후, 방법은 실험 루프에서 실험 예칭 프로파일들을 생성하도록 사용된 프로세스 파라미터 세트들 각각에 대응하는 이론 예칭 프로파일들을 생성하는 최적화 루프로 들어간다. 즉, 방법은 프로세스 파라미터 세트들 각각 (즉, 모든 상이한 Parameter Set(i)들에 대한) 에 대응하는 예칭 프로파일들을 예측하도록 EPM을 사용한다. 그러나, 이들 프로세스 파라미터 세트들 각각에 대해, 미리 결정된 프로세스 파라미터들에 대응하는 독립 입력 파라미터들의 세트가 (EPM을 실행하기 위해) EPM 내로 실제로 입력된다는 것을 주의한다. 일부 파라미터들에 대해, 독립 입력 파라미터는 프로세스 파라미터와 동일할 수도 있지만; 일부 파라미터들에 대해, (EPM 내로 실제로 피딩된) 독립 입력 파라미터는 물리적 프로세스 파라미터로부터 도출/계산될 수도 있고; 따라서 독립적 입력 파라미터와 프로세스 파라미터는 대응하지만 동일하지는 않을 수도 있다. 따라서, 도 4a의 이 최적화 루프 (동작들 482 내지 496)의 맥락에서, EPM은 "Parameter Set(i)"에 대응하는 독립 입력 파라미터들의 세트를 사용하여 -매우 정밀하게- 실행되는 한편, 실험 루프 (동작들 472 내지 480)에서 실험들은 "Parameter Set(i)"에 대응하는 프로세스 파라미터들을 사용하여 실행된다.

[0060] 어떤 경우든, 처음에 이 루프에서, 방법은 동작 472에서 설정된 파라미터 세트들 중 다음 파라미터 세트로 증분된다. 블록 484를 참조하라. 이 선택된 파라미터 세트를 사용하여, 방법은 현재 모델 파라미터들의 세트를 사용하여 예칭 프로파일 모델을 실행한다. 블록 486을 참조하라. 그 후, 방법은 현재 파라미터 세트 및 모델 파라미터들 (Parameter Set(i) 및 Model Parameter(j)) 의 조합에 대한 이론 예칭 프로파일을 생성하고 저장한다. 블록 488을 참조하라. "예칭 프로파일 생성 및 저장" 동작은 예칭 프로파일의 기본 컴포넌트들 표면과 같은 감소된 치수의 공간에 예칭 프로파일을 제공한다.

- [0061] 궁극적으로 모든 파라미터 세트들은 이 루프에서 고려된다. 이 지점 전에, 판단 블록 490은 남아 있는 부가적인 파라미터 세트들을 결정하고 제어는 파라미터 세트가 다음 파라미터 세트로 충분되는 블록 484로 돌아간다. 모델을 실행하는 프로세스 및 이론 예칭 프로파일들을 생성하고 저장하는 프로세스가 파라미터 세트들 (Parameter Set(i)) 각각에 대해 반복된다.
- [0062] 현재 고려중인 모델 파라미터들 (Model Parameters(j))에 대해 고려할 남아 있는 파라미터 세트들이 없다면, 프로세스는 이 루프를 나가고 이론 예칭 프로파일과 실험 예칭 프로파일 간 에러를 계산한다. 블록 492를 참조하라. 특정한 실시예들에서, 에러는, 프로세스 파라미터들 중 하나만이 아니라, 프로세스 파라미터들에 대한 모든 Parameter Sets(i)에 대해 결정된다.
- [0063] 방법은 모델 파라미터들에 대한 최적화 루틴이 수렴되는지 여부를 결정하기 위해 블록 492에서 결정된 에러를 사용한다. 블록 494를 참조하라. 이하에 기술된 바와 같이, 다양한 수렴 표준이 사용될 수 있다. 최적화 루틴이 수렴되지 않았다고 가정하면, 프로세스 제어는 방법이 모델의 예측 능력을 개선할 수 있는 새로운 모델 파라미터들의 세트 (Model Parameters(j))를 생성하는 블록 496으로 지향된다. 새로운 모델 파라미터들의 세트를 사용하여, 프로세스 제어는 블록들 484, 486, 488, 및 490으로 규정된 루프로 돌아간다. 이 루프에서, Parameter Sets(i)가 반복적으로 충분되고 매번 새로운 이론 예칭 프로파일을 생성하기 위한 모델이 실행된다. 모든 파라미터 세트들이 고려된 후, 이론 예칭 프로파일과 실험 예칭 프로파일 간 에러가 블록 492에서 다시 결정되고 수렴 표준이 다시 블록 494에서 적용된다. 수렴 표준이 아직 만족되지 않는다고 가정하면, 방법은 방금 기술된 방식으로 테스트하기 위해 또 다른 모델 파라미터들의 세트를 생성한다. 궁극적으로, 수렴 표준이 만족되는 모델 파라미터들의 세트가 선택된다. 그러면 프로세스가 완료된다. 즉, 도 4에 도시된 방법은 예칭 프로파일 모델의 예측 능력을 개선하는 모델 파라미터들의 세트를 생성한다.
- [0064] 관련된 절차는 도 4b에 도시된다. 도 4b에 도시된 바와 같이, 이론 예칭 프로파일 및 실험 예칭 프로파일은 상이한 프로세스 조건들 대신 상이한 기판 피처 구조체들에 대해 생성된다. 그 외 기본 프로세스 흐름은 동일하다. 일부 구현예들에서, 피처 구조체들 및 프로세스 조건들 양자는 실험 동작 및 이론적 동작에 대해 가변한다.
- [0065] 상이한 피처들은 상이한 "라인" 및 "피치" 기하구조를 포함할 수도 있다. 도 4ba를 참조하라. 피치는 수회 반복될 예칭될 피처를 커버하는 가장 작은 단위 셀 폭을 지칭한다. 라인은 대칭을 가정하여, 2개의 인접한 측벽들 간의 총 두께를 지칭한다. 예로서, 방법은 L50P100, L100P200, L100P300, L75P150 등의 반복하는 기하구조들을 실행할 수도 있고, 숫자들은 라인 폭 및 피치를 나노미터 단위로 나타낸다.
- [0066] 도시된 실시예에서, 프로세스 471은 예칭 프로파일 모델의 고정된 파라미터들을 선택하고 파라미터들 (모델 파라미터들)가변시킴으로써 시작한다. 이들은 일부 실시예들에서 물리적 및 화학적 반응 파라미터들일 수도 있다. 부가적으로, 기판 피처들이 선택된다. 동작 473을 참조하라.
- [0067] 피처 기하구조 각각 (동작들 475 및 481에 예시된 바와 같은 충분된 Feature Set(k))에 대해, 방법은 현재 피처 기하구조를 사용하기 위한 예칭 프로세스를 실행하고, 실험 예칭 프로파일 (Experimental Etch Profile(k))을 생성하고, 예칭 프로파일을 저장한다. 동작들 477 및 479를 참조하라. 이전과 같이, 실험 예칭 프로파일 각각은 감소된 차수의 표면으로 저장된다.
- [0068] 그 후, 방법은 튜닝을 위해 모델 파라미터들 (Model Parameters(j))을 초기화한다. 동작 483을 참조하라. 피처 기하구조 각각 (동작들 485 및 491에서 충분된 Feature Set(k))에 대해, 방법은 예칭 프로파일 모델을 실행하고, 이론 예칭 프로파일 (이론 예칭 프로파일(k))을 생성하고, 예칭 프로파일을 저장한다. 동작들 487 및 489를 참조하라. 이전과 같이, 이론 예칭 프로파일 각각은 감소된 차원 표면으로 저장된다.
- [0069] 동작들 487 및 489를 포함하는 루프에서 고려된 Model Parameters(j)의 세트 각각에 대해, 방법은 모든 기판 피처들 세트들에 대한 예칭 프로파일들 간 에러를 결정하도록 이론 예칭 프로파일과 실험 예칭 프로파일을 비교한다. 동작 493을 참조하라. 동작 495에서 결정된 바와 같이 프로세스가 수렴하면, 프로세스는 완료되고 현재 모델 파라미터들이 선택된다. 프로세스가 수렴되지 않으면, 방법은 새로운 Model Parameters(j)의 세트를 생성하고 다시 485, 487, 489, 및 491로 규정된 루프로 돌아간다.
- [0070] 일부 실시예들에서, 피처 세트 각각에 대해 분리된 모델 파라미터 세트가 선택된다. 이러한 경우들에서, 방법은 라인/피치 비간의 관계 (또는 피처들의 또 다른 특성들) 및 최종 수렴된 모델 파라미터들을 플롯팅하거나 그렇지 않으면 결정할 수도 있다. 수렴된 모델 파라미터 값들이, 아마도 일부 잡음과 함께 상당히 일정하면, 방법은 개선된 예지 프로파일 모델에 대해 평균 모델 파라미터 값들을 사용한다. 수렴된 모델 파라미터 값들이

경향을 나타내면, 방법은 피처 세트 각각 (예를 들어, 라인 및 피치 기하구조)에 대해 모델 파라미터 값들을 선택하도록 사용될 수도 있는 함수를 전개하는 다항식 피팅 (fit)을 사용할 수도 있다.

[0071] 자명한 바와 같이, 피처 세트들, 프로세스 파라미터 세트들, 또는 다른 변수들이 복수의 실험들을 수행하도록 사용되고 따라서 복수의 실험으로 결정된 예치 프로파일들을 생성한다. 일부 구현예들에서, 이들 예치 프로파일들 (및 연관된 파라미터 세트들)의 1/2 또는 일부 다른 분율 (fraction)이 상기 플로우차트들에 예시된 바와 같이 트레이닝을 위해 사용되고, 남아 있는 예치 프로파일들은 검증 (validation)을 위해 사용된다. 트레이닝 예치 프로파일들은 예치 프로파일 모델에서 사용되고 검증 세트들에 대한 예치 프로파일들을 예측하기 위해 투닝된 모델을 적용함으로써 검증된 투닝된 모델 파라미터들을 생성한다. 검증 세트에 대한 이론 예치 프로파일과 실험 예치 프로파일 간의 에러가 트레이닝 세트를 사용하여 수렴시 발견된 에러보다 통계적으로 보다 높다면, 이전과 같이 상이한 트레이닝 세트가 모델을 투닝하도록 사용된다.

[0072] 반복적 비-선형 최적화 절차에 관한 상세들

[0073] 도 3의 맥락에서 방금 기술된 모델 파라미터 최적화 절차는 일반적으로 반복적 비-선형 최적화 절차 -예를 들어, 이는 일반적으로 입력 파라미터들의 비-선형 함수인 에러 메트릭을 최적화한다- 이고, 이와 같이, 비-선형 최적화를 위해 당업계에 공지된 다양한 기법들이 채용될 수도 있다. 예를 들어: Biggs, M.C., "Constrained Minimization Using Recursive Quadratic Programming", Towards Global Optimization (L.C.W. Dixon and G.P. Szergo, eds.), North-Holland, pp 341-349, (1975); Conn, N.R., N.I.M. Gould, and Ph.L. Toint, "Trust-Region Methods", MPS/SIAM Series on Optimization, SIAM and MPS (2000); Moré, J.J. and D.C. Sorensen, "Computing Trust Region Step", SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, Vol. 3, pp 553-572, (1983); Byrd, R.H., R.B. Schnabel, and G.A. Shultz, "Approximate Solution of Trust Region Problem by Minimization over Two-Dimensional Subspaces", Mathematical Programming, Vol. 40, pp 247-263 (1988); Dennis, J.E., Jr., "Nonlinear least-squares", State of Art in Numerical Analysis ed. D. Jacobs, Academic Press, pp 269-312 (1977); Moré, J.J., "The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory", Numerical Analysis, ed. G. A. Watson, Lecture Notes in Mathematics 630, Springer Verlag, pp 105-116 (1977); Powell, M.J.D., "A Fast Algorithm for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations", Numerical Analysis, G.A. Watson ed., Lecture Notes in Mathematics, Springer Verlag, Vol. 630 (1978) 을 참조하라; 각각은 모든 목적들을 위해 전체가 참조로서 본 명세서에 인용되었다. 일부 실시예들에서, 이들 기법들은 입력 파라미터들 및/또는 에러 메트릭에 주어질 수도 있는 특정한 제약들을 겪은 객체 함수 (본 명세서에서 에러 함수)를 최적화한다. 특정한 이러한 실시예들에서, 제약 함수들 자체가 비-선형일 수도 있다. 예를 들어, 계산된 예치 프로파일을 EPM에 의해 출력된 스택된 사다리꼴들의 세트로 나타내는 실시예들에서, 에러 메트릭은 이들 스택된 사다리꼴들의 경계들로 나타낸 면적과 측정된 실험 예치 프로파일의 면적 간의 차로 규정될 수도 있다. 이 경우, 에러 메트릭은 PM에 의해 출력된 응답 변수들의 비-선형 함수이고, 따라서 제약된 최적화 기법은 비-선형 제약들을 허용하는 방금 기술된 기법들로부터 (그리고/또는 인용된 참조들로부터) 선택된다. 도 3에 제공된 플로우차트의 맥락에서, 이들 다양한 절차들은 하나 이상의 모델 파라미터들이 동작 360에서 수정되는 방법에 대응하고, 또한 동작 350에서 하나 이상의 잠재적 국부적인 최소 에러가 검출되고 처리되는 방법에 대응한다는 것을 주의한다.

[0074] 도 3에 도시된 바와 같이 개선된/투닝된 모델 파라미터들을 결정하기 위해 사용되는 반복적인 비-선형 최적화 절차는 복수의 페이즈들로 분할될 수도 있고, 이러한 특정한 실시예들에서, 상이한 최적화 페이즈들이 예치될 반도체 기판의 표면 상의 상이한 재료 층들에 대응할 수도 있다. 이러한 접근 방식은 또한 가변될 입력 파라미터들의 수를 감소시킴으로써 계산적 부담을 감소시킬 수도 있고 연산될 에러 메트릭을 단순화한다. 예를 들어, 예치될 기판이 상이한 순차적으로 증착된 재료들의 멀티-층 스택을 포함한다면, 상이한 층들은 일반적으로 상이한 재료 조성들을 갖기 때문에, 일반적으로 상이한 화학물질들이 층 각각에서 발생하는 국부적인 예치 프로세스를 특징으로 한다 -예를 들어, 상이한 예치 반응 (또는 반응들), 상이한 부 반응들, 부산물들 간의 상이한 반응들, 또는 동일한 (또는 유사한) 화학적 반응들이 발생하더라도, 반응들은 상이한 레이트들, 상이한 화학량론 비들, 등으로 발생할 수도 있다-. 따라서, 전체 멀티-층 스택에 대응하는 예치 프로파일 모델 (EPM)을 셋업하기 위해, 모델 내로 페딩된 입력 파라미터들은 일반적으로 상이한 스택된 층들에 대응하는 상이한 파라미터들의 세트들을 포함한다. 상기 기술된 바와 같이, 이들 세트들은 어떤 화학적 반응들이 예치 프로세스들의 모델링에 포함되는지를 나타내는 파라미터들, 뿐만 아니라 반응 자체들을 특징으로 하는 파라미터들 -반응 확률들, 부착 계수들, 등- 을 포함할 수도 있다.

[0075]

그러나, 최적화 프로토콜은 모든 파라미터를 동시에 최적화할 필요는 없고, 예를 들어 일부 파라미터는 도 3의 동작 360에서 고정된 채로 남는 한편, 다른 파라미터들은 "플로팅 (float)"하게 되고 도면에 개략적으로 예시된 바와 같이 1 회 이상의 특정한 최적화 사이클들/라운드들에서 수정될 수도 있다는 것이 인식된다. 따라서, 층 각각에서 발생하는 화학적 프로세스들이 이 층에 대해 국부적인 특정한 정도라는 관찰에 기초하여, 일부 실시예들에서, 최적화는 일 층과 연관된 모델 파라미터들을 개별적으로 튜닝함으로써 가속화될 수도 있는 한편, 고정된 다른 층들과 연관된 파라미터들을 훌딩하고, 그 후 또 다른 층을 선택하고, 다른 층들에 대해 고정되게 훌딩하는 동안 층의 파라미터들을 "플로팅"하게 하고, 모든 층들의 파라미터들이 개별적으로 튜닝될 때까지 계속된다. 그러면 층별 (layer-by-layer) 튜닝 프로세스가 복수 회 반복될 수도 있고, 특정한 정도의 최적화가 달성되고, 이 지점에서, 개별적으로 최적화된 층 각각과 연관된 파라미터들을 사용하여 보다 효과적으로 (그리고 아마도 에러 메트릭에서 보다 우수한 국부적인 최소값으로) 수렴될 것이라는 인식에 기초하여 모든 층들에 대한 완전한 최적화 -즉, 모든 층들에 대한 모델 파라미터들이 가변되고/"플로팅"되도록- 가 수행될 수도 있을 때까지 매번 모든 층들을 통해 순환된다. 한 단계 더 나아가, 전체 층별 절차는 결과들을 더 개선하도록 반복될 수도 있다 -즉, 층들을 통해 순환함으로써 층-특정 최적화를 1 회 이상 수행하고, 이어서 모든 층들의 모델 파라미터들로 하여금 플로팅하게 하는 전역 최적화를 수행-. 도 3의 맥락에서, 특정한 모델 파라미터들의 선택 및 이들로 하여금 "플로팅"하게 하는 것 (따라서 특정한 층에 대해 개별적으로 최적화되게 함)은 도 3의 파라미터 수정 동작 360 (이들 및 유사한 부류들의 실시예들에서) 의 일부로서 수행될 것이라는 것을 주의한다.

[0076]

전술한 개별 층별 최적화 절차를 예시하는 구체적인 예로서, 에칭 마스크 밑의 층의 에칭을 모델링하는 경우를 고려하면, 에칭 마스크 층 및 마스크 밑 층 양자가 어느 정도 에칭된다. 따라서, 이는 2-층 에칭 모델을 구성하고, 이는 2 층들 각각에 대한 파라미터들은 양 층들에 대응하는 모델 파라미터들의 완전히 동시적인 최적화 전에 개별적으로 최적화될 수도 있다.

[0077]

따라서, 모든 모델 파라미터들에 대한 값들을 명시하고, -상이한 실험 에칭 조건들을 나타내는- 입력 파라미터들의 값들의 세트들 모두에 대해 계산된 에칭 프로파일들을 생성하도록 모델을 실행하고, 그리고 독립 입력 파라미터들에 대한 복수의 값들의 세트들에 대응하는 모든 프로파일들에 대해 실험 에칭 프로파일과 계산된 에칭 프로파일 간의 차를 나타내는 에러 메트릭을 계산함으로써 시작된다. 이어서 개별 층-특정 최적화를 위한 에칭 마스크 밑 층 -소위 유전체 층- 을 선택하고, 이 최적화를 위한 (유전체) 층과 연관된 하나 이상의 모델 파라미터들을 수정하고, 독립 입력 파라미터들의 모든 값들의 세트들에 대해 모델을 재실행하고, 새로운 에러 메트릭을 연산하고, 유전체 층과 연관된 하나 이상의 모델 파라미터들을 다시 수정하고, 모델을 재실행하고, 에러를 재연산하고, 그리고 유전체 층에 대해 에러의 국부적 최소값이 획득될 때까지 계속함으로써 진행될 수도 있다.

[0078]

이어서 유전체 층에 대한 모델 파라미터들은 이들 값들로 고정된 채로 훌딩되고, 에칭 마스크 층의 모델 파라미터들은 개별 최적화를 위해 선택되고, (에칭 마스크 층의 모델 파라미터들의) 이들 값들 중 하나 이상이 수정되고, 모델이 재실행되고, 에러가 재연산되고, 에칭 마스크 층에 대해 에러 내 국부적 최소값이 달성될 때까지 계속된다. 이 지점에서, 양 층들의 모델 파라미터들의 완전한 최적화가 수행될 수도 있고, 또는 일부 실시예들에서, 이렇게 하기 전에, 개별 유전체 층 및 마스크 층 최적화의 하나 이상의 부가적인 사이클들은 완전한 최적화가 보다 효과적이도록 (예를 들어, 보다 고속으로 수렴하거나 층 에러 메트릭에 국부적 최소값을 보다 잘 발생시키도록 수렴) 수행될 수도 있다.

[0079]

일부 경우들에서, 전술한 층별 최적화 절차는 한번에 단일 개별 층만의 튜닝으로 제한될 필요는 없다는 것이 또한 이해되어야 한다. 예를 들어, 6-층 스택의 에칭을 모델링한다면, 전술한 층별 최적화 절차의 변동은 동시 튜닝 -즉, 인접한 층들의 쌍들에 대응하는 모델 파라미터들이 동시에 플로팅하는- 을 위한 층들의 쌍들을 선택할 것이고, 이어서 모든 층들에 대한 모델 파라미터들에 대한 완전한 동시 최적화를 수행하기 전에 3 쌍에 대해 순차적으로, 아마도 3-단계 사이클을 복수 회 반복하고; 이전과 같이, 선택가능하게, 전체 스택에 대해 에러의 국부적 최소값이 식별될 때까지 전체 층별 절차 (또는 이 경우, 쌍 단위 (pairwise) 층별 절차) 를 반복한다.

[0080]

수적 최적화 절차 (완전한 최적화 전에 층별 기준으로 수행되든 또는 모든 층들에 대한 완전한 최적화와 같이 직접적으로 수행되든) 는 최적화의 시작 지점, 뿐만 아니라 다른 인자들에 따라 (즉, 모델 파라미터들에 대해 선택된 초기 값들에 따라) 에칭 프로파일 메트릭의 복수의 국부적 최소값들을 발생시킬 수도 있고, 따라서 최적화 절차가 개선된 것 (그리고/또는 최적 모델) 을 나타내는 것으로 잠재적으로 식별할 수 있는 많은 국부적 최소값이 있을 수도 있다는 것이 또한 가능하다. 에러의 많은 국부적 최소값들의 경우, 많은 잠재적인 모델 파라미터들의 세트들이 이들 모델 파라미터들에 대한 물리적으로 실현가능한 하부 경계 및 상부 경계를 규정함으로써 고려사항으로부터 삭제될 수도 있다. 일부 실시예들에서, 전술한 수적 최적화들은, 복수의 국부적인 최소값들 및 따라서 가장 바람직한 (아마도, 일부 실시예들에서, 전술한 언급된 물리적으로 실현가능한 상부 경계와

하부 경계를 만족하는 모든 후보들 중 가장 낮은 계산된 에러 메트릭을 갖기 때문에) 모델 파라미터가 선택될 수도 있는, 모델 파라미터들의 복수의 후보 세트들을 잠재적으로 식별하기 위해 시작 지점들 (모델 파라미터들에 대한 초기 값들)에 대한 복수의 선택들에 대해 수행될 수도 있다.

#### [0081] 치수 감소 및 기본 컴포넌트 분석

일부 실시예들에서, 에칭 프로파일 모델은 연산된 에칭 프로파일 진화 동안 시간 단계 각각에서 큰 수의 그리드/메쉬 지점들 (셀들)의 값들을 출력한다. 셀 또는 그리드 지점 각각에 대응하는 이들 값들은 연산된 에칭 프로파일과 맵핑한다. 이러한 계산된 에칭 프로파일을 나타내는 그리드/메쉬의 지점들의 예가 도 1에 예시되고, 여기서 그리드/메쉬 지점 각각은 공간의 영역이 에칭 프로세스 동안 이 시점에 피처에 의해 점유되는지 여부를 나타내는 값을 갖는다. 일부 실시예들에서, 에칭 프로파일을 나타내는 메쉬의 수직 치수는 적어도 약 5, 또는 적어도 약 10, 또는 적어도 약 20이다. 실시예에 따라, 수직으로 인접한 메쉬 지점들 간 수직 거리에 대한 최소 값은 1 Å으로 선택될 수도 있고, 수 Å, 예컨대 5 Å, 또는 10 Å, 또는 심지어 20 Å만큼 를 수 있다.

실제로, 피처의 형상의 상당히 정확한 표현이 (프로파일의 복잡도에 따를 것 같이) 시간에 따라 진전되기 때문에 이를 제공하기에 충분히 작도록, 그러나 (보다 땅은 그리드 지점들은 보다 많은 계산 시간을 수반하기 때문에) 이 합리적인 표현을 달성하는데 필요한 것보다 훨씬 (또는 전혀) 보다 작지 않게 인접한 메쉬/그리드 지점들 간의 거리를 선택할 것이다. (웨이퍼의 평면에서) 인접한 메쉬/그리드 지점들 간 수평적 분리는 동일한 고려사항들에 기초하여 선택될 것이지만, 일반적으로 수평적 및 수직적 분리는 동일하게 (즉, 균일한 그리드) 또는 거의 필적하게 선택될 것이다. 이는 수직 및 수평 그리드 치수들이 반드시 동일해야 한다는 것을 의미하지 않지만, 모델링되는 피처의 폭은 모델링되는 피처의 높이와 같을 필요는 없다. 따라서, 수평 치수 (미리 결정된 방향에 걸치는 (span) 수평 지점들의 수, 2D에서 x-치수 및 3D에서 x-치수 및 y-치수)는 단지 피처의 측벽이 모델링되는지 여부, 전체 피처 (일 프로파일 에지로부터 또 다른 프로파일 에지에 걸치는) 가 모델링되는지 여부, 복수의 인접한 피처들이 모델링되는지 여부, 등에 따를 수도 있다.

언급된 바와 같이, 에칭 프로파일 모델에 의해 출력된 값들의 메쉬는, 물리적 공간에서, 피처 프로파일의 에지가 상이한 수직 상승부들에 위치된다는 추정을 제공한다. 이 정보로부터 (메쉬 지점들에서 이들 지점들로부터) 상이한 상승부들에서 피처 폭, 또는 또 다른 관점에서, 상승부 각각에 대한 (일부 기준에 대한) 에치의 수평 좌표를 계산할 수 있다. 이는 도 2에 예시된다. 그 후 이 좌표들의 세트는 특정한 피처 프로파일을 나타내는 다차원 공간의 지점으로 보여질 수도 있다. 이 벡터 공간은 직교 공간일 수도 있고, 또는 비-직교 공간일 수도 있지만, 선형 변환의 직교 공간에 대한 이 표현으로 이루어질 수도 있다. 그렇다면, 변환된 지점의 좌표들은 이 공간에서 직교 축들의 세트와 관련된 거리들이다. 어떤 경우든, "프로파일 좌표들"이 이 문서에서 참조될 때, 이는 일반적으로 프로파일 형상의 임의의 적절한 (근사적인) 수학적 표현을 지칭한다.

어떠한 경우든, 에칭 프로파일 모델은 많은 수의 "프로파일 좌표들" (이하 방금 기술된 그리드/메쉬의 지점들을 포함)을 출력할 수도 있고 목적이 측정된 실험 에칭 프로파일들을 정확하게 매칭하는 것이기 때문에, 에칭 프로파일 모델의 에러를 감소시키는 -상기 도 3에 대해 기술된 바와 같이 상이한 실험 프로세스 조건들에 대해 결합된 에러를 반복적으로 감소시키는- 것이 계산적으로 요구되는 태스크일 수도 있다. 예를 들어,  $m$  개의 측정된 실험 에칭 프로파일들의 세트가  $n$  개의 프로파일 좌표들로 구성된 연산된 에칭 프로파일들에 지점별로 (point-by-point) 매칭되면, 이는 데이터 세트를  $m \times n$  데이터 지점들에 피팅하도록 모델을 최적화하는 것에 이른다.

그러나, (측정되거나 연산된) 에칭 프로파일들에 잠재적인 통계적 상관관계들이 있고, 훨씬 보다 수직으로 다른 기 쉬운 (tractable) 형태의 최적화 문제를 재구성하도록 (recast) 이들 상관관계들을 이용할 수도 있다는 것이 드러났다. 예를 들어, 프로파일 좌표들의 정밀한 그리드가 통계적 관점으로부터 많은 데이터 지점들로 구성될 수도 있지만, 이들 좌표들의 특정한 조합들의 값들은 서로 상관된다. 사소하지만 예시적인 예를 제공하기 위해, 수직으로 인접한 좌표들은 서로 상관되는 경향이 있다 -단순히, 그리드 지점이 프로파일 위 아래로 이동함에 따라, 에칭된 피처의 폭이 인접한 그리드 지점들과 연관된 짧은 길이 스케일에 대해 매우 급격하게 변화하지 않기 때문에-. 프로파일 좌표들 간의 상관관계들의 보다 복잡한 예들은 일반적으로 프로세스 좌표들의 특정한 조합들을 가변함으로써 달성될 수도 있는 타입들의 프로파일 형상들과 관련된다. 몇몇 예들이 도 5에 도시된다. 예를 들어, 특정한 프로세스 파라미터들은, 단독으로 또는 서로 조합하여, 에칭된 프로파일로 하여금 도 5에 도시된 바와 같이 내측으로 또는 외측으로 보우 (bow) 하게 하도록 조정될 수도 있고, 따라서 프로파일의 이 보잉 (bowing) 과 맵핑하는 프로파일 좌표들 (또는 그리드 지점들)은 서로 통계적으로 상관된다. 유사하게, 또한 도 5에 도시된 바와 같이, 다양한 프로세스 파라미터들의 조정을 통해 획득된 에칭 프로파일들

은, 개별적으로 또는 조합하여, 하측 테이퍼 또는 상측 테이퍼를 나타낼 수도 있고, 따라서 프로파일 좌표들은 하나 이상의 프로세스 파라미터들을 가변하는 것이 이 테이퍼링 효과를 유발하는 정도와 상관될 수도 있다. 기본적인 프로파일 상관 구조들의 2 개의 다른 예들은 또한 도 5에 예시된 바와 같이 상단 테이퍼 및 하단 테이퍼이다. 다시, 이들 기본적인 프로파일 구조는 프로세스 파라미터들의 변동들이 다른 스팟들에는 영향을 주지 않고 프로파일 상의 특정한 스팟들에서 국부적인 영향을 갖기 보다는 프로파일의 전체 형상에서 변화들을 유발하는 경향이 있다는 사실의 정후들이다. 이는 물론, 예칭 프로세스와 연관된 기본적인 물리 및 화학의 결과이다.

[0087]

언급된 바와 같이, 이들 기본적인 통계적 상관관계들 때문에, (도 3의 플로우차트에 대해 기술된) 상기 제시된 최적화 문제는 반복적인 최적화 기법들을 보다 잘 받아들이는 (amenable) 형태로 재구성될 수 있다. 이렇게 하는 일 방식은 몇몇 타입들의 기준 프로파일 형상들을 식별하고, 이들 기준 형상들의 면에서 측정된 그리고/또는 계산된 예칭 프로파일을 표현하는 -예컨대 (프로파일 좌표 각각에서) 기준 프로파일 형상들의 세트의 가중된 평균으로서 (프로파일 좌표 각각에서) 총 프로파일을 작성함으로써- 것이다. 즉, 벡터들의 세트는 기준 프로파일 형상들을 나타내고, 총 프로파일은 이들 벡터들의 선형 조합으로 근사적으로 표현될 수도 있다. 이 방식으로, 기본적인 통계적 상관관계들 및 모든 개별 프로파일 좌표들의 모델 변화들 대신, 프로파일을 나타내는 선형 조합의 계수들/가중치들의 모델 변화들을 이용할 수 있다. 예를 들어, 원형 (canonical) 형상들로서 보우 및 테이퍼 (도 5 참조)를 선택하면, 그러면 모델링의 문제는  $m = 100$  프로파일 좌표들이 선형 조합의 보우 및 테이퍼에 대한 2 개의 계수들의 변화들을 모델링하는 -즉, 100으로부터 2로 치수 감소를 구성하는- 것으로 감소된다고 한다. 어떤 기준 형상들이 유용한지는 프로세스/총 타입에 따를 수도 있다. 도시된 방법들은 실험 데이터로부터 또는 EPM들을 사용하여 시뮬레이션들을 수행하는 것으로부터 이들 형상들을 추출하는 수치적인 방식을 제공한다.

[0088]

이 전략이 유효화되도록, 기준 형상들은, 분석에 수반된 상이한 프로파일 형상들의 정확하지 않지만, 우수한 표현을 제공해야 한다. 보다 독립 기준 형상들이 이 표현에 포함되고, (기준 형상들의 벡터 공간에서) 보다 정확한 표현일 것이다. 따라서, 어떤 기준 형상들이 사용되는지, 그리고 얼마나 많이 포함할지의 문제는, 보다 많은 기준 형상들을 포함하는 것은 분석이 보다 정확하게 하지만 또한 보다 계산적으로 비용이 많이 들게 한다는 것을 인식하고, 반복적인 최적화의 맥락에서, 수렴하거나 바람직하게 국부적인 최소값으로 수렴하는 최적화 능력에 영향을 줄 수도 있다.

[0089]

이렇게 하는 일 방식은 프로세스 엔지니어들로 하여금 이들의 과거 경험에 기초하여, 관찰한 몇몇 타입들의 기준 프로파일 형상들을 이들의 예칭 실험들에서 빈번하게 발생하는 것으로 식별하게 하는 것이다. 이 방식의 장점은 단순하다는 것이다. 잠재적인 단점은 이 방식이 (단순히 프로세스 엔지니어의 경험 및 직관에 기초하는) 임시 방편적이고, 충분한 수의 프로파일 형상들이 분석에 포함된 때를 결정하는 어떠한 방식도 제공하지 않는다는 것이다. 실제로, 프로세스 엔지니어가 식별한 모든 기준 프로파일 형상이 포함될 것이지만, 이는 물론 정확한 표현을 제공하기에 불충분할 수도 있다. 보다 중요한 것은, 이 타입의 방법론은, 이전의 작업에서 형상이 공표 (pronounce) 되지 않기 때문에 또는 발생한 기본적인 물리적 및 화학적 프로세스들과 상이한 새로운 예칭 프로세스의 결과이기 때문에, 이전에 식별되지 않은 프로파일 데이터의 새로운 상관관계들을 식별하지 않을 것이다.

[0090]

또 다른 접근 방식은 중요한 기준 프로파일 형상들을 자동으로 식별할 수 있는 통계적 방법론에 대한 치수 감소 절차에 기초할 뿐만 아니라 충분히 정확한 표면을 제공하기 위해 얼마나 많은 형상들이 포함되어야 하는지의 추정을 제공하는 것이다. 이를 달성하기 위한 일 데이터 분석 기법은 기본 컴포넌트 분석 (PCA)이고, 이는 SVD (singular value decomposition), 수직 선형 대수로부터 매트릭스 분해 기법을 사용한다. PCA 기법 및 다양한 적용예들의 기술은 (예를 들어) : Jackson, J. E., "A User's Guide to Principal Components", John Wiley and Sons, p. 592. [2] (1991); Jolliffe, I. T., "Principal Component Analysis", 2nd edition, Springer (2002); Krzanowski, W. J., "Principles of Multivariate Analysis: A User's Perspective", New York: Oxford University Press (1988) 에서 발견될 수도 있고; 이들 각각은 모든 목적들을 위해 전체가 참조로서 분명세서에 인용된다.

[0091]

전술한 참조문헌들에 기술된 바와 같이, PCA는 입력으로서 벡터들의 세트 -이 경우 벡터 각각은 단일 프로파일을 나타내는 일련의  $n$  예칭 프로파일 좌표들이 되는- 를 취하고, 기본 컴포넌트들 (PC)  $1-i$  (여기서  $i \leq n$ ) 가 입력 프로파일 벡터들을 나타내기 위한 "최상의"  $i$ 차원 부분 공간을 구성하도록 소팅 (sort) 될 수도 있는 PC들로 공지된 새로운  $n$ 개의 직교 벡터들의 세트를 반환 (return) 하고; "최상의"는 최소 제곱의 관점에서 통계적으로 최적을 의미한다 -즉, PCA로부터 결정된 PC들의  $i$ 차원 부분 공간은 입력 벡터 각각과 선택된 PC들의 부분 공간 내 선형 표현 간의 결합된 RMS 에러를 최소화한다-. 물론, 보다 많은 PC들이 포함되면, 부분 공간은 보다 큰

차원이고 입력 프로파일 데이터의 표현이 보다 우수하지만, PCA를 통해 구성된 서브 공간이 최적이기 때문에, 많지 않은 PC들이 요구된다고 예상된다 -그리고 부가적인 PC를 부가함으로써 캡처된 기본적인 데이터의 통계적 변동량은 기본적인 SVD의 단일 값들을 통해 평가될 수도 있다-. 따라서, 에칭 프로파일들의 데이터세트를 기초로 하는 기준 프로파일 형상들을 식별하도록 PCA를 사용함으로써, 에칭 프로파일들을 나타내기 위해 감소된-치수 선형 모델을 구성할 수 있고, (프로세스 엔지니어의 전문성에 의존하지 않는) 자동화되고 프로파일 데이터의 새로운 상관관계들을 식별하는 능력을 갖는 방식으로 그리고 우수한 표현을 제공하기 위해 얼마나 많은 형상들/치수들의 통계적 추정을 제공하는 방식으로 한다.

[0092]

전술한 방법론의 결과는 상당한 통계적 에러를 절충하지 않고 상당한 치수 감소가 달성될 수도 있고, 상기 기술된 수적 최적화 절차에 피팅하기 위해 필요한 데이터 지점들의 수가 실질적으로 감소될 수도 있다는 것이다. 도 3에 제시된 최적화 절차에서 치수 감소 PCA 절차를 구현하기 위한 상이한 실현가능 전략들이 있다는 것을 또한 주의한다. 예를 들어, 에러 메트릭이 도 3의 동작 340에서 연산되는 방식의 맥락에서, 치수 감소 절차를 채용하는 일 방식은 계산된 에칭 프로파일 및 대응하는 실험 에칭 프로파일을 개별적으로 (PCA를 통해 구성될 수도 있는) 감소된-치수의 부분 공간으로 사영하고, 이어서 부분 공간 상으로 사영된 프로파일들 간의 차를 연산하는 것이다. 또 다른 방식은 계산된 에칭 프로파일과 실험 에칭 프로파일 간 차들을 취하고, 이 차들을 실험 에칭 프로파일과 연산된 에칭 프로파일 간 잡재적인 차들을 나타내는 감소된 치수의 부분 공간 상으로 사영하고, 차-부분 공간에서 이들 벡터들의 결합된 길이들로서 총 에러 메트릭을 보는 것이다.

[0093]

PCA는 또한 방금 기술된 것과 유사한 이점을 제공하는 독립 입력 파라미터들의 공간에서 독립 파라미터들의 수를 치수적으로 감소시키도록 사용될 수도 있다는 것을 부가적으로 주의한다. 일부 실시예들에서, 치수 감소 절차는 프로파일 좌표 공간 및 입력 파라미터 공간 양자에 동시에 예를 들어, 입력 파라미터들 및 대응하는 측정된 에칭 프로파일들의 연쇄된 벡터들에 대해 PCA를 수행함으로써 같이, 적용될 수도 있다.

[0094]

최적화된 컴퓨터화된 에칭 모델의 적용예들

[0095]

본 명세서에 개시된 최적화된 컴퓨터화된 에칭 모델들은 에칭 프로세스의 상세한 평가 및 특징화가 바람직한 반도체 프로세싱 워크플로우들에서 유용할 수도 있다. 예를 들어, 새로운 에칭 프로세스가 전개된다면, 모델은 실험실로 가고 실험 각각을 개별적으로 수행할 필요 없이 프로세스 파라미터들의 많은 조합들에 대한 에칭 프로파일 특징들을 결정하도록 사용될 수도 있다. 이러한 방식으로, 최적화된 에칭 프로파일 모델들은 보다 신속한 프로세스 전개 사이클들을 인에이블할 수도 있고, 일부 실시예들에서 타깃 프로파일을 정밀 튜닝하기 위해 요구되는 작업량을 상당히 감소시킬 수도 있다.

[0096]

리소그래피 동작들 및 마스크 현상은, 예지 배치 에러를 추정하는 것이 통상적으로 리소그래피 작업에서 꽤 중요하고, 프로파일 형상의 정확한 연산은 이 정보를 제공하기 때문에 정확한 에칭 프로파일 모델링으로부터 또한 상당히 유리할 수도 있다.

[0097]

본 명세서에 개시된 최적화된 모델들은 또한: 구체적인 타깃 에칭 프로파일을 목표로 하고 이를 달성하기 위해 프로세스 파라미터들 (또는 EPM 입력 파라미터들)의 하나 이상의 특정한 조합들을 발견하기 원하는 상호 간의 문제를 해결하기 위해 유용할 수도 있다. 다시, 이는 실험적 시도 및 에러에 의해 이루어질 수 있지만, 미리 결정된 프로세스 파라미터들 (또는 EPM 입력 파라미터들)의 세트 및 조건들로부터 발생되는 에칭 프로파일의 정확한 모델링은 실험에 대한 필요성을 대체할 수 있고, 또는 전체 실험적 연구에 대해 우수한 후보자들이 식별될 수도 있을 때까지, 적어도 프로세스/입력 파라미터 공간을 탐구하는 초기 페이즈들에서 그렇게 한다. 일부 실시예들에서, 완전히 자동화된 방식으로 사실상 모델을 수적으로 인버팅 (invert) 하는 것이 가능할 수도 있다 -즉, 미리 결정된 에칭 프로파일을 생성하는 파라미터들의 세트를 반복적으로 위치시킨다-. 다시 한번, (PCA를 통한) 에칭 프로파일 좌표 공간의 치수 감소, 및 이 공간 상으로 목표된 에칭 프로파일의 사영은 이 수적 인버팅을 보다 실현가능하게 할 수도 있다.

[0098]

특정한 실시예들에서, 최적화된 EPM은 에칭기 장치와 통합되거나 하나 이상의 에칭기 장치들을 배치하는 반도체 제조 설비의 인프라스트럭처 내로 통합될 수도 있다. 최적화된 EPM은 목표된 에칭 프로파일을 제공하도록 또는 에칭 프로파일에 대한 프로세스 파라미터들의 변화의 효과를 이해하도록 프로세스 파라미터들에 대한 적절한 조정들을 결정하도록 사용될 수도 있다. 따라서, 예를 들어, 제조 설비 내에서 반도체 기판들을 프로세싱하기 위한 시스템은 반도체 기판들을 에칭하기 위한 에칭기 장치를 포함할 수도 있고, 에칭기 장치 동작은 최적화된 EPM을 구현하는 제어기에 의해 제어되는 독립 입력 파라미터들의 세트에 의해 조정된다. 이하에 기술된 바와 같이, 에칭기 장치의 동작을 제어하기 위해 적합한 제어기는 통상적으로 프로세서 및 메모리를 포함하고, 메모리는 최적화된 EPM을 저장하고, 프로세서는 입력 프로세스 파라미터들의 세트의 미리 결정된 값들의 세트에 대

한 예칭된 피처 프로파일들을 계산하기 위해 저장된 EPM을 사용한다. 프로파일을 계산한 후, 일부 실시예들에서, 제어기는 (계산된 프로파일의 형상에 응답하여) 독립 입력 파라미터들의 세트의 하나 이상의 값들을 가변함으로써 예칭기 장치의 동작을 조정할 수도 있다.

[0099] 일반적으로, 개시된 최적화된 EPM들에 사용될 수도 있는 예칭기 장치는 반도체 기판들의 표면으로부터 재료를 제거함으로써 반도체 기판들을 예칭하기 적합한 임의의 종류의 반도체 프로세싱 장치일 수도 있다. 일부 실시예들에서, 예칭기 장치는 유도 결합 플라즈마 (ICP) 반응기를 구성할 수도 있고; 일부 실시예들에서, 예칭기 장치는 용량 결합 플라즈마 (CCP) 반응기를 구성할 수도 있다. 따라서, 이를 개시된 최적화된 EPM들에 사용하기 위한 예칭기 장치는 프로세싱 챔버, 프로세싱 챔버 내에 기판을 홀딩하기 위한 기판 홀더, 및 프로세싱 챔버 내에서 플라즈마를 생성하기 위한 플라즈마 생성기를 가질 수도 있다. 장치는 하나 이상의 프로세스 가스들을 프로세싱 챔버 내로 흘리기 위한 하나 이상의 밸브로 제어된 프로세스 가스 유입부들, 프로세싱 챔버로부터 가스들을 배기하기 위해 하나 이상의 진공 펌프들에 유체적으로 연결된 하나 이상의 가스 유출부들, 등을 더 포함할 수도 있다. 예칭기 장치들 (또한 일반적으로 예칭 반응기들 또는 플라즈마 예칭 반응기들, 등으로 지칭됨)에 관한 추가 상세들은 이하에 제공된다.

#### [0100] 반사율 스펙트럼 매칭 기법에 의한 예칭 프로파일 모델들의 최적화

[0101] 본 명세서에 개시된 예칭 프로파일 (EP) 모델 (EPM) 최적화 기법들은 또한 반사율 스펙트럼 공간 또는 스펙트럼 반사율들의 공간으로부터 도출된 감소된 치수의 부분공간 (RDS)에서 수행될 수도 있다. 즉, EPM 최적화는 (EPM을 사용하여 생성된) 연산된 반사율 스펙트럼을 실험으로 측정된 반사율 스펙트럼을 매칭함으로써 이루어지고, 스펙트럼 각각은 일련의 과장들에서 기판 표면 상의 예칭된 피처로부터 반사된 전자기 복사의 강도를 나타낸다. (EPM을 통해 생성된 스펙트럼 및 실험으로 측정된 스펙트럼 양자를) 최적화하기 위해 사용된 반사율 스펙트럼의 세트는 또한 예칭 시간 단계들의 시퀀스 (즉, 예칭 프로세스 또는 프로세스들의 상이한 시간 스냅샷들을 나타냄)에 대응할 수도 있다. 상기 상세히 논의된 바와 같이, EPM들은 대체로 예칭 프로세스 동안 시간 맞춰 진전됨에 따라 이론 예칭 프로파일을 계산하고, 따라서 최적화의 상이한 예칭 시간 단계로부터의 반사율 스펙트럼을 포함함으로써, 최적화된 모델은 최적화에 사용된 예칭 시간들의 시퀀스 동안 통계적으로 유효하다.

[0102] 스펙트럼 매칭 (SM) 최적화 절차는, 예를 들어 도 3을 참조하여, 상기 기술된 일반적인 EPM 최적화 프레임워크를 따르고, 예칭 프로파일 좌표들 대신 스펙트럼 반사율들의 관점에서 SM 최적화가 동작하는 것이 차이이다. -EPM의 통상적인 출력은 일련의 예칭 프로파일 좌표들로 나타낸 계산된 예칭 프로파일이기 때문에- 이렇게 하기 위해, 상기 계산된 예칭 프로파일로부터 전자기 복사 (EM)의 반사를 시뮬레이팅함으로써 계산된 반사율 스펙트럼을 생성한다. "RCWA (rigorous coupled wave analysis)"가 이 목적을 위해 사용될 수도 있는 일 계산적인 프로세스를 구성하는 것으로 당업계에 공지되었지만, 고려 중인 기판 피처와 EM 복사의 상호작용을 시뮬레이팅하기 위해 모든 적합한 절차가 채용될 수도 있다.

[0103] 어떠한 경우든, EPM으로부터 반사율 스펙트럼을 생성하는 능력을 사용하여, 일반적인 절차는 스펙트럼 반사율들의 관점에서 상기 EPM을 최적화하기 위해 구현될 수도 있다. 이는 예칭 프로파일 모델을 최적화 및/또는 튜닝하기 위한 동작들 (601)의 세트를 예시하는 플로우 차트를 제공하는 도 6에 대해 이제 기술된다.

[0104] 상기와 같이, 그리고 일부 실시예들에서, 이러한 튜닝 및/또는 최적화된 모델은 예칭 실험들을 수행한 결과로서 측정된 예칭 프로파일들과 모델로부터 생성될 때 대응하는 계산된 예칭 프로파일들 간의 결합된 차들에 관련되는 (나타내는, 인정하는, 등) 메트릭을 감소 -그리고 일부 경우들에서 실질적으로 최소화- 시킨다. 즉, 개선된 모델은 (-EPM에 대한 독립 입력 파라미터들을 계산하도록 사용된- 선택된 프로세스 파라미터들의 상이한 명시된 값들의 세트들에 의해 지정된 바와 같은) 상이한 실험 프로세스 조건들에 대해 결합된 에러를 감소시킬 수도 있다.

[0105] 도 6에 도시된 바와 같이, 반사율 스펙트럼-기반 최적화 절차 (601)는 최적화될 모델 파라미터들의 세트의 선택 및 모델 파라미터들의 초기 값들의 명세를 사용하여 동작 (610)에서 시작된다 -다시, 이를 모델 파라미터들은 기본적인 화학적 프로세스 및 물리적 프로세스를 특징으로 하는 파라미터들 (반응 확률들, 부착 계수들, 등) 이도록 선택될 수도 있고, 이를 파라미터들 중 일부 또는 전부는 모델을 개선하도록 실험 데이터에 기초하여 조정될 것이다-. 초기 값들은 문헌에서 발견될 수도 있거나, 다른 시뮬레이션들에 기초하여 연산될 수도 있거나, 실험으로부터 결정될 수도 있거나, 이전의 최적화 절차들로부터 공지되는 등 할 수도 있다.

[0106] 동작 (610)에서 선택되고 초기화된 모델 파라미터들은 이어서, 동작 (620)에서 선택되고 미리 결정된 복수의 값들의 세트들인 독립 입력 파라미터들의 세트에 대해 최적화된다. 이러한 독립 입력 파라미터들은 예를 들어,

반응 챔버 내 플라즈마를 특징으로 하는 파라미터들: 온도, 에천트 플럭스, 플라즈마 밀도, 등을 포함할 수도 있다. 동작 (630) 에서 독립 입력 파라미터들의 값들의 조합 각각에 대해, 실험 예칭 반사율 스펙트럼을 측정하기 위해 예칭 실험이 수행된다. (일부 실시예들에서, 복수의 예칭 실험들은 입력 파라미터들에 대한 값들의 동일한 조합으로 수행되고, 발생되는 반사율 스펙트럼 측정치들은 예를 들어, 함께 (가능하면 이상점들 (outliers), 잡음 스펙트럼, 등을 폐기한 후) 평균된다.) 이어서 이 벤치마크들의 세트는 다음과 같이 모델을 튜닝 및 최적화하기 위해 사용된다: 동작 (635) 에서, 예칭 프로파일을 산출하도록 EP 모델을 실행함으로써 계산된 반사율 스펙트럼의 세트가 생성되고 -동작 (630) 으로부터 측정된 스펙트럼에 대응하고 따라서 입력 파라미터들의 값들의 조합 각각에 대해 생성됨-, 그리고 이어서 상기 기술된 바와 같이 (예를 들어, RCWA를 사용함으로써) 스펙트럼 반사율들로 계산된 예칭 프로파일들을 변환한다. 이 때, 대응하는 실험 반사율 스펙트럼 및 독립 입력 파라미터들에 대해 선택된 값들의 세트 각각에 대해 생성된 계산된 반사율 스펙트럼이 있어서, 비교에 적합하다. 입력 파라미터들에 대한 상이한 값들의 세트들 모두에 대한 실험 반사율 스펙트럼과 계산된 반사율 스펙트럼 간 차를 나타내는 (관련되는, 인정하는, 등) 에러 메트릭이 연산되는, 640에서 비교가 이루어진다.

[0107] 도 6에 대해 상기 기술된 바와 유사하게, 이 (에러 메트릭이 연산되는) 계산된 반사율 스펙트럼들의 세트는 동작 (610) 에서 명시된 바와 같이 이전에 선택된 모델 파라미터들의 세트에 대응한다. 최적화 절차의 목적은 이들 모델 파라미터들에 대해 보다 효과적인 선택들을 결정하는 것이다. 따라서, 동작 (650) 에서, 현재 명시된 모델 파라미터들이 (모델 파라미터들의 공간의 관점에서) 동작 (640) 에서 연산된 에러 메트릭이 국부적으로 최소화되는 모델 파라미터들인지 여부가 결정되고, 그렇지 않다면, 모델 파라미터들의 세트의 하나 이상의 값들은 동작 (660) 에서 수정되고, 이어서 새로운 반사율 스펙트럼의 세트를 생성하도록 사용-도 6의 플로우차트에 개략적으로 나타낸 바와 같이 동작 (635) 을 반복-되고, 그 후 새로운 에러 메트릭이 동작 (640) 의 반복시 연산된다. 이어서 프로세스는 새로운 모델 파라미터들의 조합이 에러 메트릭에 의해 평가될 때 입력 파라미터들의 모든 세트들에 대해 국부적인 최소값을 나타내는지 여부가 결정되는 동작 (650) 으로 다시 진행된다. 그렇다면, 최적화 절차는, 도면에 나타낸 바와 같이, 종료된다. 그렇지 않다면, 모델 파라미터들은 동작 (660) 에서 다시 수정되고 사이클이 반복된다.

[0108] (전술한 방식으로) 상이한 시간 지속기간들의 예칭 프로세스들에 대해 또는 예칭 프로세스 동안 시간들의 시퀀스들로 반사율 스펙트럼을 계산하기 위해 EPM이 최적화되는 것이 목표된다면, EPM을 최적화하도록 사용된 실험 반사율 스펙트럼이 예칭 프로세스 동안 광학적 측정치들로부터 정확하게 결정될 수도 있는 정도가 고려된다. 관련된 이슈들은 이들 측정들이 예칭 프로세스 동안 수행될 수도 있는 레이트이다.

[0109] 일반적으로, 스펙트럼 반사율의 측정들은 인시츄로 또는 엑스시츄로 (*ex situ*) 수행될 수도 있다. 엑스시츄 측정들이 외부의 전용 계측 툴 (예칭 챔버 외부) 의 채용으로 인해 일반적으로 보다 정확하지만, 이러한 측정들은 예칭 챔버로부터 웨이퍼가 제거되고 따라서 툴을 활용하기 위해 예칭 프로세스가 정지될 것을 요구한다. 예칭 프로세스를 정지하고 재시작하는 것이 연속적인 지속기간의 예칭 프로세스에 대한 모든 종류들의 시스템적인 에러들을 야기하기 때문에, 상이한 예칭 시간들의 시퀀스 동안 엑스시츄로 반사율 스펙트럼을 측정하는 것은 일반적으로 상이한 목표된 지속기간에 대해 상이한 웨이퍼들의 시퀀스 각각을 예칭하고 이어서 각각으로부터 반사율을 개별적으로 측정하는 것을 수반한다. 한편, 인시츄 스펙트럼 반사율 측정들은 진행중인 예칭 프로세스를 중단하지 않고 연속적으로 (또는 실질적으로 연속적으로, 또는 적어도 매우 신속하게) 이루어질 수도 있고, 따라서 단일 웨이퍼는 예칭 시간들의 시퀀스에 대응하는 반사율 스펙트럼을 생성하도록 사용될 수 있다 (이는 또한 반사율 스펙트럼의 예칭 시간-의존성을 나타내는 것으로 해석될 웨이퍼-대-웨이퍼 변동 가능성을 제거한다 (또는 적어도 감소시킨다)). 그러나, 웨이퍼-대-웨이퍼 변동 외에, 다양한 이유들로, 인시츄 스펙트럼 반사율 측정치들은 전용 외부 계측 툴이 사용될 때보다 덜 정확한 경향이 있다.

[0110] 그러나, 엑스시츄 및 인시츄 스펙트럼 반사율 측정들 각각의 단점들을 갖지 않는 엑스시츄 및 인시츄 스펙트럼 반사율 측정들 양자의 장점들을 (적어도 일정한 정도로) 획득하는 방식이 본 명세서에 개시된다. 특히, 전용 계측 툴을 사용하여 취해진 엑스시츄 측정치들을 사용하여 캘리브레이팅되는 (EPM을 최적화하도록 목표된 예칭 시간들의 시퀀스에서) 진행중인 예칭 프로세스를 동안 취해진 고속 인시츄 스펙트럼 반사율 (광학적) 측정치들로부터 생성된 EPM을 최적화하기 위해 실험 반사율 스펙트럼을 사용하는 것이 전략이다.

[0111] 이는 다음과 같이 행해질 수도 있다. 목표된 예칭 시간들의 시퀀스를 커버하는 지속기간 동안 하나 이상의 웨이퍼들이 예칭되고, 진행중인 예칭 프로세스들 내내 스펙트럼 반사율 광학적 측정들이 인시츄로 취해진다. 측정 레이트는, 예를 들어 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10, Hz, 15 Hz, 20 Hz, 50 Hz, 또는 심지어 100 Hz의 주파수로 매우 신속할 수도 있다. 일부 실시예들에서, 예칭 시간들의 시퀀스의 적어도 일부에 대해 연속하는 예칭 시간들에 취해진 광학적 측정치들은 0.01 내지 1 초로 분리되고 (즉, 100 Hz 내지 1 Hz의 주파수), 또는 0.05 내지

0.5 초로 분리된다 (즉, 20 Hz 내지 2 Hz의 주파수). 개별적으로, 웨이퍼들의 세트는 상이한 명시된 에칭 지속 기간들 동안 에칭되고, 에칭 프로세스 각각이 종료된 후, 웨이퍼들은 에칭되었던 프로세싱 챔버들로부터 제거되고, 반사율 스펙트럼은 전용 외부 계측 툴을 사용하여 엑스시츄 광학적으로 측정된다. 이어서 상이한 에칭 시간들에서 인시츄 측정들이 대응하는 지속기간의 엑스시츄 측정치들과 비교함으로써 캘리브레이팅되고, 이에 따라 인시츄 반사율 스펙트럼 강도들을 조정한다. 엑스시츄 광학적 측정치들을 사용하여 캘리브레이팅된 인시츄 광학적 측정치들로부터 생성된 이들 반사율 스펙트럼은 도 3에 대해 기술된 EPM 최적화에서 사용될 수도 있다.

[0112] 최적화 절차는 또한, 연산 최적화시 (보통 국부적으로, 또는 근사적으로) 최소화되는 에러 메트릭을 연산하기 위해 RDS를 사용하는 것을 수반하는, 감소된-치수의 부분 공간 (RDS)에 대해 수행될 수도 있다 -에칭 프로파일 공간에 대해 수행된 것과 유사하지만, 이 경우, 스펙트럼 공간의 치수 감소-. RDS를 수행하는 일 방식은 PCA에 의한 것이지만, 상기 기술된 바와 같이 에칭 프로파일 좌표들의 공간에서 PCA를 수행하는 대신, PCA는 스펙트럼 반사율들의 전체 공간 상에서 수행될 수도 있다. 이렇게 할 때, 수치적 최적화의 통계적 에러를 상당히 절충 (compromising) 하지 않고 스펙트럼 공간의 상당한 치수 감소가 달성될 수도 있다. 여기서, PCA는 중요한 원형 (canonical) 스펙트럼 형상들을 식별할 수도 있고, 또한 (상기 기술된 바와 같이) 목표된 통계적 정확도의 어떤 레벨을 달성하도록 얼마나 많은 형상들이 포함되어야 하는지의 추정을 제공한다. 이러한 방식으로, 에칭 프로파일 좌표 공간에서 수행될 때, 수치적인 최적화 절차에 피팅 (fitting) 하기 위해 요구되는 데이터 지점들의 수는 상당히 감소될 수도 있고, 수치적인 최적화의 수렴이 보다 신속하게 달성된다.

[0113] 유사하게, 그리고 에칭 프로파일 좌표 공간에서의 최적화의 경우와 유사하게, 예를 들어, RDS가 PCA를 통해 수행되든 또는 (이하에 기술된 바와 같이) PLS를 통해 수행되든 또는 달리 수행되든, 도 6에 제시된 최적화 절차 내에서 RDS의 사용을 구현하기 위한 상이한 실현가능한 전략들이 있다는 것을 또한 주의한다. 따라서, 예를 들어, 도 6의 동작 (640)에서 에러 메트릭이 연산되는 방식의 맥락에서, 치수 감소 절차를 채용하기 위한 일 방식은 계산된 스펙트럼 반사율 및 대응하는 실험 스펙트럼 반사율을 RDS 상으로 개별적으로 사영하고, 이어서 부분 공간 상에 사영될 때 반사율 스펙트럼 간 차를 연산하는 것이다. 또 다른 방식은 계산된 스펙트럼 반사율과 대응하는 실험 반사율 스펙트럼 간의 차들을 취하고, 이어서 이 차들을 실험 반사율 스펙트럼과 계산된 반사율 스펙트럼 간의 전위 차들을 나타내는 감소된 치수의 부분 공간 상으로 사영하는 것이고; 총 에러 메트릭은 나중에 (반사율 스펙트럼의) 상이한 부분 공간에서 이들 벡터들의 결합된 길이들로 보여진다.

[0114] PCA를 수행하는 대신, RDS를 수행하기 위한 또 다른 방식은 단순히 스펙트럼 파장들의 특정한 세트를 선택하고, RDS에 대한 기준 세트로서 이들 (선택된 파장들)을 간주하는 것이다. 이렇게 하여, 2 개의 반사율 스펙트럼을 RDS 상으로 사영하고 특정한 파장들에서 반사율 스펙트럼의 강도의 차에 이르는 (RDS에서의) 차를 계산하고, 예를 들어, (이들 파장들에 대한) RMS (root mean square) 에러에 비례하는 수로서 에러 메트릭을 형성할 것이다. 이를 일반화하면, 에러 메트릭은 특정한 선택된 파장들에서 대응하는 실험 반사율 스펙트럼과 연산된 반사율 스펙트럼 간의 차들의 크기에 단조적으로 관련된 수량들의 가중된 합으로서 미리 결정될 수도 있다.

[0115] 더욱이, 최적화 절차에서 비교될 실험 반사율 스펙트럼 및 계산된 반사율 스펙트럼은 상이한 에칭 시간들의 시퀀스에 대응하고, 이어서 RDS를 규정하는 부가적인 기준은 이들 특정한 에칭 시간들의 선택일 수도 있다. 따라서, 이러한 실시예들에서, RDS는 파장들이 고려되는 특정한 에칭 시간들의 식별 및 특정한 스펙트럼 파장들의 선택에 기초하여 결정된다. 더욱이, 특정한 이러한 실시예들에서, 상이한 파장들 및 에칭 시간들은 에러 메트릭의 계산시 상이하게 가중될 수도 있다. 따라서, 예를 들어, 특정한 에칭 시간들에서의 스펙트럼 데이터가 다른 에칭 시간들에서의 데이터보다 입증적이면, 그러면 전술한 바 (일부)는 보다 무겁게 가중될 수도 있다 (즉, 특정한 에칭 시간들에서 특정한 파장들이 다른 에칭 시간들에서 동일한 파장들에 대응하는 (일부) 가중치들보다 크게 설정될 수도 있다). 부가적으로 (또는 대안적으로), 상이한 파장들의 반사율 스펙트럼은 동일한 에칭 시간들에서 조차 분석시 상이하게 가중될 수도 있다.

[0116] RDS를 구성하기 위한 또 다른 대안은 PLS (partial least squares) 분석을 수행하는 것이다. PLS 분석은, 에칭 프로파일의 (반사율) 스펙트럼 이력이 에칭 프로세스 동안 진전됨에 따라, 에칭 프로세스에서 나중되는 그리고/또는 에칭 프로세스의 종결시 에칭 프로파일의 예측이라는 원리의 장점을 취한다. 피처가 하향으로 에칭됨에 따라 (도면에서 우측에 도시된) 피처와 관련된 에칭 프로세스 동안 4 개의 순차적인 시간들 ( $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ , 및  $t_{EP}$  ('EP'는 피처의 최종 *etch profile*를 나타냄))에 대응하는 4 개의 반사율 스펙트럼을 도시하는 도 7a에 예시가 제공된다. 도면으로부터, 에칭 동안 피처의 프로파일이 변화함에 따라 반사율 스펙트럼이 변화하고, 따라서 에칭 프로세스에서 앞선 특정한 시간들에서 특정한 파장들의 다양한 반사율 값들을 사용하는 에칭 프로세스의 종결시 피처 예칭 프로파일의 기하학적 좌표들과 관련되는 PLS 분석을 통해 통계적 모델이 생성될 수도 있다

는 것이 자명하다. PLS 분석은 최종 에칭 프로파일의 가장 예측적인 스펙트럼 파장들 및 에칭 프로세스들에서 앞선 시간들을 식별할 수도 있고, 이 모델은 또한 이들 파장들 및/또는 시간들에 대한 최종 에칭 프로파일의 민감도를 평가할 수도 있다. 특정한 시간들에서 이들 스펙트럼 파장들은 나중에 EPM이 최적화되는 RDS에 대한 기준 세트로서 지정될 수 있다. 더욱이, 특정한 시간들에서 이들 지정된 파장들의 상대적인 통계적 중요성의 PLS 분석의 결정은, 예를 들어, 에러 메트릭의 통계적 가중치들을 규정함으로써, EPM의 수치적 최적화시 보다 크게 가중시키기 위한 기준을 제공한다.

[0117] 또 다른 방식으로 말하면, 기하학적 에칭 프로파일 좌표들 대 에칭 프로세스에서 앞선 반사율 스펙트럼의 PLS 분석은, 효과적인 RDS가 구성될 수도 있는 에칭 프로세스 동안 센서티브 스펙트럼 영역들을 식별하도록 사용될 수도 있고, 에칭 프로세스 시간들 전에 식별된 이들 식별된 파장들에 주어진 상대적인 통계적 가중치들은 EPM 파라미터 최적화가 수행되는 에러 메트릭의 연산에 사용될 수도 있다. EPM 최적화를 위한 이러한 RDS의 사용은 (에칭 시간의 함수로서) RDS가 스펙트럼 공간의 통계적으로 상당한 영역들로 타깃팅되기 때문에 아마도 효율적일 것이라는 것을 주의한다.

[0118] 전술한 PLS 분석 및 (자동적으로 가중된 특정한 스펙트럼 파장들, 에칭 시간들, 등에 대한 전략을 제공하는) 발생되는 PLS 모델은, ((RDS를 사용하여) EPM의 모델 파라미터들이 최적화되는 범위의 프로세스 조건들에 대략적으로 대응할 수도 있는) 다양한 에칭 프로세스 조건들을 겪는 많은 상이한 웨이퍼들에 대해 수집된 에칭 프로세스 데이터 (상이한 에칭 시간들에 대한 반사율 스펙트럼 및 대응하는 에칭 프로파일 좌표들의 세트들)로부터 구성된다면 보다 통계적으로 강력할 것이다. 도 7b는 데이터 블록의 3 개의 인덱스들이 웨이퍼 수 (i), 스펙트럼 파장 (j), 및 에칭 프로세스 시간 (k)에 대응하는 3-D 데이터 블록의 형태로 많은 웨이퍼들에 대해 수집된 이러한 반사율 스펙트럼 데이터의 세트를 개략적으로 제시한다. 이 3-D 데이터 블록은 도면에 나타낸 바와 같이 K \* J의 사이즈의 2-D "X" 데이터 블록으로 전개 (unfold) 될 수도 있고, K는 시점들의 수이고 J는 파장들의 수이다. (연쇄된 데이터 벡터의 폭 (stride)은 파장들의 수 J이다.) 이들은 PLS 분석이 진행되는 독립 변수들이다. PLS 분석을 위한 종속 변수들은, 도면에 나타낸 바와 같이, 1 개의 웨이퍼들 각각에 대한 최종 N 개의 기하학적 에칭 프로파일 좌표들을 포함하는 도면에 도시된 바와 같이, 2-D "Y" 데이터 블록이다. 이 트레이닝 데이터의 완료된 세트로부터, PLS 분석은 에칭 프로세스 동안 중간 시간들에서 반사율 스펙트럼 데이터에 대한 최종 에칭 프로파일 좌표들의 의존도를 예측하기 위한 회귀 (regression) 모델을 구축한다.

[0119] (PLS 모델에 대한 트레이닝 세트로서 사용될) 이러한 에칭 프로파일 및 스펙트럼 반사율 데이터는 일련의 상이한 웨이퍼들에 대해 에칭 프로세스들을 수행 (그리고 반사율을 측정) 함으로써 실험으로 측정될 수도 있지만, 이러한 실험은 비용이 많이 들고 시간소모적일 수도 있다는 것을 주의한다. 그러나, 이미 -예컨대 상기 기술된 절차에 의해 최적화된- 충분한 정확도의 EPM을 가지면, 보다 효율적인 절차는 상기 EPM을 사용하여 에칭 데이터 세트들을 생성하고 그리고 PLS 모델을 구성/트레이닝하기 위해 이 에칭 데이터 세트들을 사용하는 것일 수도 있다. 기본적으로, 실험 에칭 프로파일 및 스펙트럼 반사율 데이터와 컴퓨터 생성된 에칭 프로파일 및 스펙트럼 반사율 데이터 양자의 조합은 또한 사용될 수 있다.

[0120] 어떠한 경우든, PLS 모델을 구축하기 위한 컴퓨터 생성된 반사율 스펙트럼의 사용은 반복적인 절차를 암시하고, PLS 분석을 위해 반사율 스펙트럼의 트레이닝 세트를 생성하도록 (잠재적으로) 최적화되지 않은 EPM을 사용하고, 이어서 발생되는 PLS 모델은 초기 EPM으로 돌아가고 EPM을 최적화하기 위해 (통계적 가중치들을 갖는) RDS를 식별하도록 사용될 수도 있다. 이어서 새로운 최적화된 EPM은 결국, EPM을 더 최적화하는데 사용하기 위해 새로운 RDS를 식별하는 새로운 (그리고 보다 우수한) PLS 모델을 구성하도록 새로운 에칭 데이터의 세트들을 생성하도록 사용될 수도 있고, 이렇게 계속된다. 절차는 일부 미리 결정된 수의 반복들 동안 또는 PLS 모델 및/또는 EPM에서의 상당한 개선이 후속 반복들에서 더 이상 발견되지 않을 때까지 이러한 방식 (EPM 최적화와 PLS 최적화 사이에서 앞 뒤로) 계속될 수도 있다. 임의의 상기 기술된 최적화 기법들에 의해 (예를 들어, PLS 절차를 수반하지 않고) 최적화된 EPM을 사용하여 변동이 시작되고 거기서부터 진행된다. 또 다른 변동은 EPM 독립된 초기 PLS 모델을 구성하도록 실험으로 측정된 에칭 프로세스 데이터 세트들을 사용하고, 이어서 초기 EPM을 최적화하기 위해 RDS를 식별하도록 진행하는 것이다. 이들 일반적인 주제들에 대한 다른 변동들 및 이들의 조합들은 전술한 논의의 관점에서 당업자에게 자명할 것이다.

[0121] 이 전술한 반복적인 접근 방법은 도 8에 개략적으로 예시된다. 도 8에 도시된 바와 같이, 최적화된 PLS 모델을 생성하는 프로세스 (801)는 반사율 스펙트럼의 초기 세트 및 대응하는 에칭 프로파일들의 세트를 수신하는 동작 (810)으로 시작되고, 반사율 스펙트럼의 초기 세트 및 대응하는 에칭 프로파일들의 세트 양자는 에칭 프로세스 시간 지속기간들의 시퀀스들에 대응한다. 에칭 시간들의 시퀀스는 에칭 프로세스 동안 상이한 시간들을 나타낼 수 있거나, 에칭 시간들의 시퀀스는 상이한 총 에칭 시간 지속기간들의 에칭 프로세스들 (즉, 완료를 위

해 수행된 에칭 프로세스들이 아니라 상이한 기관들에 대한 상이한 총 에칭 시간들에 대한) 을 나타낼 수 있다. 어떠한 경우든, (에칭 시간들의 시퀀스에 대응하는) 이 반사율 스펙트럼의 초기 트레이닝 세트는 실험으로 측정될 수 있거나, 최적화되지 않은 EPM을 사용하여 생성될 수 있거나, 상기 기술된 바와 같은 또 다른 절차 (예를 들어, PLS를 수반하지 않는 일 절차)에 의해 최적화된 EPM을 사용하여 생성될 수 있다. 트레이닝 세트를 수신한 후, PLS 분석은 초기 PLS 모델을 생성하기 위한 동작 (820)에서 수행된다. PLS 모델은 (동작 (810)에서 수신된) 에칭 프로파일들의 좌표들을 (또한 동작 (810)에서 수신된) 반사율 스펙트럼에 관련시킨다. 특정한 실시예들에서, PLS 분석은, 나중의 에칭 시간들에서 또는 심지어 상기 기술된 바와 같이, 에칭 프로세스에서 앞선 특정한 시간들에서 반사율 스펙트럼의 특정한 파장들에서 에칭 프로세스의 종료시 에칭 프로파일 좌표들의 종속성뿐만 아니라 이 종속성의 통계적 민감도를 표현하는 회귀 모델을 생성한다.

[0122] 이 초기 PLS 모델은 어떤 목적들에 대해 충분히 정확할 수도 있고, 동작 (830)에서 정확한 것으로 결정된다면, 최적화 프로세스가 종료된다. 그러나, 동작 (830)에서 PLS 모델이 충분한 정확도를 갖지 않는 것으로 생각되면, 프로세스 (801)는 (동작 (820)에서 구성된 바와 같은) 현재 PLS 모델이 (상기된 바와 같은) 효과적인 에러 메트릭을 규정하기 위해 통계적 가중치들을 사용하여 (통계적으로 상당한) RDS를 결정하도록 사용되는 동작 (840)으로 계속된다. 이어서 (예를 들어) 도 6에 대해 기술된 EPM 최적화 절차에 따라 EPM 모델을 최적화하도록 새로운 통계적으로 가중된 스펙트럼 에러 메트릭이 동작 (850)에서 사용된다. PLS 절차에 의해 통계적으로 상당한 것으로 생각된 (전체 스펙트럼 공간의) 스펙트럼 부분 공간에서, EPM 계산된 반사율 스펙트럼과 대응하는 측정된 반사율 스펙트럼 간의 차의 효과적인 게이지로서 작용하도록 이러한 통계적으로 가중된 에러 메트릭이 (예를 들어, 도 6의 최적화에서) 사용될 수도 있다.

[0123] 이 EPM 최적화 절차는 동작 (820)에서 사용된 바와 같이 동일한 스펙트럼 데이터를 사용할 수도 있거나, 상이한 스펙트럼 데이터를 사용할 수도 있다 (그러나, 다시, 동작 (840)에서 규정된 새로운 스펙트럼 에러 메트릭을 활용하여 최적화된다). 어떠한 경우든, (동작 (850)에서) 일단 EPM이 최적화되고, 계산된 반사율 스펙트럼의 새로운 (그리고 아마도 매우 광범위한) 세트를 생성하도록 사용될 수도 있다. 이는 동작 (860)에서 계산된 에칭 프로파일들의 세트를 생성하고 이어서 동작 (865)에서 계산된 반사율 스펙트럼의 세트를 생성하도록 이들 계산된 에칭 프로파일들을 사용함으로써 (예를 들어, 상기 기술되고 도면에 나타낸 바와 같이 RCWA를 사용함으로써) 이루어진다. 이어서 이들 스펙트럼들은 -스펙트럼 트레이닝 세트로서- 이 새로운 (아마도 매우 광범위한) 트레이닝 세트에 기초하여 새로운 PLS 모델이 생성되는 동작 (820)으로 다시 피딩 (fed) 될 수도 있다. 새로운 PLS 모델의 통계적 정확도가 동작 (830)에서 평가되고; 그리고 동작들 (840, 850, 860, 865, 820, 및 830)의 사이클은 동작 (830)의 반복들 중 일 동작에서, PLS 모델이 충분한 통계적 정확도의 모델로 생각될 때까지 반복하여 계속될 수도 있다.

[0124] 이러한 종류의 PLS 모델이 ("우수한" RDS의 식별을 통해) EPM 모델을 최적화하는데 유용하지만, 이는 또한 (전체가 모든 목적들을 위해 참조로서 인용된) 대리인 관리 번호 LAMRP230인, 공동-계류중인 미국 특허 출원에 기술된 바와 같이, 에칭 엔드포인트 검출 절차들에 대해 독립적으로 유용하다는 것을 주의한다. 예를 들어, 상기 기술된 바와 같이, PLS 모델은 에칭 프로세스 동안 스펙트럼 영역들이 에칭 프로세스로부터 발생되는 보다/가장 예측적인 최종 에칭 프로파일이라는 통계적 결정으로서 보여질 수도 있다. 이와 같이, PLS 모델의 구성은 피처 프로파일이 충분히 에칭될 때를 결정하기 위해 (즉, 엔드포인트 검출을 위해) 에칭 프로세스 동안 모니터링될 수도 있는 스펙트럼 영역들을 식별하는 효과적인 민감도 분석이라는 것이다. 따라서, 잠재적으로 보다 효율적인 EPM 최적화를 야기하는 것에 더하여, PLS 모델에서 중요한, 스펙트럼 영역들에 유리한 최적화의 통계적 가중치 (에칭 시간의 함수로서)를 통한 EPM 모델의 최적화는, 이에 따라 PLS 분석에 의해 중요한 것으로 생각되는 (에칭 프로세스 동안) 스펙트럼 공간의 동일한 영역들에 유리한, EPM 모델의 최적화가 통계적으로 가중되는 EPM 모델에 대해서 생성된 에칭 프로파일 데이터 세트들로부터 PLS 모델이 구성되기 때문에 PLS 민감도 분석의 통계적 정확도를 향상시키는 이점을 갖는다는 것을 또한 주의한다.

[0125] 에칭 동작들에 사용하기 위한 용량 결합 플라즈마 (CCP) 반응기들

[0126] 용량 결합 플라즈마 (CCP) 반응기들은 명칭이 "ADJUSTABLE GAP CAPACITIVELY COUPLED RF PLASMA REACTOR INCLUDING LATERAL BELLows AND NON-CONTACT PARTICLE SEAL"이고 2009년 2월 9일 미국 특허 출원 번호 제 12/367,754 호로 출원된 미국 특허 제 8,552,334 호, 및 명칭이 "ADJUSTMENT OF VUV EMISSION OF A PLASMA VIA COLLISIONAL RESONANT ENERGY TRANSFER TO AN ENERGY ABSORBER GAS"이고 2014년 11월 12일 출원된 미국 특허 출원 번호 제 14/539,121 호에 기술되고, 각각은 모든 목적들을 위해 전체가 참조로서 본 명세서에 인용된다.

[0127] 예를 들어, 도 9a 내지 도 9c는 조정가능한 용량 결합된 한정된 RF 플라즈마 반응기 (900)의 실시예를 예시한

다. 도시된 바와 같이, 진공 프로세싱 챔버 (902) 는 하부 전극 (906) 을 하우징하는 내부 공간을 둘러싸는 챔버 하우징 (904) 을 포함한다. 챔버 (902) 의 상부 부분에서, 상부 전극 (908) 은 하부 전극 (906) 으로부터 수직으로 이격된다. (플라즈마 생성을 위해 사용되도록 구성된) 상부 및 하부 전극들 (908, 606) 의 평면 표면들은 실질적으로 평행하고 전극들 사이의 수직 방향에 직교한다. 바람직하게 상부 및 하부 전극들 (908, 606) 은 원형이고 수직 축에 대해 동축이다. 상부 전극 (908) 의 하부 표면은 하부 전극 (906) 의 상부 표면과 마주본다. 이격되어 마주보는 전극 표면들은 전극 표면들 사이의 조정 가능한 캡 (910) 을 규정한다. 플라즈마 생성 동안, 하부 전극 (906) 에는 RF 전력 공급부 (매칭) (920) 에 의해 RF 전력이 공급된다. RF 전력은 RF 공급 도관 (922), RF 스트랩 (924) 및 RF 전력 부재 (926) 를 통해 하부 전극 (906) 에 공급된다. 접지 차폐부 (936) 는 하부 전극 (906) 에 보다 균일한 RF 장을 제공하도록 RF 전력 부재 (926) 를 둘러쌀 수도 있다. 전체 내용이 참조로서 본 명세서에 인용되는, (모든 목적들을 위해 전체가 참조로서 본 명세서에 인용된) 미국 특허 공보 제 2008/0171444 호에 기술된 바와 같이, 웨이퍼는 웨이퍼 포트 (982) 를 통해 삽입되고 프로세싱을 위해 하부 전극 (906) 상의 캡 (910) 내에 지지되고, 프로세스 가스가 캡 (910) 에 공급되고 RF 전력에 의해 플라즈마 상태로 여기된다. 상부 전극 (908) 은 전력 공급되거나 (power) 접지될 수 있다.

[0128]

도 9a 내지 도 9c에 도시된 실시예에서, 하부 전극 (906) 은 하부 전극 지지 플레이트 (916) 상에 지지된다. 하부 전극 (906) 과 하부 전극 지지 플레이트 (916) 사이에 개재된 절연체 링 (914) 은 지지 플레이트 (916) 로부터 하부 전극 (906) 을 절연한다. RF 바이어스 하우징 (930) 은 RF 바이어스 하우징 보울 (bowl) (932) 상에 하부 전극 (906) 을 지지한다. 보울 (932) 은 RF 바이어스 하우징 (930) 의 암 (934) 에 의해 도관 지지 플레이트 (938) 에 챔버 벽 플레이트 (918) 내의 개구를 통해 연결된다. 바람직한 실시예에서, RF 바이어스 하우징 보울 (932) 과 RF 바이어스 하우징 암 (934) 은 일 컴포넌트로서 일체형으로 형성되지만, 암 (934) 과 보울 (932) 은 함께 볼트 결합되거나 연결된 2 개의 별개의 컴포넌트들일 수 있다.

[0129]

RF 바이어스 하우징 암 (934) 은 RF 전력을 지나가게 하기 위한 하나 이상의 중공형 통로들 및 가스 냉각제, 액체 냉각제, RF 에너지, 리프트 핀 제어를 위한 케이블들, 진공 챔버 (902) 의 외부로부터 진공 챔버 (902) 의 내부로 하부 전극 (906) 의 후면 상의 공간에서의 전기적 모니터링 및 작동 신호들과 같은 설비를 포함한다. RF 공급 도관 (922) 은 RF 바이어스 하우징 암 (934) 으로부터 절연되고, RF 바이어스 하우징 암 (934) 은 RF 전력 공급부 (920) 로의 RF 전력에 대한 복귀 경로를 제공한다. 설비 도관 (940) 은 설비 컴포넌트들에 통로를 제공한다. 설비 컴포넌트들의 추가의 상세사항들은 미국 특허 제 5,948,704 호 및 미국 특허 공보 제 2008/0171444 호 (양자는 모든 목적들을 위해 전체가 참조로서 본 명세서에 인용됨) 에 기술되고 기술의 간략함을 위해 여기에 도시되지 않는다. 캡 (910) 은 제한 링 어셈블리 (미도시) 에 의해 바람직하게 둘러싸이고, 그 상세사항들은 (모든 목적들을 위해 전체가 참조로서 본 명세서에 인용되는) 미국 특허 공보 제 2007/0284045 호에서 발견될 수 있다.

[0130]

도관 지지 플레이트 (938) 는 구동 (actuation) 메커니즘 (942) 에 부착된다. 구동 메커니즘의 상세사항들은 (모든 목적들을 위해 전체가 참조로서 본 명세서에 인용되는) 미국 특허 공보 제 2008/0171444 호에 기술된다. 서보 기계 모터, 스텝퍼 모터 등과 같은, 구동 메커니즘 (942) 은 예를 들어, 볼 나사를 회전시키기 위한 모터 및 볼 나사와 같은 나사 기어 (946) 에 의해, 수직의 선형 베어링 (944) 에 부착된다. 캡 (910) 의 크기를 조정하기 위한 동작 동안, 구동 메커니즘 (942) 은 수직의 선형 베어링 (944) 을 따라 이동한다. 도 9a는 구동 메커니즘 (942) 이 작은 캡 (910a) 을 발생시키는 선형 베어링 (944) 상의 고 위치에 있을 때의 배열을 예시한다. 도 9b는 구동 메커니즘 (942) 이 선형 베어링 (944) 상의 중간 위치에 있을 때의 배열을 예시한다. 도시된 바와 같이, 하부 전극 (906), RF 바이어스 하우징 (930), 도관 지지 플레이트 (938), RF 전력 공급부 (920) 는 모두 챔버 하우징 (904) 및 상부 전극 (908) 에 대해 하부로 이동하고, 중간 크기 캡 (910b) 을 발생시킨다.

[0131]

도 9c는 구동 메커니즘 (942) 이 선형 베어링 상의 저 위치에 있을 때 큰 캡 (910c) 을 예시한다. 바람직하게, 상부 및 하부 전극들 (908, 606) 은 캡 조정 동안 동축으로 유지되고 캡에 걸친 상부 전극 및 하부 전극의 대면하는 표면들은 평행하게 유지된다.

[0132]

이 실시예는 예를 들어, 300 mm 웨이퍼들과 같은 큰 직경 기판 또는 평판 디스플레이들에 걸쳐 균일한 예칭을 유지하도록, 멀티-단계 예칭 프로세스들 동안 CCP 챔버 (902) 내의 하부 및 상부 전극들 (906, 608) 사이의 캡 (910) 이 조정되게 한다. 특히, 이 실시예는 하부 및 상부 전극들 (906, 608) 사이에 조정 가능한 캡을 제공하는데 필수적인 선형 운동을 용이하게 하기 위한 기계적 배열에 관한 것이다.

[0133]

도 9a는 근위 단부에서 도관 지지 플레이트 (938) 에 시일되고 원위 단부에서 챔버 벽 플레이트 (918) 의 계단형 플랜지 (928) 에 시일되는 측면으로 편향된 벨로즈 (bellows) (950) 를 예시한다. 계단형 플랜지의 내부 직

경은 RF 바이어스 하우징 암 (934) 이 통과하는 챔버 벽 플레이트 (918) 내에 개구 (912) 를 규정한다. 측면으로 편향된 벨로즈 (950) 는 RF 바이어스 하우징 (930), 도관 지지 플레이트 (938) 및 구동 메커니즘 (942) 의 수직 이동을 허용하면서 진공 시일을 제공한다. RF 바이어스 하우징 (930), 도관 지지 플레이트 (938) 및 구동 메커니즘 (942) 은 캔틸레버 어셈블리로서 지칭될 수 있다. 바람직하게, RF 전력 공급부 (920) 는 캔틸레버 어셈블리와 함께 이동하고 도관 지지 플레이트 (938) 에 부착될 수 있다. 도 9b는 캔틸레버 어셈블리가 중간 위치에 있을 때 중립 위치에 있는 벨로즈 (950) 를 도시한다. 도 9c는 캔틸레버 어셈블리가 저 위치에 있을 때 측면으로 편향된 벨로즈 (950) 를 도시한다.

[0134] 레버린스 (labyrinth) 시일 (948) 은 벨로즈 (950) 와 플라즈마 프로세싱 챔버 하우징 (904) 의 내부 사이에 입자 배리어를 제공한다. 고정된 차폐부 (956) 는 이동식 차폐 플레이트 (958) 가 캔틸레버 어셈블리의 수직 이동을 수용하도록 수직으로 이동하는 레버린스 홈 (960) (슬롯) 을 제공하도록 챔버 벽 플레이트 (918) 에서 챔버 하우징 (904) 의 내부 내측 벽에 부동적으로 부착된다. 이동식 차폐 플레이트 (958) 의 외측 부분은 하부 전극 (906) 의 모든 수직 위치들에서 슬롯 내에 유지된다.

[0135] 도시된 실시예에서, 레버린스 시일 (948) 은 레버린스 홈 (960) 을 규정하는 챔버 벽 플레이트 (918) 내의 개구 (912) 의 주변에서 챔버 벽 플레이트 (918) 의 내측 표면에 부착된 고정된 차폐부 (956) 를 포함한다. 이동식 차폐 플레이트 (958) 는 부착되고 RF 바이어스 하우징 암 (934) 으로부터 방사상으로 연장하고, 암 (934) 은 챔버 벽 플레이트 (918) 내의 개구 (912) 를 통과한다. 이동식 차폐 플레이트 (958) 는 제 1 캡만큼 고정된 차폐부 (956) 로부터 이격되고 캔틸레버 어셈블리로 하여금 수직으로 이동하게 하는 제 2 캡만큼 챔버 벽 플레이트 (918) 의 내부 표면으로부터 이격되는 동안 레버린스 홈 (960) 내로 연장한다. 레버린스 시일 (948) 은 벨로즈 (950) 로부터 스팔링된 (spalled) 입자들의 이송으로 하여금 진공 챔버 내부로 들어가는 것을 차단하고 프로세스 가스 플라즈마로부터의 라디칼들로 하여금 라디칼들이 나중에 스팔링되는 퇴적물들을 형성하는 벨로즈 (950) 로 이송되는 것을 차단한다.

[0136] 도 9a는 캔틸레버 어셈블리가 높은 위치 (작은 캡 (910a)) 에 있을 때 RF 바이어스 하우징 암 (934) 위의 레버린스 홈 (960) 내의 보다 높은 위치에 있는 이동식 차폐 플레이트 (958) 를 도시한다. 도 9c는 캔틸레버 어셈블리가 낮은 위치 (큰 캡 (910c)) 에 있을 때 RF 바이어스 하우징 암 (934) 위의 레버린스 홈 (960) 내의 보다 낮은 위치에 있는 이동식 차폐 플레이트 (958) 를 도시한다. 도 9b는 캔틸레버 어셈블리가 중간 위치 (중간 캡 (910b)) 에 있을 때 레버린스 홈 (960) 내의 중립 또는 중간 위치에 있는 이동식 차폐 플레이트 (958) 를 도시한다. 레버린스 시일 (948) 은 RF 바이어스 하우징 암 (934) 에 대해 대칭적인 것으로 도시되지만, 다른 실시예들에서, 레버린스 시일 (948) 은 RF 바이어스 암 (934) 에 대해 비대칭적일 수도 있다.

[0137] 예칭 동작들에 사용하기 위한 유도 결합 플라즈마 반응기들

[0138] 유도 결합 플라즈마 (ICP) 반응기들은 명칭이 "IMAGE REVERSAL WITH AHM GAP FILL FOR MULTIPLE PATTERNING"인 2013년 12월 10일 출원된 미국 특허 공개 공보 제 2014/0170853 호, 및 명칭이 "ADJUSTMENT OF VUV EMISSION OF A PLASMA VIA COLLISIONAL RESONANT ENERGY TRANSFER TO AN ENERGY ABSORBER GAS"인 2014년 11월 12일 출원된 미국 특허 출원 번호 제 14/539,121 호에 기술되고, 각각은 모든 목적들을 위해 전체가 참조로서 본 명세서에 인용된다.

[0139] 예를 들어, 도 10은 본 명세서의 특정한 실시예들을 구현하기에 적절한 유도 결합 플라즈마 예칭기 장치 (1000) 의 단면도를 개략적으로 도시하고, 이의 예는 CA, Fremont 소재의 Lam Research Corp.에 의해 생산된 Kiyo TM 반응기이다. 유도 결합 플라즈마 예칭기 장치 (1000) 는 챔버 (1001) 벽들 및 원도우 (1011) 에 의해서 구조적으로 구획된 전체 예칭 챔버를 포함한다. 챔버 (1001) 벽들은 스테인레스 스틸 또는 알루미늄으로 제조될 수도 있다. 원도우 (1011) 는 석영 또는 다른 유전체 재료로 제조될 수도 있다. 선택가능한 내부 플라즈마 그리드 (1050) 는 상부 서브-챔버 (1002) 및 하부 서브-챔버 (1003) 로 전체 예칭 챔버를 분할한다. 대부분의 실시예들에서, 플라즈마 그리드 (1050) 는 제거될 수도 있고, 따라서, 서브-챔버들 (1002 및 1003) 로 이루어진 챔버 공간을 활용한다. 척 (1017) 은 하단 내측 표면 근방에서 하부 프로세싱 챔버 (1003) 내에 위치된다. 척 (1017) 은 예칭 프로세스가 수행되는 반도체 웨이퍼 (1019) 를 수용 및 홀딩하도록 구성된다. 척 (1017) 은 웨이퍼 (1019) 가 존재하는 경우에 웨이퍼 (1019) 를 지지하는 정전 척일 수 있다. 일부 실시예들에서, 에지 링 (미도시) 이 척 (1017) 을 둘러싸며 척 (1017) 위에 존재할 경우에 웨이퍼 (1019) 의 상단 표면과 대략 동일 평면에 있는 상부 표면을 갖는다. 척 (1017) 은 또한 웨이퍼 (1019) 의 척킹 및 디척킹하기 위한 정전 전극들을 포함한다. 필터 및 DC 클램프 전력 공급부가 이 목적을 위해서 제공될 수도 있다. 척 (1017) 으로부터 웨이퍼 (1019) 를 리프팅 (lifting) 하기 위한 다른 제어 시스템들이 또한 제공될 수 있다. 척 (1017) 은 RF 전력 공

급부 (1023) 를 사용하여 전기적으로 대전될 수 있다. RF 전력 공급부 (1023) 는 연결부 (1027) 를 통해 매칭 회로 (1021) 에 연결된다. 매칭 회로 (1021) 는 연결부 (1025) 를 통해 척 (1017) 에 연결된다. 이러한 방식으로, RF 전력 공급부 (1023) 는 척 (1017) 에 연결된다.

[0140] 플라즈마 생성을 위한 엘리먼트들은 원도우 (1011) 위에 위치된 코일 (1033) 을 포함한다. 코일 (1033) 은 전기적으로 도전성 재료로 제조되고, 적어도 1 회의 완전한 턴 (turn) 을 포함한다. 도 10에 도시된 코일 (1033) 의 예는 3 회의 턴들을 포함한다. 코일 (1033) 의 단면도들은 심볼들로 도시되고, "X"를 갖는 코일들은 페이지 내로 회전하여 연장하는 한편, "●"을 갖는 코일들은 페이지로부터 회전하여 연장한다. 플라즈마 생성을 위한 엘리먼트들은 또한 코일 (1033) 에 RF 전력을 공급하도록 구성된 RF 전력 공급부 (1041) 를 포함한다. 일반적으로, RF 전력 공급부 (1041) 는 연결부 (1045) 를 통해 매칭 회로 (1039) 에 연결된다. 매칭 회로 (1039) 는 연결부 (1043) 를 통해 코일 (1033) 에 연결된다. 이러한 방식으로, RF 전력 공급부 (1041) 는 코일 (1033) 에 연결된다. 선택가능한 Faraday 차폐부 (1049) 는 코일 (1033) 과 원도우 (1011) 사이에 위치된다. Faraday 차폐부 (1049) 는 코일 (1033) 에 대해 이격된 관계로 유지될 수도 있다. Faraday 차폐부 (1049) 는 원도우 (1011) 바로 위에 배치된다. 코일 (1033), Faraday 차폐부 (1049), 및 원도우 (1011) 는 각각 서로 실질적으로 평행하도록 구성된다. Faraday 차폐부는 금속 또는 다른 종이 플라즈마 챔버의 유전체 원도우 상에 중착되는 것을 방지할 수도 있다.

[0141] 프로세스 가스들 (예를 들어, 헬륨, 네온, 에칠퐁트, 등) 이 상부 챔버 내에 위치된 하나 이상의 주 가스 플로우 유입부들 (1060) 을 통해 그리고/또는 하나 이상의 측면 가스 플로우 유입부들 (1070) 을 통해 프로세스 챔버 내로 흐를 수도 있다. 유사하게, 명시적으로 도시되지 않지만, 프로세스 가스들을 도 9a 내지 도 9c에 도시된 용량 결합 플라즈마 프로세싱 챔버로 공급하도록 유사한 가스 플로우 유입부들이 사용될 수도 있다. 진공 펌프, 예를 들어, 1 또는 2 단계 기계적 드라이 펌프 및/또는 터보분자 펌프 (1040) 가 프로세스 챔버로부터 프로세스 가스들을 유출하도록 그리고 프로세스 챔버 내에서 압력을 유지하도록 사용될 수도 있다. 진공 펌프에 의해 제공된 진공 환경의 적용을 선택적으로 제어하도록 프로세스 챔버로 진공 펌프를 유체적으로 연결하도록 밸브-제어된 도관이 사용될 수도 있다. 이는 동작 중인 플라즈마 프로세싱 동안, 쓰로틀 밸브 (미도시) 또는 웬돌림 밸브 (미도시) 와 같은 폐루프 제어된 플로우 제한 디바이스를 채용함으로써 이루어질 수도 있다. 유사하게, 도 9a 내지 도 9c에 도시된 용량 결합 플라즈마 챔버로의 진공 펌프 및 밸브 제어된 유체 연결이 채용될 수도 있다.

[0142] 장치의 동작 동안, 하나 이상의 프로세스 가스들은 가스 플로우 유입부들 (1060 및/또는 1070) 를 통해 공급될 수도 있다. 특정한 실시예들에서, 프로세스 가스들은 주 가스 플로우 유입부 (1060) 를 통해서만, 또는 측면 가스 플로우 유입부 (1070) 를 통해서만 공급될 수도 있다. 일부 경우들에서, 도면에 도시된 가스 플로우 유입부들은 보다 복잡한 가스 플로우 유입부들, 예를 들어 하나 이상의 샤퍼헤드들로 대체될 수도 있다. Faraday 차폐부 (1049) 및/또는 선택가능한 그리드 (1050) 는 챔버로의 프로세스 가스들의 전달을 허용하는 내부 채널들 및 홀들을 포함할 수도 있다. Faraday 차폐부 (1049) 및 선택가능한 그리드 (1050) 중 하나 또는 양자는 프로세스 가스들의 전달을 위한 샤퍼헤드로서 역할을 할 수도 있다.

[0143] RF 전류로 하여금 코일 (1033) 을 통해 흐르게 하도록 RF 전력 공급부 (1041) 로부터 코일 (1033) 로 RF 전력이 공급된다. 코일 (1033) 을 통한 RF 전류는 코일 (1033) 을 중심으로 전자기장을 생성한다. 전자기장은 상부 서브-챔버 (1002) 내에 유도 전류를 생성한다. 웨이퍼 (1019) 와 다양한 생성된 이온들 및 라디칼들의 물리적 및 화학적 상호작용들은 웨이퍼의 피처들을 선택적으로 에칭한다.

[0144] 상부 서브-챔버 (1002) 및 하부 서브-챔버 (1003) 양자가 있도록 플라즈마 그리드가 사용되면, 상부 서브-챔버 (1002) 내에서 전자-이온 플라즈마를 생성하도록 유도 전류는 상부 서브-챔버 (1002) 내에 존재하는 가스에 작용한다. 선택가능한 내부 플라즈마 그리드 (1050) 는 하부 서브-챔버 (1003) 내 핫 (hot) 전자들의 양을 제한한다. 일부 실시예들에서, 장치는 하부 서브-챔버 (1003) 내에 존재하는 플라즈마가 이온-이온 플라즈마이도록 설계되고 동작된다.

[0145] 상부 전자-이온 플라즈마 및 하부 이온-이온 플라즈마 양자가 양이온 및 음이온을 포함할 수도 있지만, 이온-이온 플라즈마가 양이온들에 대한 음이온들의 보다 큰 비를 가질 것이다. 휘발성 에칭 및/또는 중착 부산물들은 포트 (1022) 를 통해 하부 서브-챔버 (1003) 로부터 제거될 수도 있다.

[0146] 본 명세서에 개시된 척 (1017) 은 약 10 °C 내지 약 250 °C 의 범위의 상승된 온도들에서 동작할 수도 있다. 온도는 에칭 프로세싱 동작 및 구체적인 레시피에 따를 것이다. 일부 실시예들에서, 챔버 (1001) 는 또한 약 1 mTorr 내지 약 95 mTorr의 범위의 압력들에서 동작할 수도 있다. 특정한 실시예들에서, 압력은 상기 개시된 것

보다 높을 수도 있다.

[0147] 챔버 (1001) 는 클린 룸 또는 제조 설비 내에 설치될 때 설비들 (미도시)에 커플링될 수도 있다. 설비들은 프로세싱 가스들, 진공, 온도 제어, 및 환경 입자 제어를 제공하는 플럼빙을 포함한다. 이를 설비들은 타깃 제조 설비 내에 설치될 때 챔버 (1001)에 커플링된다. 부가적으로, 챔버 (1001)는 로보틱스들로 하여금 통상적인 자동화를 사용하여 반도체 웨이퍼들을 챔버 (1001) 내외로 이송하게 하는 이송 챔버에 커플링될 수도 있다.

[0148] 또한, 도 10에 시스템 제어기 (1051)가 도시된다. 이하에 더 기술된 바와 같이, 이러한 시스템 제어기 (1051)는 본 명세서에 기술된 최적화된 EMP를 사용하여 계산된 예칭 프로파일의 생성에 응답하여 예칭기의 조정을 포함하여, 예칭기 장치의 동작들 일부 또는 전부를 제어할 수도 있다.

#### [0149] 시스템 제어기들

[0150] 시스템 제어기는 도 9a 내지 도 9c에 도시된 CCP 예칭기 장치들 및/또는 도 10에 도시된 ICP 예칭기 장치와 같은, 상기 기술된 프로세싱 장치들 중 어느 하나에서 예칭 동작들 (또는 다른 프로세싱 동작들)을 제어하도록 사용될 수도 있다. 특히, 시스템 제어기는 상기 기술된 바와 같이 최적화된 EPM을 구현할 수도 있고, (상기 기술된 바와 같이) 최적화된 EPM을 사용하여 생성된 계산된 예칭 프로파일들에 응답하여 예칭기 장치를 조정할 수도 있다.

[0151] 예칭기 장치와 통신하는 시스템 제어기의 일 예는 도 10에 개략적으로 예시되었다. 도 10에 도시된 바와 같이, 시스템 제어기 (1051)는 하나 이상의 메모리 디바이스들 (1056), 하나 이상의 대용량 저장 디바이스들 (1054), 및 하나 이상의 프로세서들 (1052)을 포함한다. 프로세서 (1052)는 하나 이상의 CPU들, ASIC들, 범용 컴퓨터 (들) 및/또는 특수 목적 컴퓨터 (들), 하나 이상의 아날로그 및/또는 디지털 입력/출력 연결부 (들), 하나 이상의 스텝퍼 모터 제어기 보드 (들), 등을 포함할 수도 있다.

[0152] 일부 실시예들에서, 시스템 제어기 (예를 들어, 도 10에서 1051)은 프로세스 툴 (예를 들어, 도 10에서 예칭기 장치 (1000))의 개별 프로세스 스테이션들의 동작들을 포함하여, 프로세스 툴의 동작들 중 일부 또는 전부를 제어한다. 본 명세서에 기술된 막 증착 및/또는 예칭 프로세스들을 구현/수행하기 위해 머신-판독가능 시스템 제어 인스트럭션들 (1058)이 제공될 수도 있다. 인스트럭션들은 시스템 제어기에 커플링될 수도 있고 그리고/또는 판독될 수도 있는 머신-판독가능, 비일시적 매체 상에 제공될 수도 있다. 인스트럭션들은 프로세서 (1052) 상에서 실행될 수도 있다 - 일부 실시예들에서, 시스템 제어 인스트럭션들은 대용량 저장 디바이스 (1054)로부터 메모리 디바이스 (1056)로 로딩된다-. 시스템 제어 인스트럭션들은 타이밍, 가스성 및 액체 반응물질들의 혼합물, 챔버 및/또는 스테이션 압력들, 챔버 및/또는 스테이션 온도들, 웨이퍼 온도들, 타깃 전력 레벨들, RF 전력 레벨들 (예를 들어, DC 전력 레벨들, RF 바이어스 전력 레벨들), RF 노출 시간들, 기판 페데스탈, 척, 및/또는 서셉터 위치들, 및 프로세스 툴에 의해 수행된 특정한 프로세스의 다른 파라미터들을 제어하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다.

[0153] 반도체 기판 프로세싱 동작들은 이로 제한되는 것은 아니지만, 기판들 상의 막의 예칭과 관련된 프로세스들 (예컨대 표면 흡착된 에친트들의 플라즈마-활성화를 수반하는 ALE (atomic layer etch), 예를 들어, 모든 목적들을 위해 전체가 참조로서 본 명세서에 인용된, 명칭이 "ADJUSTMENT OF VUV EMISSION OF A PLASMA VIA COLLISIONAL RESONANT ENERGY TRANSFER TO AN ENERGY ABSORBER GAS"인 2014년 11월 12일 출원된 미국 특허 출원 번호 제 14/539,121 호를 참조하라), 증착 프로세스들 (예컨대 표면 흡착된 막 전구체들의 플라즈마-활성화에 의한 ALD (atomic layer deposition)), 뿐만 아니라 다른 타입들의 기판 프로세싱 동작들을 포함하는 다양한 타입들의 프로세스들을 채용할 수도 있다.

[0154] 따라서, 예를 들어, 플라즈마-기반 예칭 프로세스들을 수행하기 위한 프로세싱 장치에 대해, 시스템 제어기에 의해 실행된 머신-판독가능 인스트럭션들은 최적화된 EPM으로부터 계산된 예칭 프로파일을 생성하고 계산된 예칭 프로파일에 응답하여 플라즈마 생성기의 동작을 조정하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다.

[0155] 시스템 제어 인스트럭션들 (1058)은 임의의 적합한 방식으로 구성될 수도 있다. 예를 들어, 다양안 프로세스 툴 컴포넌트 서브루틴들 또는 제어 객체들은 다양한 프로세스 툴 프로세스들을 수행하기 위해 필요한 프로세스 툴 컴포넌트들의 동작을 제어하도록 작성될 수도 있다. 시스템 제어 인스트럭션들은 임의의 적합한 컴퓨터 판독가능 프로그래밍 언어로 코딩될 수도 있다. 일부 실시예들에서, 시스템 제어 인스트럭션들은 소프트웨어로 구현되고, 다른 실시예들에서, 인스트럭션들은 하드웨어로 -예를 들어, ASIC (application specific integrated circuit)의 로직으로 하드코딩되거나, 다른 실시예들에서, 소프트웨어 및 하드웨어의 조합으로 구현된다-.

- [0156] 일부 실시예들에서, 시스템 제어 소프트웨어 (1058)는 상기 기술된 다양한 파라미터들을 제어하기 위한 IOC (input/output control) 시퀀싱 (sequencing) 인스트럭션들을 포함할 수도 있다. 예를 들어, 중착 및/또는 에칭 프로세스 또는 프로세스들의 페이즈 각각은 시스템 제어기에 의해 실행할 하나 이상의 인스트럭션들을 포함할 수도 있다. 막 중착 및/또는 에칭 프로세스 페이즈에 대한 프로세스 조건들을 설정하기 위한 인스트럭션들은 예를 들어, 대응하는 중착 및/또는 에칭 레시피 페이즈 내에 포함될 수도 있다. 일부 실시예들에서, 프로세스 페이즈를 위한 모든 인스트럭션들이 이 프로세스 페이즈와 동시에 실행되도록 레시피 페이즈들이 연속적으로 배열될 수도 있다.
- [0157] 시스템 제어기 (1051)와 연관된 대용량 저장 디바이스 (1054) 및/또는 메모리 디바이스 (1056)에 저장된 다른 컴퓨터-판독가능 인스트럭션들 및/또는 프로그램들이 일부 실시예들에서 채용될 수도 있다. 프로그램들 또는 프로그램들의 섹션들의 예들은 기판 포지셔닝 (positioning) 프로그램, 프로세스 가스 제어 프로그램, 압력 제어 프로그램, 가열기 제어 프로그램, 및 플라즈마 제어 프로그램을 포함한다.
- [0158] 기판 포지셔닝 프로그램은 페테스탈 상에 기판을 로딩하고 기판과 프로세스 툴의 다른 부분들 사이의 간격을 제어하도록 사용된 프로세스 툴 컴포넌트들에 대한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다. 포지셔닝 프로그램은 기판들 상에 막을 중착하고 그리고/또는 에칭하는데 필요한대로 기판들을 반응 챔버 내외로 적절하게 이동시키기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다.
- [0159] 프로세스 가스 제어 프로그램은 프로세스 스테이션들 주변의 볼륨들 내의 압력을 안정화시키기 위해 중착 및/또는 에칭 전에 가스 조성 및 플로우 레이트들을 제어하기 위한 코드 및 선택가능하게 하나 이상의 프로세스 스테이션들로 가스를 흘리기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다. 일부 실시예들에서, 프로세스 가스 제어 프로그램은 기판들 상의 막 중착 및/또는 에칭 동작들 동안 프로세싱 챔버 내의 하나 이상의 프로세스 스테이션들 주변의 볼륨(들) 내로 특정한 가스들을 도입하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다. 프로세스 가스 제어 프로그램은 또한 동일한 지속기간 동안, 동일한 레이트로 또는 중착되는 막의 조성 및/또는 수반된 에칭 프로세스의 특성에 따라 상이한 지속기간들 동안 그리고/또는 상이한 레이트들로 이들 가스들을 전달하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다. 프로세스 가스 제어 프로그램은 또한 가열된 주입 모듈 내에 헬륨 또는 일부 다른 캐리어 가스의 존재 시에 액체 반응물질을 원자화/기화하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다.
- [0160] 압력 제어 프로그램은 예를 들어, 프로세스 스테이션의 배기 시스템의 쓰로틀 밸브, 프로세스 스테이션으로의 가스 플로우, 등을 조절함으로써 프로세스 스테이션 내의 압력을 제어하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다. 압력 제어 프로그램은 기판들 상에 다양한 막 타입들의 중착 그리고/또는 기판들의 에칭 동안 동일한 또는 상이한 압력들을 유지하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다.
- [0161] 가열기 제어 프로그램은 기판들을 가열하기 위해 사용된 가열 유닛으로의 전류를 제어하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다. 대안적으로 또는 부가적으로, 가열기 제어 프로그램은 기판으로의 (헬륨과 같은) 열 전달 가스 (heat transfer gas)의 전달을 제어할 수도 있다. 가열기 제어 프로그램은 기판들 상에 다양한 막 타입들의 중착 그리고/또는 기판들의 에칭 동안 프로세스 스테이션들 주변의 볼륨들 및/또는 반응 챔버 내에서 동일하거나 상이한 온도들을 유지하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다.
- [0162] 플라즈마 제어 프로그램은 본 명세서의 실시예들에 따라 하나 이상의 프로세스 스테이션들 내에서 RF 전력 레벨들, 주파수들, 및 노출 시간들을 설정하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다. 일부 실시예들에서, 플라즈마 제어 프로그램은 기판들 상에 막 중착 그리고/또는 기판들의 에칭 동안에 동일하거나 상이한 RF 전력 레벨들, 및/또는 주파수들, 및/또는 노출 시간들을 사용하기 위한 인스트럭션들을 포함할 수도 있다.
- [0163] 일부 실시예들에서, 시스템 제어기와 연관된 사용자 인터페이스가 있을 수도 있다. 사용자 인터페이스는 디스플레이 스크린, 장치 및/또는 프로세스 조건들의 그래픽적인 소프트웨어 디스플레이들, 및 포인팅 디바이스들, 키보드들, 터치 스크린들, 마이크로폰들 등과 같은 사용자 입력 디바이스들을 포함할 수도 있다.
- [0164] 일부 실시예들에서, 시스템 제어기에 의해 조정된 파라미터들은 프로세스 조건들과 관련될 수도 있다. 비제한적인 예들은 프로세스 가스 조성들 및 플로우 레이트들, 온도 (예를 들어, 기판 훌더 및 샤워헤드 온도들), 압력들, (RF 바이어스 전력 레벨들 및 노출 시간들과 같은) 플라즈마 조건들, 등을 포함한다. 이들 파라미터들은 사용자 인터페이스를 활용하여 입력될 수도 있는, 레시피의 형태로 사용자에게 제공될 수도 있다.
- [0165] 프로세스들을 모니터링하기 위한 신호들은 다양한 프로세스 툴 센서들로부터 시스템 제어기의 아날로그 입력 접속부 및/또는 디지털 입력 접속부에 의해 제공될 수도 있다. 프로세스들을 제어하기 위한 신호들은 프로세스 툴의 아날로그 출력 접속부 및/또는 디지털 출력 접속부 상에 출력될 수도 있다. 모니터링될 수도 있는 프로세

스 툴 센서들의 비제한적인 예들은 질량 유량 제어기들, (압력계들 (manometers) 과 같은) 압력 센서들, 열전대들 (thermocouple), 등을 포함한다. 적절하게 프로그램된 피드백 및 제어 알고리ズ들이 프로세스 조건들을 유지하기 위해 이들 센서들로부터의 데이터를 사용할 수도 있다.

[0166] 상기 기술된 다양한 장치들 및 방법들은 예를 들어, 반도체 디바이스들, 디스플레이, LED들, 광전 패널 등의 제조 또는 제작을 위해 리소그래피 패터닝 툴들 및/또는 프로세스들과 함께 사용될 수도 있다. 통상적으로, 반드시 그러한 것은 아니지만 공동 제조 설비 내에서 함께 및/또는 동시에 이러한 툴들이 사용되거나 프로세스들이 수행될 것이다.

[0167] 일부 구현예들에서, 제어기는 상술한 예들의 일부일 수도 있는 시스템의 일부일 수 있다. 이러한 시스템들은, 프로세싱 툴 또는 툴들, 챔버 또는 챔버들, 프로세싱용 플랫폼 또는 플랫폼들, 및/또는 특정 프로세싱 컴포넌트들 (웨이퍼 페데스탈, 가스 플로우 시스템, 등) 을 포함하는, 반도체 프로세싱 장비를 포함할 수 있다. 이들 시스템들은 반도체 웨이퍼 또는 기판의 프로세싱 이전에, 프로세싱 동안에 그리고 프로세싱 이후에 그들의 동작을 제어하기 위한 전자장치에 통합될 수도 있다. 전자장치들은 시스템 또는 시스템들의 다양한 컴포넌트들 또는 하위부품들을 제어할 수도 있는 "제어기"로서 지칭될 수도 있다. 제어기는, 시스템의 프로세싱 요건들 및/또는 타입에 따라서, 프로세싱 가스들의 전달, 온도 설정사항들 (예를 들어, 가열 및/또는 냉각), 압력 설정사항들, 진공 설정사항들, 전력 설정사항들, 무선 주파수 (RF) 생성기 설정사항들, RF 매칭 회로 설정사항들, 주파수 설정사항들, 플로우 레이트 설정사항들, 유체 전달 설정사항들, 위치 및 동작 설정사항들, 툴들 및 다른 이송 툴들 및/또는 특정 시스템과 연결되거나 인터페이싱된 로드록들 내외로의 웨이퍼 이송들을 포함하는, 본 명세서에 개시된 프로세스들 중 임의의 프로세스들을 제어하도록 프로그램될 수도 있다.

[0168] 일반적으로 말하면, 제어기는 인스트럭션들을 수신하고, 인스트럭션들을 발행하고, 동작을 제어하고, 세정 동작들을 인에이블하고, 엔드포인트 측정들을 인에이블하는 등을 하는 다양한 접적 회로들, 로직, 메모리, 및/또는 소프트웨어를 갖는 전자장치로서 규정될 수도 있다. 접적 회로들은 프로그램 인스트럭션들을 저장하는 펌웨어의 형태의 칩들, 디지털 신호 프로세서들 (DSP), ASIC (application specific integrated circuit) 으로서 규정되는 칩들 및/또는 프로그램 인스트럭션들 (예를 들어, 소프트웨어) 을 실행하는 하나 이상의 마이크로프로세서들, 또는 마이크로제어기들을 포함할 수도 있다. 프로그램 인스트럭션들은 반도체 웨이퍼 상에서 또는 반도체 웨이퍼에 대한 특정 프로세스를 실행하기 위한 동작 파라미터들을 규정하는, 다양한 개별 설정사항들 (또는 프로그램 파일들) 의 형태로 제어기로 또는 시스템으로 전달되는 인스트럭션들일 수도 있다. 일부 실시예들에서, 동작 파라미터들은 하나 이상의 층들, 재료들, 금속들, 산화물들, 실리콘, 이산화 실리콘, 표면들, 회로들, 및/또는 웨이퍼의 다이들의 제조 동안에 하나 이상의 프로세싱 단계들을 달성하도록 프로세스 엔지니어에 의해서 규정된 레시피의 일부일 수도 있다.

[0169] 제어기는, 일부 구현예들에서, 시스템에 통합되거나, 시스템에 커플링되거나, 이와 달리 시스템에 네트워킹되거나, 또는 이들의 조합으로 될 수 있는 컴퓨터에 커플링되거나 이의 일부일 수도 있다. 예를 들어, 제어기는 웨이퍼 프로세싱의 원격 액세스를 가능하게 할 수 있는 공장 (fab) 호스트 컴퓨터 시스템의 전부 또는 일부이거나 "클라우드" 내에 있을 수도 있다. 컴퓨터는 제조 동작들의 현 진행을 모니터링하고, 과거 제조 동작들의 이력을 조사하고, 복수의 제조 동작들로부터 경향들 또는 성능 계측치들을 조사하고, 현 프로세싱의 파라미터들을 변경하고, 현 프로세싱을 따르는 프로세싱 단계들을 설정하고, 또는 새로운 프로세스를 시작하기 위해서 시스템으로의 원격 액세스를 인에이블할 수도 있다. 일부 예들에서, 원격 컴퓨터 (예를 들어, 서버) 는 로컬 네트워크 또는 인터넷을 포함할 수도 있는 네트워크를 통해서 프로세스 레시피들을 시스템에 제공할 수 있다. 원격 컴퓨터는 차후에 원격 컴퓨터로부터 시스템으로 전달될 파라미터들 및/또는 설정사항들의 입력 또는 프로그래밍을 인에이블하는 사용자 인터페이스를 포함할 수도 있다. 일부 예들에서, 제어기는 하나 이상의 동작들 동안에 수행될 프로세스 단계들 각각에 대한 파라미터들을 특정한, 데이터의 형태의 인스트럭션들을 수신한다. 이 파라미터들은 제어기가 제어하거나 인터페이싱하도록 구성된 툴의 타입 및 수행될 프로세스의 타입에 특정적일 수도 있다는 것이 이해되어야 한다. 따라서, 상술한 바와 같이, 제어기는 예를 들어 서로 네트워킹되어서 함께 공동 목적을 위해서, 예를 들어 본 명세서에 기술된 프로세스들 및 제어들을 위해서 협력하는 하나 이상의 개별 제어기들을 포함함으로써 분산될 수도 있다. 이러한 목적을 위한 분산형 제어기의 예는 챔버 상의 프로세스를 제어하도록 조합되는, (예를 들어, 플랫폼 레벨에서 또는 원격 컴퓨터의 일부로서) 원격으로 위치한 하나 이상의 접적 회로들과 통신하는 챔버 상의 하나 이상의 접적 회로들일 수 있다.

[0170] 비한정적으로, 예시적인 시스템들은 (ICP 또는 CCP를 채용하는) 플라즈마 에칭 챔버 또는 모듈, 증착 챔버 또는 모듈, 스핀-린스 챔버 또는 모듈, 금속 도금 챔버 또는 모듈, 세정 챔버 또는 모듈, 베벨 에지 에칭 챔버 또는 모듈, PVD (physical vapor deposition) 챔버 또는 모듈, CVD (chemical vapor deposition) 챔버 또는 모듈,

ALD (atomic layer deposition) 챔버 또는 모듈, ALE (atomic layer etch) 챔버 또는 모듈, 이온 주입 챔버 또는 모듈, 트랙 (track) 챔버 또는 모듈, 및 반도체 웨이퍼들의 제조 및/또는 제작 시에 사용되거나 연관될 수도 있는 임의의 다른 반도체 프로세싱 시스템들을 포함할 수도 있다.

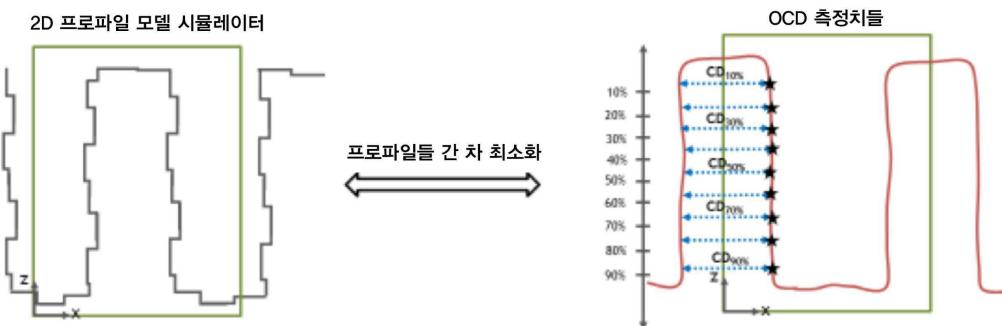
[0171] 상술한 바와 같이, 툴에 의해서 수행될 프로세스 단계 또는 단계들에 따라서, 제어기는, 반도체 제작 공장 내의 툴 위치들 및/또는 로드 포트들로부터/로 웨이퍼들의 컨테이너들을 이동시키는 재료 이송 시에 사용되는, 다른 툴 회로들 또는 모듈들, 다른 툴 컴포넌트들, 클러스터 툴들, 다른 툴 인터페이스들, 인접 툴들, 이웃하는 툴들, 공장 도처에 위치한 툴들, 메인 컴퓨터, 또 다른 제어기 또는 툴들 중 하나 이상과 통신할 수도 있다.

[0172] 다른 실시예들

[0173] 전술하여 개시된 기법들, 동작들, 프로세스들, 방법들, 시스템들, 장치들, 툴들, 막들, 화학물질들 및 조성들이 명료함과 이해를 향상시키기 위한 목적으로 구체적인 실시예들의 맥락 내에서 상세히 기술되었으나, 본 개시의 정신 및 범위 내에 있는 전술한 실시예들을 구현하는 다양한 대안적인 방법들이 있다는 것이 당업자에게 자명할 것이다. 따라서, 본 명세서에서 기술된 실시예들은 제한적으로 보여지기 보다는 개시된 진보한 컨셉들의 예시적인 것들로 보여져야 하며, 궁극적으로 본 개시의 주제로 지향되는 임의의 청구항들의 범위를 과도하게 제한하는 허용할 수 없는 근거로 사용되서는 안 된다.

## 도면

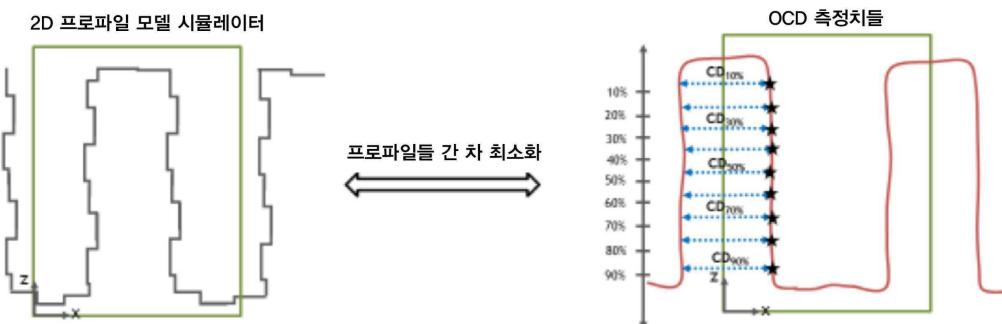
### 도면1



도면 1

도면 2

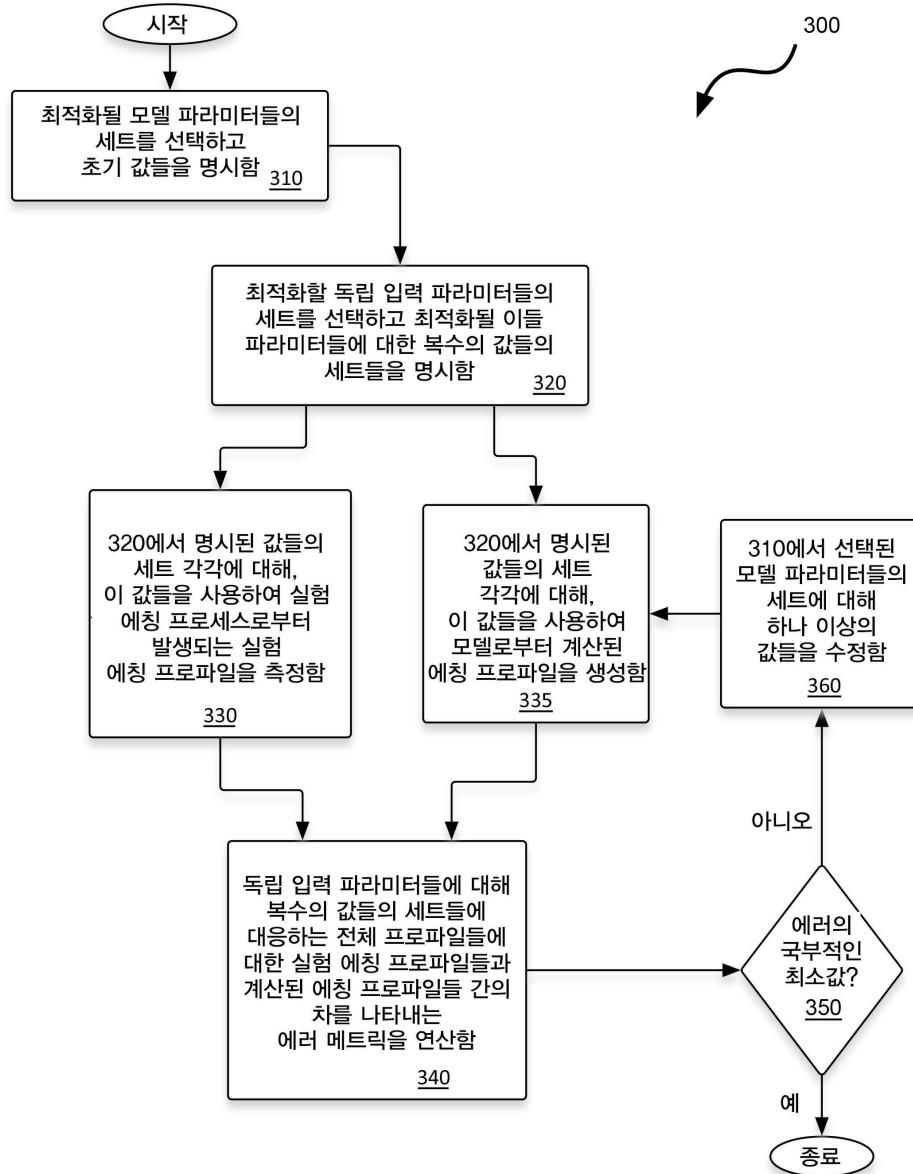
### 도면2



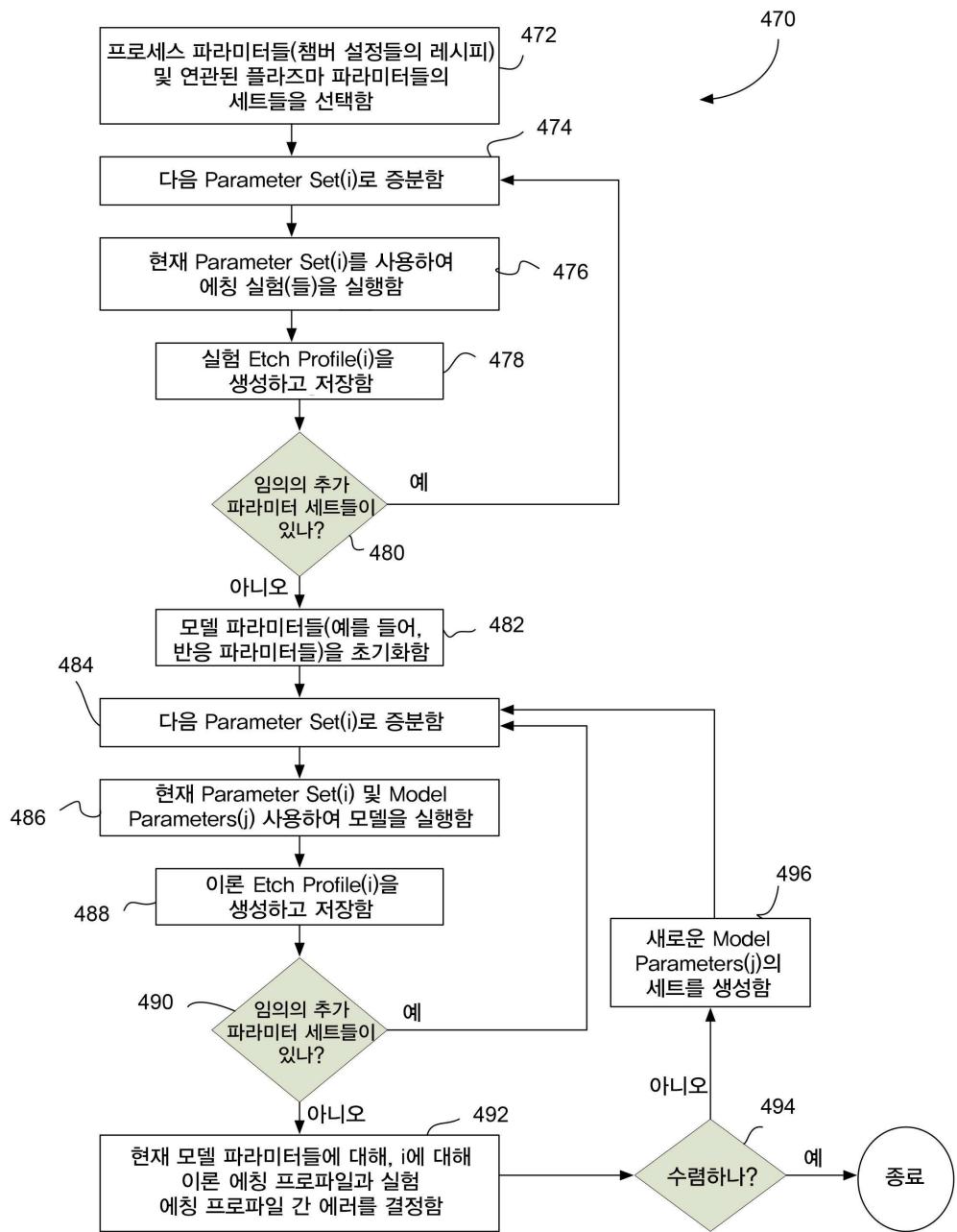
도면 1

도면 2

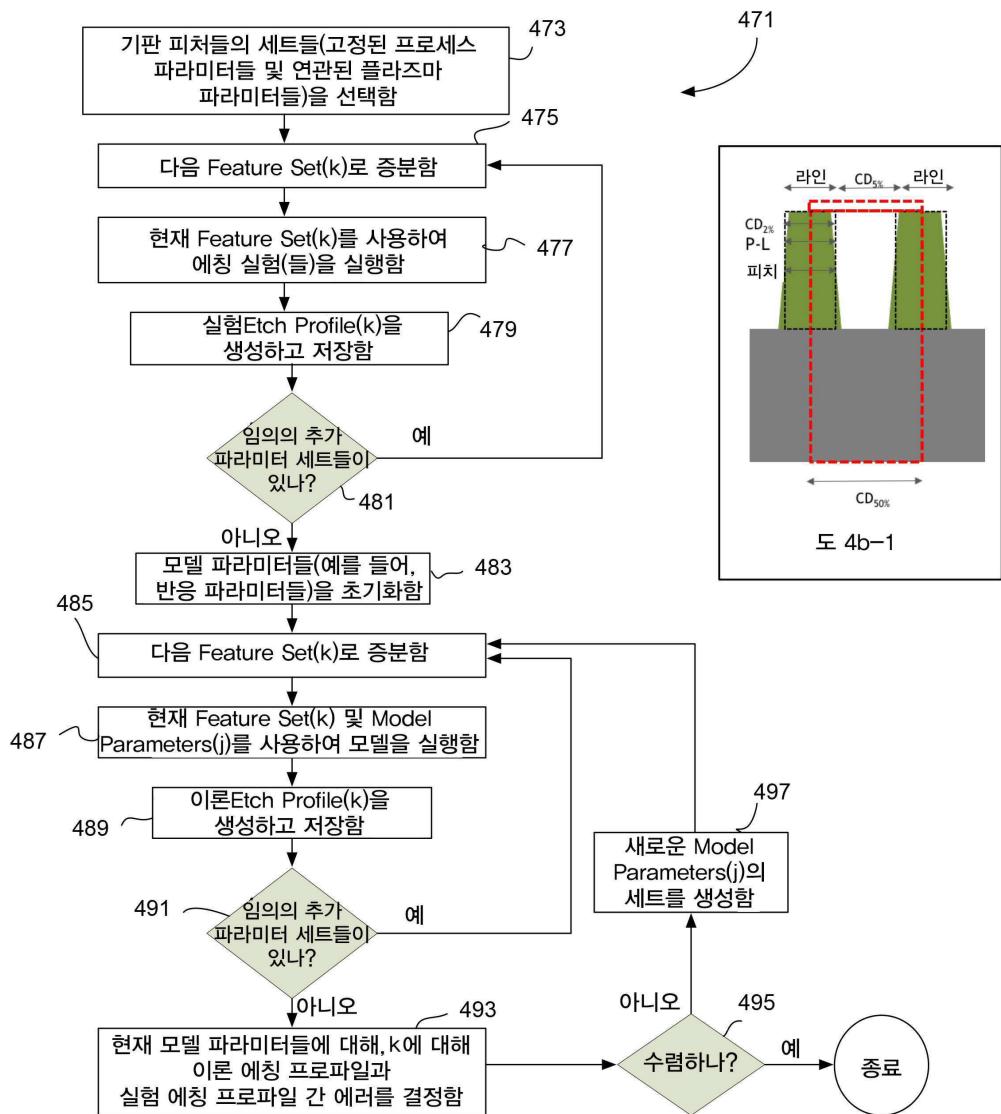
## 도면3



## 도면4a

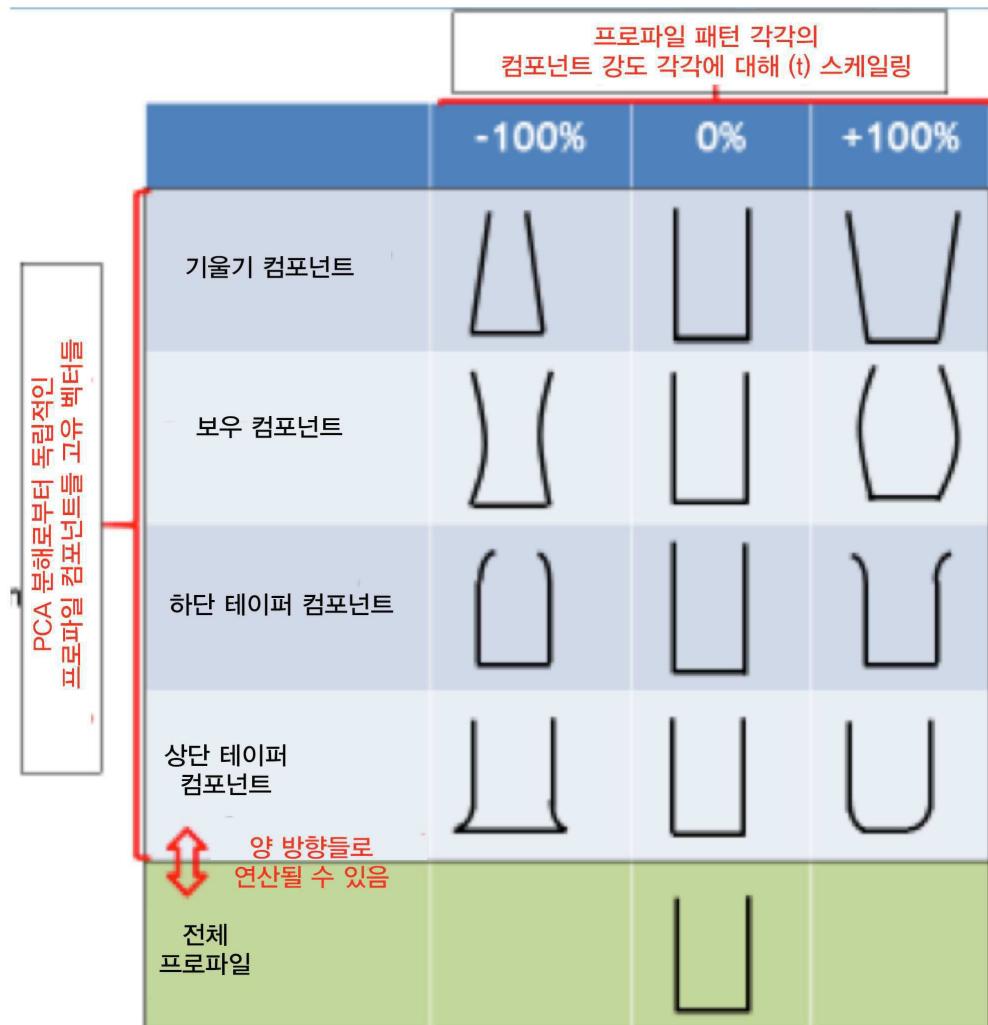


## 도면4b

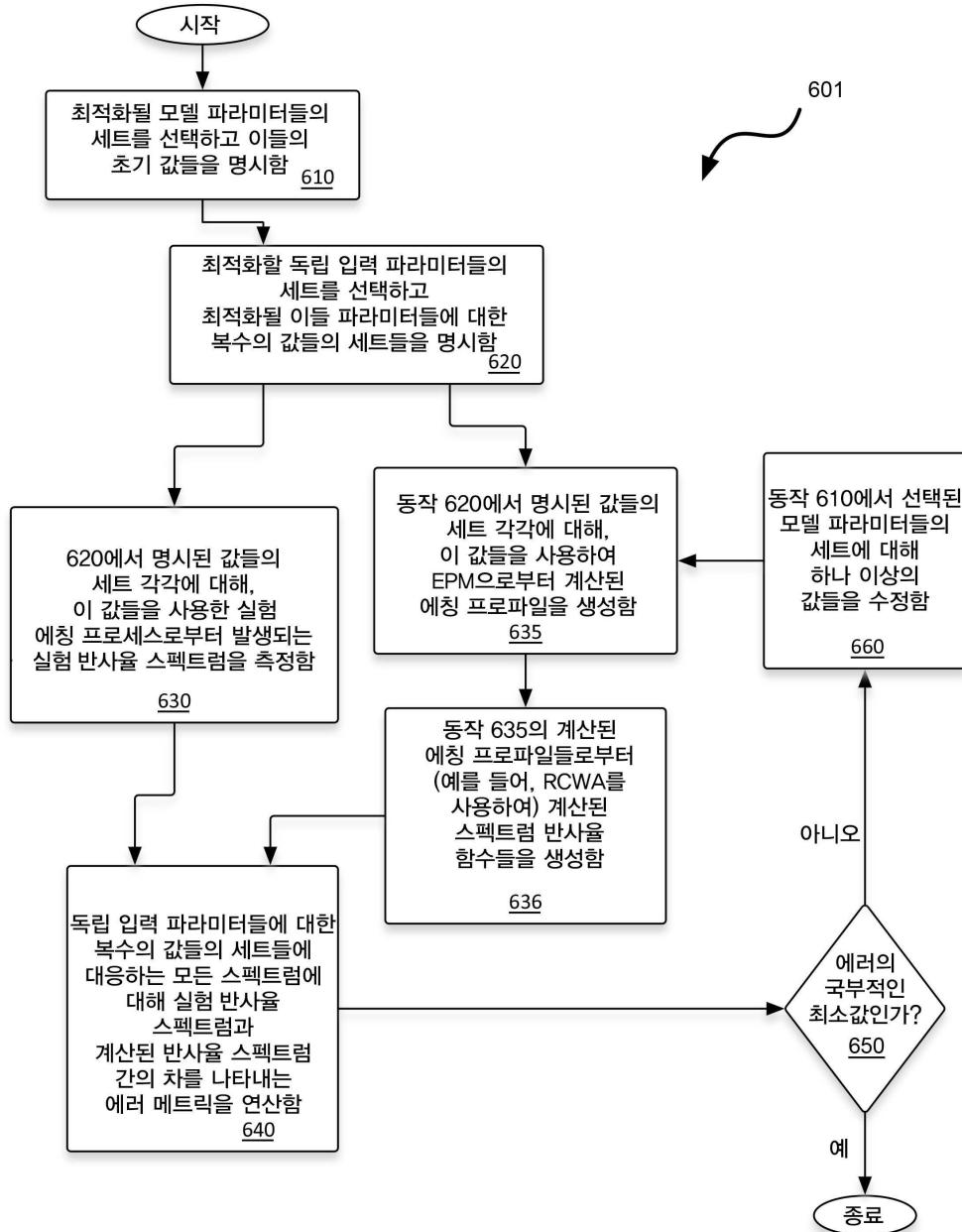


도 4b

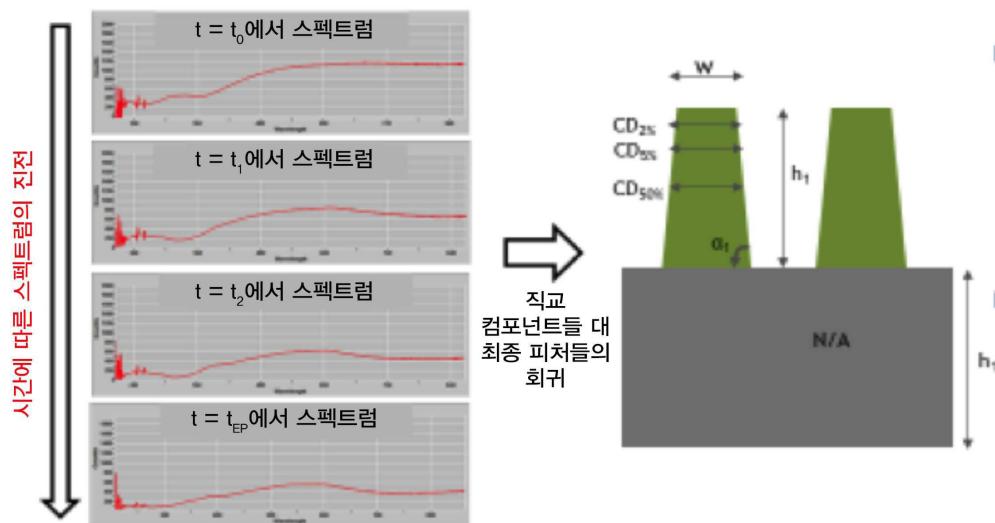
## 도면5



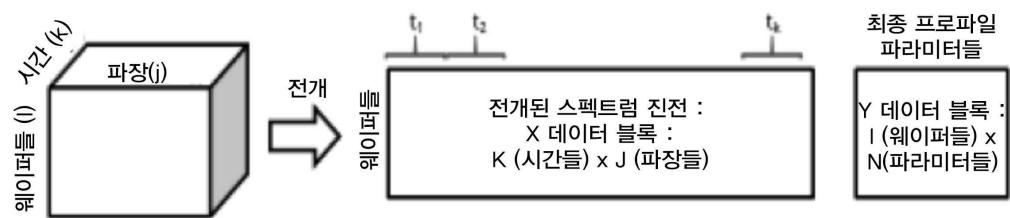
## 도면6



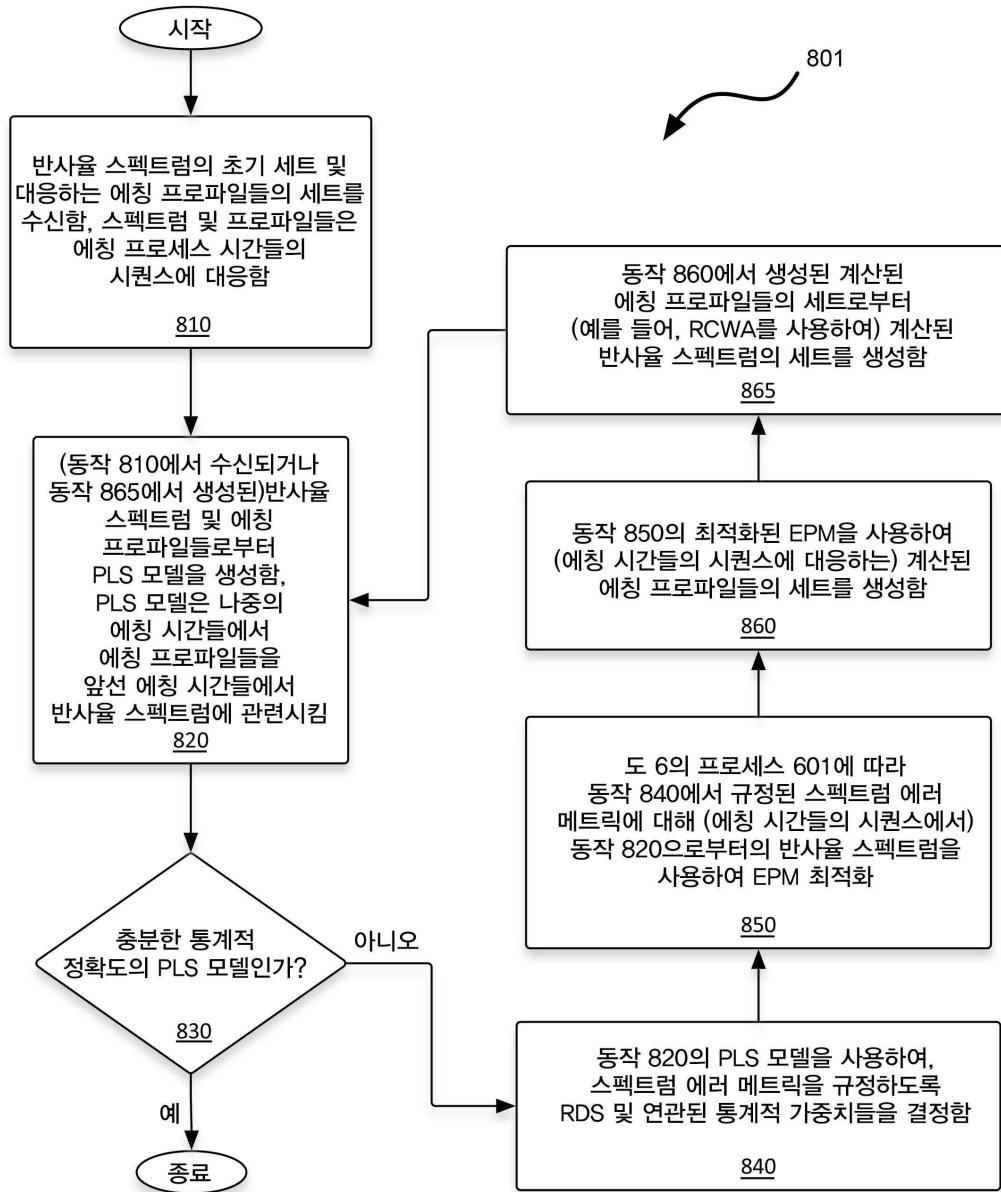
## 도면7a



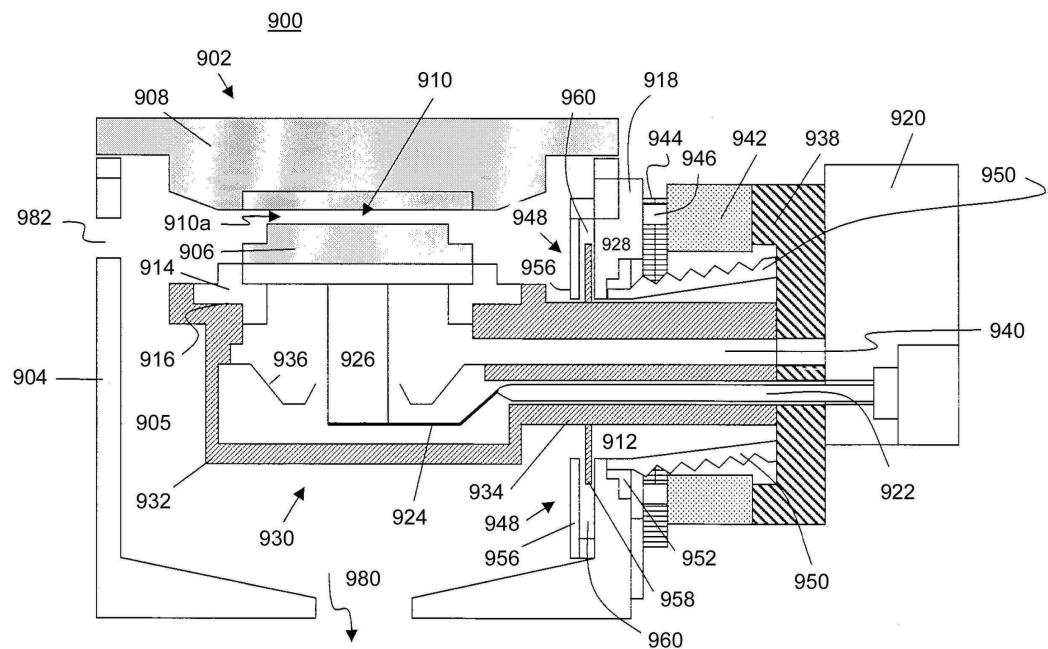
## 도면7b



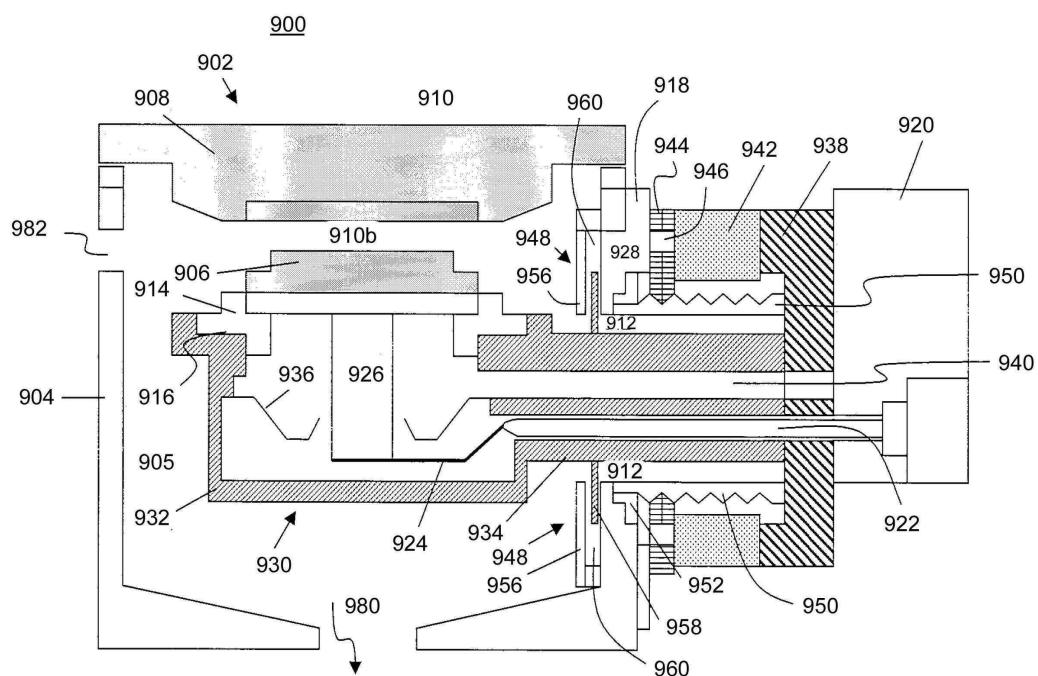
## 도면8



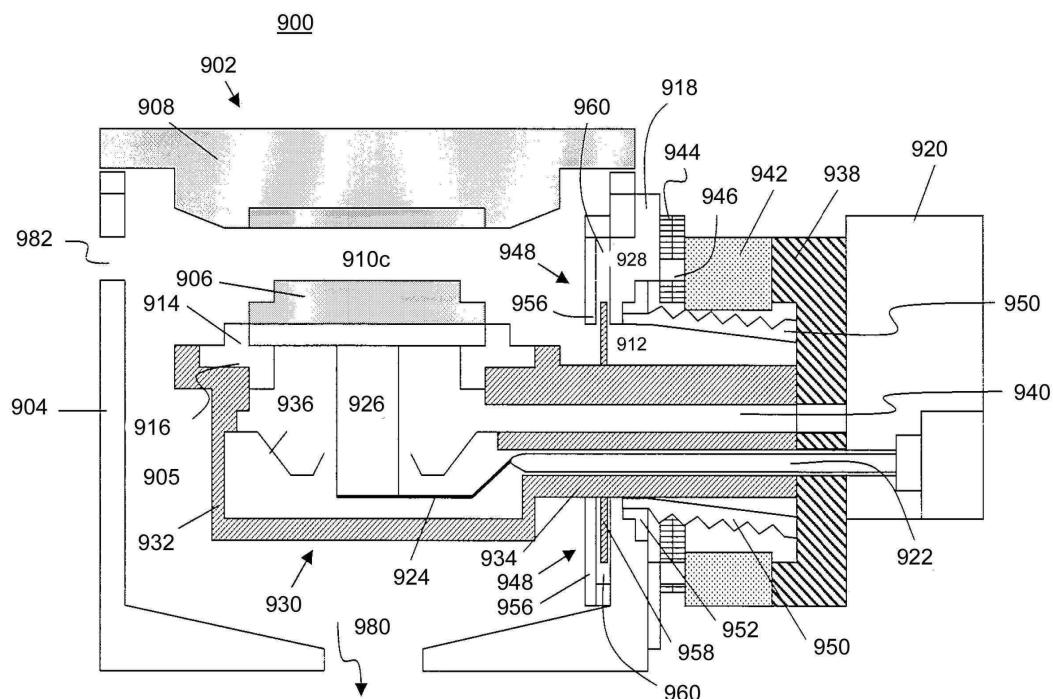
도면9a



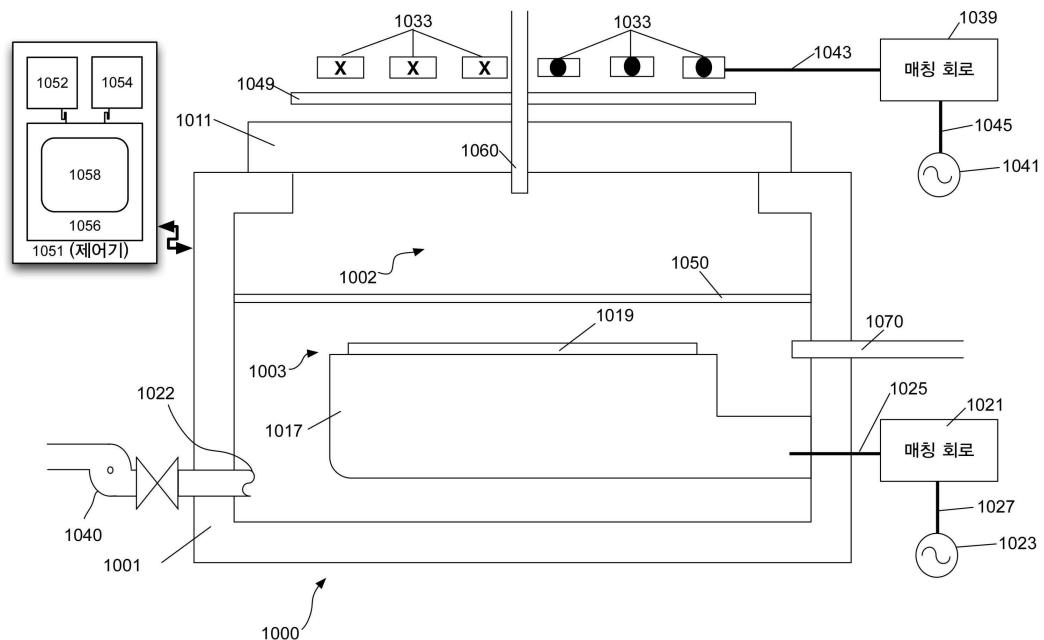
도면9b



## 도면9c



## 도면10



## 【심사관 직권보정사항】

## 【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 7

## 【변경전】

제 6 항에 있어서,

상기 다양한 지속기간의 상기 종료된 에칭 프로세스들에 대응하는 상기 광학적 측정치들은 상기 대응하는

에칭된 기판들이 에칭되는 상기 프로세싱 챔버들로부터 제거된 후 취해지는, 컴퓨터 구현된 방법.

【변경후】

제 6 항에 있어서,

상기 다양한 지속기간의 상기 종료된 에칭 프로세스들에 대응하는 상기 광학적 측정치들은 상기 대응하는  
에칭된 기판들이 에칭되는 프로세싱 챔버들로부터 제거된 후 취해지는, 컴퓨터 구현된 방법.