



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(45) 공고일자 2013년11월05일  
(11) 등록번호 10-1322361  
(24) 등록일자 2013년10월21일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
**H01L 21/205** (2006.01)  
(21) 출원번호 10-2006-0100197  
(22) 출원일자 2006년10월16일  
심사청구일자 2011년10월14일  
(65) 공개번호 10-2007-0042460  
(43) 공개일자 2007년04월23일  
(30) 우선권주장 60/728,178 2005년10월18일 미국(US)  
(56) 선행기술조사문헌  
US20050090118 A1\*  
JP09120956 A\*  
US20050051273 A1\*  
JP07297175 A\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자  
**애플라이드 머티어리얼스, 인코포레이티드**  
미국 95054 캘리포니아 산타 클라라 바우어스 애브뉴 3050  
(72) 발명자  
**홀랜드, 존 피**  
미국 95126 캘리포니아 샌어제이 카라베라즈 애브뉴 1565  
**호프만, 다니엘 제이.**  
미국 95070 캘리포니아 사라토가 아로요 데 아르구엘로 12343  
(74) 대리인  
**특허법인 남앤드남**

전체 청구항 수 : 총 13 항

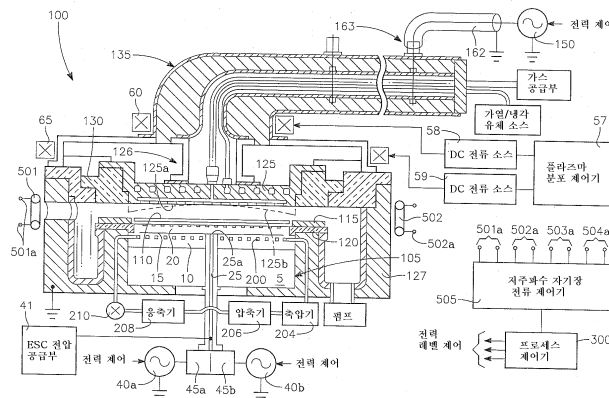
심사관 : 정구원

(54) 발명의 명칭 **플라즈마 반응기내의 이온 밀도, 이온 에너지 분포 및 이온해리의 독립적 제어 방법**

**(57) 요약**

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법은 3개의 개별 주파수들의 적어도 3개의 RF 전력 소스로부터의 RF 전력을 상기 반응기 내의 플라즈마에 결합시키는 단계; 상기 적어도 3개의 RF 전력 소스들 중 제 1 쌍의 전력 레벨들 간의 비율을 선택함으로써 이온 에너지 분포 형상을 설정하는 단계; 및 상기 적어도 3개의 RF 전력 소스들 중 제 2 쌍의 전력 레벨들 간의 비율을 선택함으로써 이온 해리 및 이온 밀도를 설정하는 단계를 포함한다. 3개의 개별 주파수들은 LF 주파수, HF 주파수 및 VHF 주파수일 수 있으며, 제 1 쌍은 LF 및 HF 주파수들에 해당하며 제 2 쌍은 HF 및 VHF 주파수들에 해당한다. 대안적으로, 전력 소스들은 4개의 RF 전력 소스를 포함하며, 제 1 쌍은 HF 주파수 및 LF 주파수에 해당하며 제 2 쌍은 VHF 주파수 및 다른 주파수에 해당한다. 일 실시예에서, 제 2 쌍은 상위 VHF 주파수와 하위(lower) VHF 주파수에 해당한다. 유도성 소스 전력 애플리케이터, 토로이달 플라즈마 소스 전력 애플리케이터 또는 실링 전극을 통해 다른 주파수가 결합될 수 있다. 또는, 3개의 모든 주파수들은 반응기의 웨이퍼 지지 페데스탈(pedestal)을 통해 결합될 수 있다.

**대표도 - 도2**



## 특허청구의 범위

### 청구항 1

플라즈마 반응기에서 제품(workpiece)을 처리하는 방법으로서,

4개의 개별 주파수들의 4개의 RF 전력 소스들로부터의 RF 전력을 상기 반응기 내의 플라즈마에 결합시키는 단계;

상기 4개의 RF 전력 소스들 중 제 1 쌍의 전력 레벨들 간의 비율을 선택함으로써 이온 에너지 분포 형상을 설정하는 단계; 및

상기 4개의 RF 전력 소스들 중 제 2 쌍의 전력 레벨들 간의 비율을 선택함으로써 이온 해리 및 이온 밀도를 설정하는 단계를 포함하며,

상기 제 1 쌍은 2MHz 초과 HF 주파수 및 0 초과 2MHz 미만의 범위의 더 낮은 주파수에 해당하며, 상기 제 2 쌍은 상위(upper) VHF 주파수 및 하위(lower) VHF 주파수에 해당하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

### 청구항 2

삭제

### 청구항 3

삭제

### 청구항 4

삭제

### 청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 RF 전력을 결합시키는 단계는 유도성 결합된 전력 애플리케이터(applicator)를 통해 상기 하위 VHF 주파수를 결합시키는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

### 청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 RF 전력을 결합시키는 단계는 토로이달(toroidal) RF 전력 애플리케이터를 통해 상기 하위 VHF 주파수를 결합시키는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

### 청구항 7

청구항 7은(는) 설정등록료 납부시 포기되었습니다.

제 1 항에 있어서,

상기 RF 전력을 결합시키는 단계는 상기 반응기의 웨이퍼 지지 페데스탈(pedestal)을 통해 적어도 3개의 주파수들을 결합시키는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

### 청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 RF 전력을 결합시키는 단계는 웨이퍼 지지 페데스탈을 통해 상기 HF 주파수 및 상기 더 낮은 주파수의 전력을 결합시키는 단계 및 상기 반응기의 실링(ceiling)을 통해 상기 상위 VHF 주파수 및 상기 하위 VHF 주파수의 전력을 결합시키는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**청구항 9**

제 8 항에 있어서,

상기 상위 VHF 주파수 및 상기 하위 VHF 주파수의 전력을 결합시키는 단계는 상기 상위 VHF 주파수 및 상기 하위 VHF 주파수의 상기 전력을 상기 실링에 인가하는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**청구항 10**

삭제

**청구항 11**

제 1 항에 있어서,

상기 이온 에너지 분포를 설정하는 단계는 상기 이온 에너지 분포의 한 쌍의 피크들 간의 에너지 차를 조절하는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**청구항 12**

제 1 항에 있어서,

상기 이온 에너지 분포를 설정하는 단계는 상기 이온 에너지 분포의 한 쌍의 피크들 중 다른 하나의 피크에 관하여, 상기 이온 에너지 분포의 한 쌍의 피크들 중 하나의 피크 부근에서의 이온 집단(population)을 조절하는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**청구항 13**

제 1 항에 있어서,

상기 이온 에너지 분포를 설정하는 단계는 상기 이온 에너지 분포의 한 쌍의 피크들 중 하나의 피크의 에너지를 조절하는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**청구항 14**

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법으로서,

3개의 개별 주파수들의 적어도 3개의 RF 전력 소스들로부터의 RF 전력 및 자기장을 상기 반응기 내의 플라즈마에 결합시키는 단계;

상기 적어도 3개의 RF 전력 소스들 중 제 1 쌍의 전력 레벨들 간의 비율을 선택함으로써 이온 에너지 분포 형상을 설정하는 단계;

상기 적어도 3개의 RF 전력 소스들 중 나머지 하나의 전력 레벨과 상기 자기장의 세기 간의 비율을 선택함으로써 이온 해리 및 이온 밀도를 설정하는 단계를 포함하며,

상기 제 1 쌍은 HF 주파수 및 0 초과 2MHz 미만의 범위의 더 낮은 주파수에 해당하며, 상기 적어도 3개의 RF 전력 소스들 중 상기 나머지 하나는 VHF 주파수에 해당하며, 상기 자기장은 극도로 낮은 주파수(extremely low frequency: ELF)를 가지는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**청구항 15**

삭제

**청구항 16**

삭제

**청구항 17**

제 14 항에 있어서,

상기 RF 전력을 결합시키는 단계는 상기 적어도 3개의 RF 전력 소스들 중 상기 나머지 하나를 유도성 결합된 전력 애플리케이터에 결합시키는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**청구항 18**

제 14 항에 있어서,

상기 RF 전력을 결합시키는 단계는 상기 적어도 3개의 RF 전력 소스들 중 상기 나머지 하나를 토로이달 RF 전력 애플리케이터에 결합시키는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**청구항 19**

제 14 항에 있어서,

상기 RF 전력을 결합시키는 단계는 상기 반응기의 웨이퍼 지지 페데스탈을 통해 상기 3개의 주파수들을 결합시키는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**청구항 20**

제 14 항에 있어서,

상기 RF 전력을 결합시키는 단계는 웨이퍼 지지 페데스탈을 통해 상기 더 낮은 주파수 및 상기 HF 주파수를 결합시키는 단계 및 상기 반응기의 실링을 통해 상기 VHF 주파수를 결합시키는 단계를 포함하는,

플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법.

**명세서**

**발명의 상세한 설명**

**발명의 목적**

**발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술**

[0031] 반도체 소자 제조의 기술적 개선은 소자 피쳐 크기 또는 임계치수의 극적 감소를 수반하여, 일례로서 다수의 절연된 도체층들 사이에 형성된 개구부들은 보다 깊어져 보다 큰 종횡비(aspect ratio)들을 가지는 경향이 있다. 본 발명은 벌크 플라즈마에서 플라즈마 이온 밀도, 플라즈마 시쓰(sheath)에서 플라즈마 이온 에너지 분포 및 벌크 플라즈마에서 이온 해리를 독립적으로 동시에 제어함으로써 그런 구조물들 형성시 문제점들을 해결한다. 따라서 본 발명은 이온 밀도, 이온 에너지 분포 및 이온 해리의 선택들이 서로 제한되지 않고 이루어질 수 있는 플라즈마 프로세스들을 수행할 요구들을 달성한다.

**발명이 이루고자 하는 기술적 과제**

[0032] 본 발명의 목적은 플라즈마 프로세스를 수행하는데 있어, 이온 밀도, 이온 에너지 분포 및 이온 해리의 선택이 서로 제한되지 않고 독립적으로 제어될 수 있게 하는 것이다.

**발명의 구성 및 작용**

[0033] 플라즈마 반응기에서 제품을 처리하는 방법은, 3개의 개별 주파수들의 적어도 3개의 RF 전력 소스로부터의 RF 전력을 반응기내의 플라즈마에 결합하는 단계, 적어도 3개의 RF 전력 소스들 중 제 1 쌍의 전력 레벨들 간의 비율을 선택함으로써 이온 에너지 분포 형상을 설정하는 단계, 및 적어도 3개의 RF 전력 소스들 중 제 2 쌍의 전력 레벨들 간의 비율을 선택함으로써 이온 해리 및 이온 밀도를 설정하는 단계를 포함한다. 3개의 개별 주파수들은 LF 주파수, HF 주파수 및 VHF 주파수일 수 있으며, 상기 제 1 쌍은 LF 및 HF 주파수들에 해당하며 제 2 쌍은 HF 및 VHF 주파수들에 해당한다. 대안적으로, 전력 소스들은 4개의 RF 전력 소스들을 포함하며, 상기 제 1 쌍은 HF 주파수 및 LF 주파수에 해당하며 제 2 쌍은 VHF 주파수 및 다른 주파수에 해당한다. 일 실시예에서, 제 2 쌍은 상위 VHF 주파수 및 하위(lower) VHF 주파수에 해당한다. 유도성 소스 전력 애플리케이션, 토로이달 플라즈마 소스 전력 애플리케이션 또는 실링(ceiling) 전극을 통해 다른 주파수가 결합될 수 있다. 또는, 3개의 모든 주파수들이 반응기의 웨이퍼 지지 페데스탈(pedestal)을 통해 결합될 수 있다.

[0034] 바람직하게, 주파수들의 제 1 쌍은 이온 변이 주파수(ion transit frequency) 보다 작은 제 1 주파수 및 이온 변이 주파수 보다 큰 제 2 주파수이다. 이온 에너지 분포의 한 쌍의 피크들 간의 에너지 차를 조절하거나, 또는 이온 에너지 분포의 한 쌍의 피크들 중 다른 피크에 관하여 이온 에너지 분포의 한 쌍의 피크들 중 하나의 피크 부근의 이온 집단(ion population)을 조절하거나 또는 이온 에너지 분포의 한 쌍의 피크들 중 하나의 피크의 에너지를 조절함으로써 이온 에너지 분포는 조절된다.

[0035] 도 1을 참조로, 용량성 결합된 반응기 챔버(100)는 반도체 웨이퍼(110)를 정전기적으로 클램핑할 수 있는 정전기 척(ESC)일 수 있는 웨이퍼 지지 페데스탈(105)을 둘러싼다. ESC는 알루미늄 베이스층(5) 및 절연층 또는 메쉬 또는 그리드 전극(15)에 의해 하부 펙층(10) 및 상부 펙층(20)으로 나뉘는 펙(puck)을 포함한다. 척(105)의 에지는 다른 유전체 링(120) 상에서 지지되는 웨이퍼(110)와 동일한 평면에 위치되는 유전체 링(115)으로 강화될 수 있다. 챔버(100)의 실링(ceiling)은 환형의 도전성 링(127a) 및 전극(125)을 절연시키는 유전체 링(130)에 의해 챔버 도전성 측벽(127) 상에서 지지되는 오버헤드 도전성 전극(125)이며, 링들(127a, 130) 및 전극(125)은 전극 어셈블리(126)를 형성한다. 플라즈마를 면하는 전극(125)의 하부 표면은 플라즈마 이온 분포의 균일성을 강화시키는 평탄 표면(125a) 또는 굽은 표면(125b)일 수 있다. RF 발생기(150)로부터의 RF 소스 전력은 고정 임피던스 매칭 부재로서 기능하는 임피던스 매칭 스템(stub)(135)을 통해 전극(125)에 결합된다. 스템(135)은 내부 및 외부 동축 도체들(135a, 135b)로 구성되며, 내부 스템 도체(135a)는 내부 도전성 링(135a')을 통해 전극(125)에 접속되며 외부 스템 도체(135b)는 외부 도전성 링(135b')을 통해 접지된 챔버 측벽 링(127a)에 접속된다.

[0036] RF 발생기(150)는 임피던스 매칭을 제공하도록 위치한 스템의 길이방향을 따라 탭 포인트(163)에서 50-옴 동축 케이블(162)을 통해 스템에 결합된다. 케이블(162)의 내부 및 외부 도체들은 스템 내부 및 외부 도체들(135a, 135b)에 각각 접속된다. RF 바이어스 전력은 RF 공급 도체(25)를 통해 퍼드포인트(25a)에서 RF 공급 도체(25)에 결합된 ESC 전극(15)에 인가된다. ESC 클램핑 전압 소스(41)는 ESC 전극(15)에 D.C. 웨이퍼 클램핑 전압을 인가한다.

[0037] 오버헤드 전극(125)은 가스 분배 플레이트일 수 있으며, 이 경우 상기 오버헤드 전극은 스템(135) 내부의 중공에 있는 도관(144)을 통해 프로세스 가스 공급부(146)에 결합되는 내부 가스 매니폴드(142)를 가지는 다수의 가스 주입 오리피스들(140)을 포함한다. 유사하게, 열 전달(냉각/가열) 유체는 가열/냉각 유체 소스(149)로부터 전극(125) 내의 순환 통로들(148)에 결합될 수 있다. 정전기 척(ESC)(105)의 온도는 ESC 베이스(5) 내부에 포함된 내부 증발기(200) 및 축압기(accumulator)(204), 압축기(compressor)(206), 응축기(condenser)(208) 및 팽창 밸브(210)와 같은 외부 냉각 부품을 포함하는 냉각 루프(refrigeration loop)에 의해 제어될 수 있다.

[0038] 플라즈마 이온 밀도의 방사상 분포는 플라즈마 분포 제어기(57)의 제어하에 전류 소스들(58, 59)의 개별적으로 조절가능한 D.C. 전류들로 구동되는 내측 및 외측 외부 자기 코일들(60, 65)에 의해 조절된다.

[0039] 소스 전력 발생기(150)의 VHF 주파수에서 또는 VHF 주파수 부근의 주파수에서 전극-플라즈마 공진 주파수를 형성하도록 전극(125)의 리액턴스가 챔버(100)내의 플라즈마의 리액턴스에 매칭될 경우, 및 RF 튜닝 스템(135)의 공진 주파수(상기 스템의 길이에 따라 결정됨)가 이런 동일 주파수에 있거나 또는 이런 동일 주파수 부근의 주파수에 있는 경우, 전극-튜닝 스템 조합물(125, 135)의 임피던스 매칭 공간은 극적으로 팽창된다. 임피

던스 매칭 공간에서 결과적인 팽창은 챔버 내부 표면들의 전기적 성질 및 플라즈마에서의 변동하는 조건에 반응기 성능이 사실상 영향받지 않도록 한다.

[0040] 한 쌍의 RF 발생기들(40a, 40b)은 개개의 임피던스 매칭 부재들(45a, 45b)을 통해 RF 공급 도체(25)에 RF 전력을 인가한다. RF 발생기들(150, 40a, 40b)로부터의 RF 전력 출력 레벨들은 프로세스 제어기(300)에 의해 독립적으로 제어된다. 바람직하게, RF 발생기(40a)는 HF 주파수 범위 또는 이온 시스(sheath) 변이 주파수 보다 약간 높고 예를 들어 13.56 MHz일 수 있는 시스 이온 에너지 뿐만 아니라 벌크 이온 밀도에 기여하기에 충분히 높은 범위의 RF 출력을 갖는다. 바람직하게 RF 발생기(40b)는 LF 주파수 범위의, 또는 예를 들어 2MHz일 수 있는 이온 시스 변이 주파수 보다 약간 낮은 주파수의 RF 출력을 갖는다. 바람직하게 RF 발생기(150)는 이온 에너지에 무시 가능한 기여를 하거나 또는 이온 에너지에 기여하지 않고 벌크 이온 밀도 및 이온 해리 모두에 기여하기에 충분히 높은 VHF 주파수를 제공한다. 프로세스 제어기(300)는 이온 에너지, 이온 밀도 및 이온 해리를 다음과 같이 개별적으로 조절한다: 이온 에너지는 이온 밀도에 최소의 영향을 미치며 LF 및 HF 발생기들(40b, 40a)의 전력 레벨들의 비율을 조절함으로써 이온 해리에 영향을 미치지 않고 조절된다; 이온 해리는 HF 및 VHF 발생기들(40a, 150)의 전력 레벨들의 비율을 조절함으로써 이온 에너지에 거의 영향을 미치지 않거나 또는 영향을 미치지 않고 이온 밀도에 관하여 조절된다. 이는 이온 에너지, 이온 밀도, 이온 해리의 3가지 파라미터를 개별적인 방식으로 조절할 수 있게 한다. 그러나 이러한 조절들이 완전히 독립적인 것은 아닌데, 그 이유는 VHF 전력 레벨(발생기(40a))이 이온 에너지 및 이온 밀도 조절 모두에 관련되기 때문이다.

[0041] 3가지 파라미터들(에너지, 밀도, 해리) 조절에 있어 완전한 독립은 독립적으로 이온 밀도에만 영향을 미치는 플라즈마에 제어가능한 자기장을 도입함으로써 달성된다. LF, HF 및 VHF 전력 소스들(40a, 40b, 150)과 함께 이러한 피쳐는 밀도 및 해리가 서로 독립적으로 그리고 이온 에너지에 독립적으로 조절될 수 있게 한다. 이를 위해, 도 1의 반응기는 자기장 전류 제어기(505)에 의해 제어되는 독립적인 전류 입력부들(501a, 502a, 503a, 504a)을 가지며 직교하는 관계에 있는 자기 코일들(501, 502, 503, 504)을 포함하도록 변형될 수 있다. 제어기(505)는 극히 낮은 주파수(예를 들면 10Hz) 전류들을 입력부들(501a, 502a, 503a, 504a)에 제공할 수 있으며, 이들은 서로 위상이 오프셋(offset)될 수 있다. 플라즈마 RF 소스 전력(즉, VHF 발생기(150)에 의해 인가된 VHF 전력)의 존재 시, 플라즈마 이온 밀도는 자기 코일들(501-504)로의 전류들을 증가 또는 감소시킴으로써 다른 파라미터들에 큰 영향을 미치지 않고(또는 다른 파라미터들에 전혀 영향을 미치지 않고) 증가 또는 감소될 수 있다. VHF 발생기(150)가 상당히 높은 주파수(예를 들면, 100-300 MHz 이상)를 갖는다면, 이는 이온 해리 및 이온 밀도 모두에 영향을 미친다. 따라서 이들 이온 해리 및 이온 밀도는 함께 조절될 수 있고, 상기 이온 밀도의 개별 독립적 조절은 자기장만을 조절함으로써 수행된다.

[0042] 도 4의 실시예에서, (이온 밀도의 독립적 조절을 제공하기 위한) 자기장의 기능은 (실선으로 도시된 VHF 발생기(150')로부터) 오버헤드 전극(125) 또는 (점선으로 도시된 VHF 발생기(40c)로부터) ESC 전극(15) 중 어느 하나에 인가되는 제 2 VHF 주파수에 의해 대신 수행된다. 상기 제 2 VHF 주파수는 제 1 VHF 발생기(150)(예를 들어, 300MHz 미만)의 주파수보다 충분히 낮아, 상기 제 2 VHF 주파수의 주요(principal) 효과는 이온 해리에 거의 영향을 미치지 않거나 또는 영향을 미치지 않고(또는 적어도 제 1 VHF 발생기보다 효과가 작고) 이온 밀도에만 미친다. 예를 들어, 제 1 VHF 발생기(150)의 상위 VHF 주파수는 약 160MHz일 수 있는 반면 제 2 VHF 발생기(150' 또는 40c)의 하위 VHF 주파수는 약 60MHz일 수 있다. 이러한 목적을 위해 제 2 VHF 발생기(150')가 사용된다면, 제 2 VHF 발생기(150')는 제 1 발생기(150)와 동일한 임피던스 매칭 스테브(135)를 통해, 그러나 제 2 VHF 발생기(150')의 상이한 주파수에서 임피던스 매칭을 형성하는 상이한 탭 포인트(163')에 결합될 수 있다. 도 4에 도시된 탭 지점들(163, 163')은 축척적으로 도시된 것이 아니며 상기 탭 지점들의 위치 및 순서는 도시된 것과 상이할 수 있다. 제 2 VHF 주파수가 ESC 전극(15)에 인가된다면, 제 2 VHF 발생기(40c)는 임피던스 매칭 유니트(45c)를 통해 RF 공급 로드(25)에 결합된다. 이 경우, 3개의 임피던스 매칭 유니트들(45a, 45b, 45c) 모두는 RF 공급 도체(25)에 접속되는 이들의 출력부들을 갖는다.

[0043] 도 4는 공통 임피던스 매칭 부재(135)를 통해 어떻게 오버헤드 전극(125)에 2개의 VHF 주파수들이 인가될 수 있는지를 나타내는 반면, 도 5는 상이한 임피던스 매칭 부재들(320, 325)을 통해 2개의 VHF 발생기가 전극에 결합되는 경우를 나타낸다.

[0044] 도 4 및 도 5의 실시예들에서, 이온 에너지 및 이온 에너지 분포는 LF 및 HF 발생기들(40a, 40b)의 전력 레벨들을 제어함으로써 조절되는 반면, 이온 밀도 및 이온 해리는 2개의 VHF 발생기들(150, 150')(또는 대안적 실시예에서 2개의 VHF 발생기들(150, 40c))의 출력 전력 레벨들을 제어함으로써 독립적으로 제어된다.

[0045] 도 6은 오버헤드 전극(125) 위에 놓인 유도성 결합된 전력 애플리케이터(350)(즉, 오버헤드 코일 안테나)에 해

리를 제어하는 (즉, 발생기(150)로부터) RF 전력이 어떻게 인가될 수 있는지를 나타낸다. 이는 오버헤드 전극(125)이 코일 안테나(350)로부터 유도성 결합된 RF 전력을 차단하지 않는 형태를 가지는 것을 요구한다. 전극(125)을 통한 RF 전력의 유도성 결합을 허용하기 위해, 케네스 콜린스(Kenneth Collins)의 US 특허 No. 6,444,084호에 개시된 것처럼, 전극은 실리콘과 같은 도핑된 반도체 재료로 형성된 솔리드 디스크(도 7)일 수 있다. 대안적으로, 전극(125)은 도 8에 도시된 것처럼, RF 전력이 전극(125)을 통해 유도성 결합될 수 있도록 하기 위해 슬롯형 구조물을 가질 수 있다. 유도성 코일 안테나(350)에 인가되는 RF 주파수는 반드시 VHF 주파수일 필요는 없는데, 그 이유는 하위 주파수에서조차, 유도적으로 결합된 플라즈마는 비교적 높은 해리도를 나타내기 때문이다. 도 6의 발생기(150)의 주파수는 HF 주파수 또는 심지어 LF 주파수일 수 있으며 여전히 해리에 큰 영향을 줄 수 있다. 대안적으로, 오버헤드 전극에 결합된 VHF 발생기(150')는 임피던스 매칭 유닛(45c)를 통해 ESC RF 공급 도체(25)에 결합되는 (동일 주파수의) VHF 발생기(40c)에 의해 대체될 수 있다. 도 6의 실시예에서, 이온 에너지 및 이온 에너지 분포는 LF 및 HF 발생기들(40a, 40b)의 전력 레벨들을 제어함으로써 조절되는 반면, 이온 밀도 및 이온 해리는 2개의 발생기들(150, 150')(또는 대안적 실시예에서 2개의 VHF 발생기들(150, 40c))의 출력 전력 레벨들을 제어함으로써 독립적으로 제어된다.

[0046] 도 9는 코일 안테나(350)가 전극(125)과 웨이퍼(110) 사이의 프로세스 영역을 통과하는 토로이달 플라즈마 전류 경로를 형성하는 외부 재진입의 중공 도관(410)을 둘러싸는 토로이달 RF 전력 애플리케이션(420)에 의해 대체되는 실시예를 나타낸다. 외부 재진입의 중공 도관(410)과 토로이달 RF 전력 애플리케이션(420)은 토로이달 플라즈마 소스를 구성한다. RF 발생기(150)는 임피던스 매칭 부재(325)를 통해 토로이달 RF 전력 애플리케이션(420)에 결합된다. 토로이달 RF 전력 애플리케이션(420)은 자기 또는 자기화가능 재료로 형성된 링(422)(예를 들어, 자기 코어) 및 자기 링 둘레를 감고 있으며 RF 임피던스 매칭 부재(325)에 의해 구동되는 도전성 와인딩(424)으로 구성된다. 점선으로 도시된 것처럼, 제 2 토로이달 RF 전력 애플리케이션(420')를 가지는 제 2 (동일) 중공의 재진입 도관(410')은 제 1 도관(420)을 횡단하도록 제공될 수 있다. 도관(410)은 웨이퍼(110)와 전극(125) 사이에 형성된 프로세스 영역의 반대 측면 상에 놓여 있는 엔클로저에 있는 포트들을 통해 도관의 각 단부에서 챔버(100)로 진입한다. 이러한 피쳐는 토로이달 플라즈마 전류가 웨이퍼(110)의 전체 직경을 거쳐 흐르게 한다. 토로이달 플라즈마 전류는 RF 전력 소스(150)의 주파수에서 진동한다. 도 9의 실시예에서, 이온 에너지 및 이온 에너지 분포는 LF 및 HF 발생기들(40a, 40b)의 전력 레벨들을 제어함으로써 조절되는 반면, 이온 밀도 및 이온 해리는 2개의 발생기들(150, 150')의 출력 전력 레벨들을 제어함으로써 독립적으로 제어된다.

[0047] 도 10a는 플라즈마 반응기에서 주파수의 함수로서 이온 에너지에 기여하는 전력과 이온 밀도에 기여하는 RF 전력을 비교하는 그래프이다. 상기 그래프는 0 내지 약 13MHz 범위의 3개의 주요 주파수 범위들이 있다는 것을 나타내며, 거의 모든 RF 전력은 플라즈마 이온 에너지에 기여한다. 약 13MHz 내지 약 65MHz에서, 전력은 이온 에너지에 기여하는 것과 이온 밀도에 기여하는 것 사이에서 나뉜다. 약 65MHz 초과에서, 거의 모든 RF 전력은 이온 밀도에 기여한다. 13MHz에서 및 이보다 약간 아래에서 이온 에너지에 대한 기여는 피크-대-피크 RF 전압에서 중심설정된 폭이 좁은 이온 에너지 분포를 생성한다. RF 주파수가 이온 변이 주파수 또는 이보다 아래의 주파수로 감소함에 따라 이러한 이온 에너지 분포는 넓어지며, 시스의 이온들에서의 가장 높은 주파수는 RF 진동을 따를 수 있다. 이온 에너지 분포는 2MHz의 낮은 주파수에서 최대 폭을 갖는다. 이러한 효과들은 도 10b에 도시되며, 도 10b는 단일 RF 바이어스 소스에 대해 상이한 RF 바이어스 전력 주파수들에서 얻어진 이온 에너지 분포들을 비교하는 그래프이다. 도 10b는 가장 넓은 이온 에너지 분포가 가장 낮은 주파수(2MHz)에서 얻어지고 가장 좁은 이온 에너지 분포가 가장 높은 주파수(13MHz)에서 얻어진다는 것을 나타낸다. 높은 주파수 및 낮은 주파수 모두를 혼합함으로써, 도 10c에 도시된 것처럼, 에너지 분포는 더 높은 에너지를 향해 휘게(skew)될 수 있으며, 도 10c는 2개의 주파수들의 상이한 전력비들에 대해 듀얼 주파수 바이어스 소스들로 얻어진 이온 에너지 분포들을 비교하는 그래프이다. 상위 집단 피크는 중간 또는 높은 주파수(예를 들어, 13MHz) 소스의 피크-대-피크 전압에 해당하는 이온 에너지에 있다. 제 2 상위 집단(population) 피크는 하위 주파수(예를 들어, 2MHz) 전력에 해당한다. 본 발명의 바람직한 실시예에 따라, 이온 에너지 분포는 낮은 주파수(예를 들어, 2MHz) 전력의 전력 레벨들과 중간 또는 높은 주파수(예를 들어, 13MHz) 전력 소스 사이의 비를 조절함으로써 하위 에너지 이온 집단에 관하여 높은 에너지 이온 집단을 증가 또는 감소시키기 위해 조절된다. 도 10c의 비교는 낮은 주파수(예를 들어 2MHz) RF 전력이 상위 에너지들에 있는 이온 집단에 보다 기여하고, 높은 주파수(예를 들어 13MHz) RF 전력에 대해서는 그 반대에 해당한다는 것을 나타낸다. 따라서, 이온 에너지 분포의 폭 및 이온 에너지 분포의 높은 주파수 함량(content)은 낮은 주파수 전력 대 높은 주파수 전력의 비율을 증가시킴으로써 강화된다. 또한, 도 10c는 HF(예를 들어 13MHz) 전력이 제로에 근접해짐에 따라, 지배적(predominant) 피크가 항상 상위 주파수로 이동한다는 것을 나타낸다. 따라서, 이온 에너지 분포는 낮은 주파수와 높은 주파수 전력 레벨들 사이에서의 비율을 조절함으로써 선택된다.

- [0048] 해리 및 이온 밀도의 제어는 해리 및 밀도에 상이한 효과들을 가지는 2개의 상이한 주파수들을 갖는 개별 소스들의 전력 레벨들을 조절함으로써 제공된다. 상위 HF 또는 하위 VHF 주파수들은 이온 밀도에는 크게 기여하거나 이온 해리에는 거의(very little) 기여하지 않는다. 이는 도 11a 및 도 11b에 도시되며, 도 11a 및 도 11b는 주파수의 함수로서 이온 해리와 이온 밀도의 거동들을 비교하는 그래프들이다. 하위 범위(도 11b의 f 변이까지)의 주파수들은 이온 밀도에 크게 영향을 미치지만(도 11b) 이온 해리에는 거의 영향을 미치지 않는다(도 11a). 통상적으로 두 개의 범위들을 경계로하는("f 변이") 주파수가 VHF 주파수이며, 상기 VHF 주파수 값은 다양한 프로세스 파라미터들에 따라 좌우되지만 약 100MHz 정도일 수 있다.
- [0049] 도 12는 이온 해리의 함수로서 탄화불소 가스를 함유하는 플라즈마에서의 평균 탄화불소 분자량을 나타내는 그래프이다. 도 12는 해리를 수량화하는 하나의 방식을 나타내며, 이것은 플라즈마에서 특정 클래스의 분자들(이를 테면, 탄화불소 분자들)의 분자량의 평균치(average) 또는 평균(mean)이다. 분자량이 낮을수록, 해리도는 높아진다. 이러한 개념은 도 13에 도시된 광학적 방출 스펙트럼(OES) 데이터의 결과들을 반영한 것으로, 도 13은 낮은 이온 해리 및 높은 이온 해리에서의 플라즈마의 분자량 분포를 비교한 그래프이다. 하위 해리에서, 집단 피크들은 보다 복잡한 분자들에 부합되는 반면, 상위 해리에 대해서는 그 반대에 해당한다. 2개의-소스 주파수 시스템에 도 11a 및 도 11b의 결과들을 적용함으로써, 플라즈마의 밀도 및 해리는 상위 및 하위 주파수 소스 전력 발생기들(둘 다는 VHF 발생기들일 수 있다)의 전력 레벨들 사이의 비율을 제어함으로써 개별적으로 제어될 수 있다. 이는 도 14에 도시되고, 도 14는 2개의 상이한 소스 전력 주파수들 사이의 전력비의 함수로서 이온 해리의 거동을 나타내는 그래프이다. 도 1의 3개의-주파수 접근법 또는 도 2-도 5의 4개의-주파수 접근법을 사용하여, 이온 에너지, 이온 밀도 및 이온 해리를 나타내는 3개의 독립적(즉, 직교) 축들을 따라 3차원 제어 공간이 구현된다. 도 15는 벌크 플라즈마에서 이온 해리, 벌크 플라즈마에서 이온 밀도 및 플라즈마 시스에서 이온 에너지가 제어 공간을 한정하는 3개의 독립적(직교) 차원들인 그런 3차원 제어 공간을 나타낸다.
- [0050] 바람직하게, 그후 이온 밀도 및 이온 해리를 제어하는 도 1의 2개의 발생기들(40a, 150)의 주파수들은 f 변이의 어느 한쪽 측면에 놓인다. 또는, 상기 주파수들이 동일한 측면에 놓이는 경우, 상기 주파수들은 서로 충분히 상이하여, 상기 주파수들 중 하나의 주파수는 다른 주파수보다 더 이온 해리에 영향을 미친다. 주로 이온 밀도에 영향을 미치는 주파수는 하위 VHF 주파수이고, 이온 해리 및 밀도에 영향을 미치는 주파수는 상위 VHF 주파수이다. 이들 상위 및 하위 VHF 주파수들은 "f 변이" 초과 및 미만(각각)에 있거나 또는 있지 않을 수 있다. 결과적으로, 2개의 주파수들을 별개로 제어함으로써, 이온 밀도 및 이온 해리의 상이한 값들은 적어도 거의 독립적으로 선택될 수 있다. 동일한 것이 도 4 및 도 5의 발생기들(150, 150')의 2개 주파수에 대해서도 해당된다. 하나의 주파수가 다른 주파수보다 더 이온 해리에 영향을 미치도록, 2개의 주파수들은 서로 충분히 상이해야 한다. 그리고, 2개의 주파수들이 도 11a 및 도 11b의 f 변이의 반대 측면들 상에 놓이는 것이 바람직하다(그러나, 필수는 아님).
- [0051] 도 16은 도 1의 반응기와 같이, LF, HF 및 VHF 주파수 소스들로 이루어진 3개의 RF 소스들을 가진 플라즈마 반응기에서 상이한 주파수들의 3개의 RF 전력 소스들을 이용하여 이온 에너지 분포, 이온 밀도 및 이온 해리를 개별적으로 제어하기 위한 제 1 방법을 나타낸다. 상기 방법은 플라즈마에 VHF 전력, HF 전력 및 LF 전력을 동시에 인가함에 따라 좌우된다(도 16의 블록(360)). 이온 에너지 함량은, 2개의 발생기들(예를 들면, 도 1의 HF 및 LF 발생기들(40a, 40b)) 각각이 조절 또는 설정될 수 있는 전력 레벨들의 이산 또는 연속 범위들 또는 연속체에 대응하는 비율들의 연속적인 범위 내에서 HF 전력 소스와 LF 전력 소스 사이의 전력비를 선택함으로써, 이온 밀도(예를 들면, 이온 밀도는 원하는 경우 일정하게 유지될 수 있다)에 관하여 (이온 에너지 분포의 폭을 넓히거나 또는 분포 피크의 평균 에너지를 이동시키거나 또는 이들 둘 다를 수행하기 위해) 조절된다(도 16의 블록(361)). 이온 해리는 VHF 전력 소스 - 예를 들면, 도 1의 발생기(150) - 와 HF 전력 소스 - 예를 들면, 도 1의 발생기(40b) - 간의 전력비를 선택함으로써 이온 밀도에 관하여 조절된다(블록(362)). 예를 들면, 이온 밀도는 단지 HF 전력 레벨만을 조절함으로써 해리에 관하여 조절될 수 있다. 또는, HF 전력 레벨에서 상쇄 변화들을 형성함으로써 이온 밀도를 일정한 레벨로 유지하면서 해리를 조절하기 위해 VHF 전력 레벨을 조절함으로써 일정한 밀도를 유지하면서 해리가 조절될 수 있다. 상기 단계(블록(362))는 이온 에너지 레벨의 선택 또는 확산을 제한하지 않도록 블록(361) 단계와 함께 또는 그 이전에 수행될 수 있다. 그후에 LF, HF 및 VHF 전력 소스들의 전력 레벨들은 이전 선택들에 따라 설정된다(블록(363)).
- [0052] 도 17은 도 4, 도 5, 도 6 또는 도 9에 도시된 형태의 플라즈마 반응기에서 상이한 주파수들의 4개의 RF 전력 소스를 이용하여 이온 에너지 분포, 이온 밀도 및 이온 해리를 독립적으로 제어하기 위한 제 2 방법을 나타낸다. 도 17의 하기 설명은 밀도 및 해리의 독립적 제어를 위한 상위 및 하위 VHF 주파수들을 참조하지만, 도 6 또는 도 9에서 해리 제어를 제공하는 주파수가 반드시 상위 VHF 주파수일 필요는 없지만 대신 유도성 전력



애플리케이션(도 6)을 구동시키거나 또는 토로이달 전력 애플리케이션(도 9)을 구동시키는 HF 또는 LF 주파수일 수도 있다는 것이 이해된다.

[0053] 도 17에서, 특히 (도 4 및 도 5의 경우에서) LF 주파수, HF 주파수, 하위 VHF 주파수 및 상위 VHF 주파수인 4개의 주파수들은 플라즈마에 동시에 인가된다(블록(364)). 이온 에너지 함량은, HF 전력 소스와 LF 전력 소스 간의 적당한 전력 비율을 이런 비율들의 연속 범위 또는 연속체로부터 선택함으로써 (이온 에너지 분포를 넓히거나 또는 분포 피크의 평균 에너지를 이동시키거나 또는 둘 다를 수행하기 위해) 조절된다(도 17의 블록(365)). 이온 해리는 하위 VHF 전력 소스와 상위 VHF 전력 소스간의 전력비를 이러한 비율들의 범위 또는 연속체로부터 선택함으로써 이온 밀도에 관하여 조절된다(블록(366)). 그후에, LF, HF, 하위 VHF 및 상위 VHF 전력 소스들의 전력 레벨들은 이전 선택들에 따라 설정된다(블록(367)).

[0054] 도 18은 자기장 세기의 함수들로서 이온 밀도 및 이온 해리의 동시 거동들을 나타내는 3차원 그래프이다. 도 18에 도시된 것처럼, 도 2의 코일들(501, 502, 503, 504)에 의해 생성된 자기장의 세기 변화는 단지 플라즈마 이온 밀도만을 변화시키며 이온 해리에는 크게 영향을 미치지 않는다. 도 19는 VHF 소스 전력 레벨의 함수들로서 이온 밀도와 이온 해리의 동시 거동들을 나타내는 3차원 그래프이다. 도 19는 VHF 전력에서의 변화들이 이온 밀도 및 이온 해리 둘 다에 영향을 미친다는 것을 나타낸다. 따라서, VHF 전력 및 자기장 세기 모두를 조절함으로써, 이온 밀도 및 이온 해리가 독립적으로 선택된 레벨들로 설정될 수 있다.

[0055] 도 20은 도 2의 반응기처럼 RF 바이어스 전력 소스들의 쌍, VHF 전력 소스 및 자기장 소스를 가지는 형태의 반응기에서 이온 에너지 분포, 이온 밀도 및 이온 해리를 독립적으로 제어하는 방법을 나타낸다. 상기 방법은 플라즈마에 자기장, VHF 전력, HF 전력 및 LF 전력을 동시에 인가하는 것에 좌우된다(도 20의 블록(368)). 이온 에너지 함량은, HF 전력 소스와 LF 전력 소스 간의 전력비를 선택함으로써 (이온 에너지 분포의 폭을 넓히거나 또는 분포 피크의 평균 에너지를 이동시키거나 또는 둘 다를 수행하기 위해) 조절된다(블록(369)). 이온 해리는 VHF 전력 소스에 대해 전력 레벨을 선택하고 도 2의 자기장 제어기(505)에 의해 제공될 자기장 세기를 선택함으로써 이온 밀도에 관하여 조절된다(블록(370)). 그 다음 LF, HF 및 VHF 전력 소스들의 전력 레벨들 및 제어기(504)의 자기장 세기는 이전 선택들에 따라 설정된다(블록(371)).

[0056] 지금까지 본 발명은 바람직한 실시예들에 대한 특정 참조에 의해 상세하게 개시되었지만, 본 발명의 진정한 범위 및 사상을 벗어나지 않고 본 발명의 변형들 및 변동들이 이루어질 수 있다는 것이 이해된다.

**발명의 효과**

[0057] 본 발명에 따라 이온 밀도, 이온 에너지 분포 및 이온 해리의 선택이 서로 제한되지 않고 이루어질 수 있는 플라즈마 프로세스들을 수행하기 위한 요구조건들이 달성된다.

**도면의 간단한 설명**

[0001] 도 1은 이온 밀도, 이온 에너지 분포 및 이온 해리가 LF 및 HF 듀얼 바이어스 전력 레벨들 및 VHF 소스 전력 레벨을 개별적으로 조절함으로써 독립적으로 제어되는 플라즈마-공진(plasma-resonant) 오버헤드 전극을 갖춘 용량성 결합된 플라즈마 반응기를 나타내는 도면;

[0002] 도 2는 이온 에너지 분포가 듀얼 LF 및 HF 바이어스 전력 소스들을 제어함으로써 조절되는 반면 이온 밀도 및 이온 해리가 VHF 소스 전력 레벨 및 자기장 세기를 제어함으로써 조절되는 도 1의 실시예를 나타내는 도면;

[0003] 도 3은 도 2에 대응하는 상부도;

[0004] 도 4는 이온 에너지 분포가 듀얼 LF 및 HF 바이어스 전력 소스들을 제어함으로써 조절되는 반면 이온 밀도 및 이온 해리가 공통 고정 임피던스 매칭 부재를 통해 공급되는 상위(upper) 주파수 및 하위(lower) 주파수의 VHF 소스 전력 레벨들을 제어함으로써 조절되는 도 1의 실시예를 나타내는 도면;

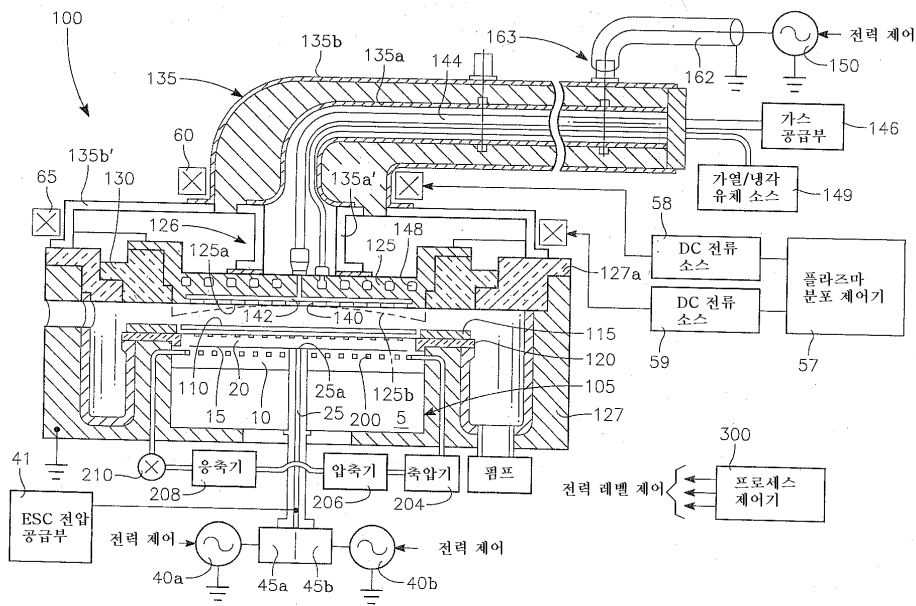
[0005] 도 5는 이온 에너지 분포가 듀얼 LF 및 HF 바이어스 전력 소스들을 제어함으로써 조절되는 반면 이온 밀도 및 이온 해리가 개별 고정 임피던스 매칭 부재들을 통해 상위 주파수 및 하위 주파수의 VHF 소스 전력 레벨들을 제어함으로써 조절되는 반응기를 나타내는 도면;

[0006] 도 6은 이온 에너지 분포가 듀얼 LF 및 HF 바이어스 전력 소스들을 제어함으로써 조절되는 반면 이온 밀도 및 이온 해리가 오버헤드 전극에 인가되는 VHF 소스 전력 레벨 및 유도성 RF 전력 애플리케이션 또는 코일 안테나에 인가되는 RF 소스 전력 레벨을 제어함으로써 조절되는 반응기를 나타내는 도면;

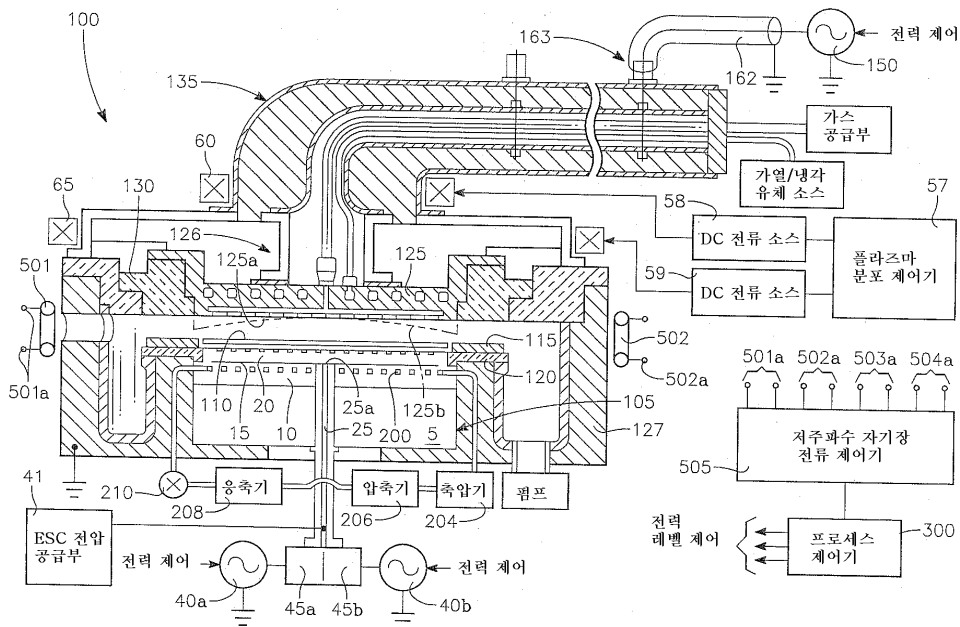


도면

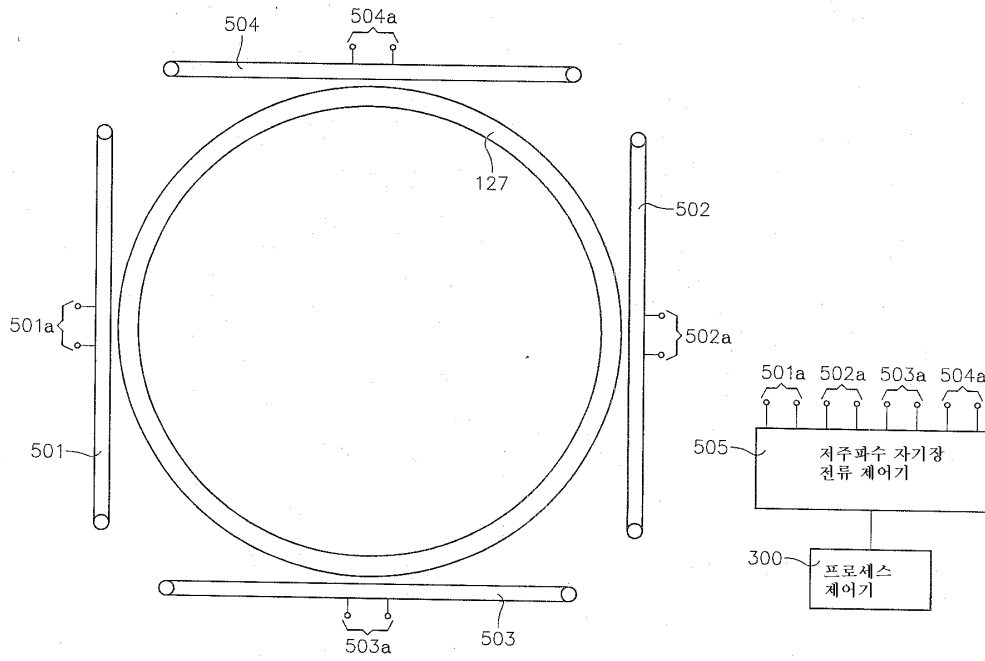
도면1



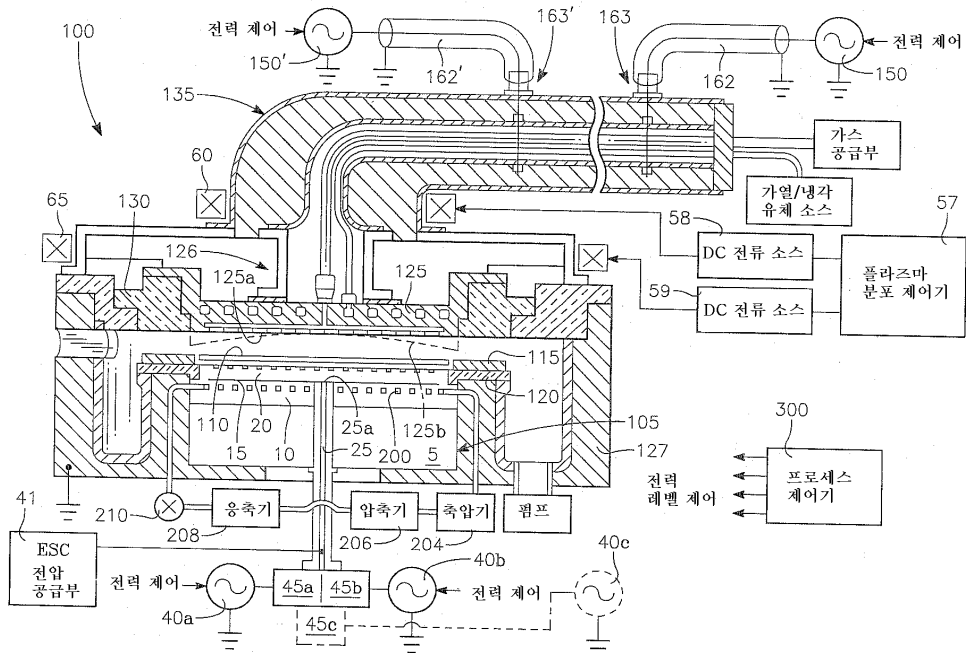
도면2



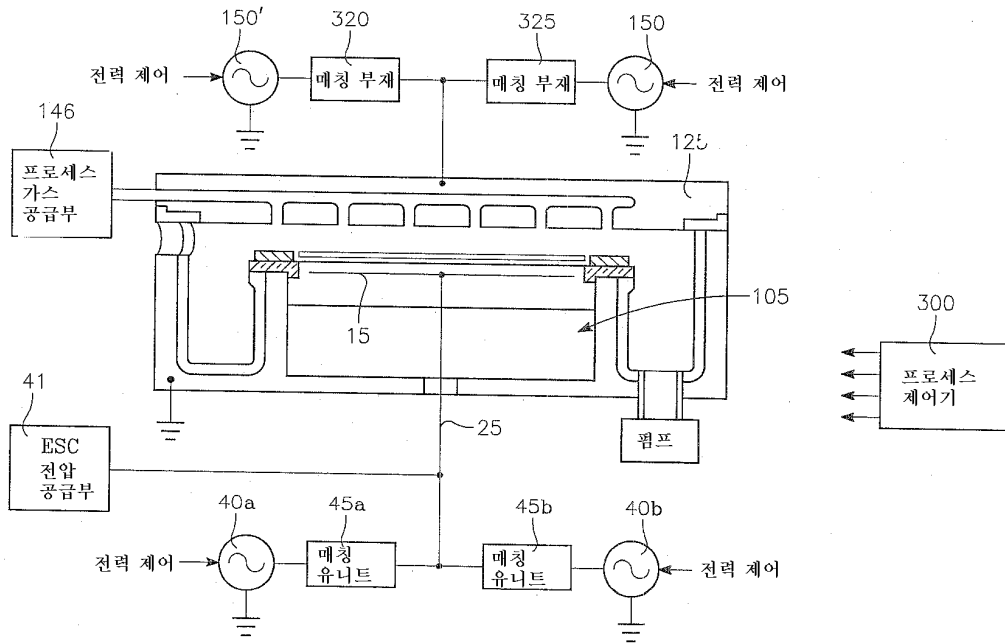
도면3



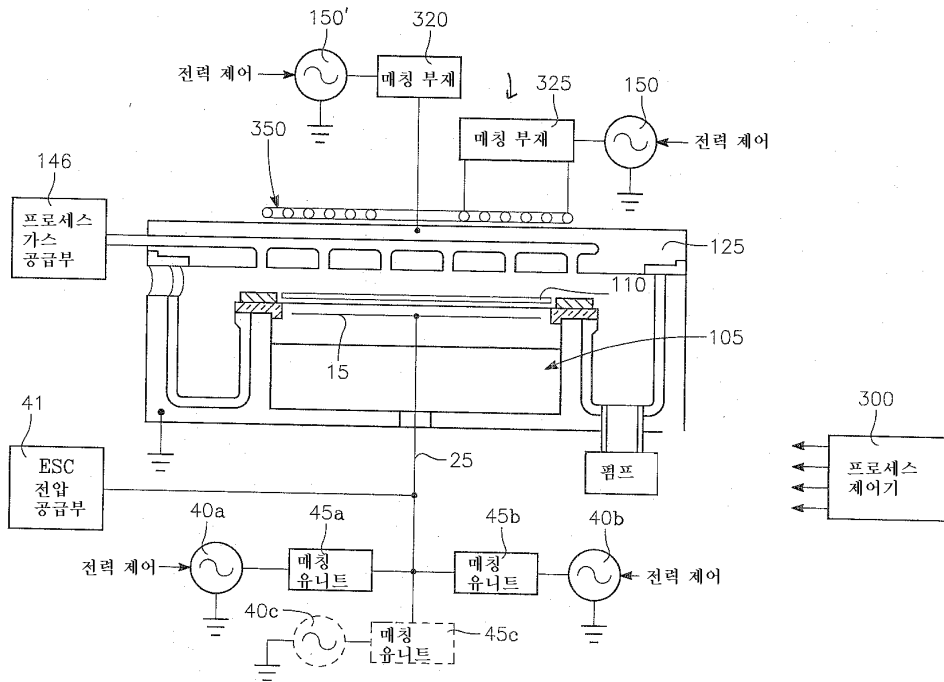
도면4



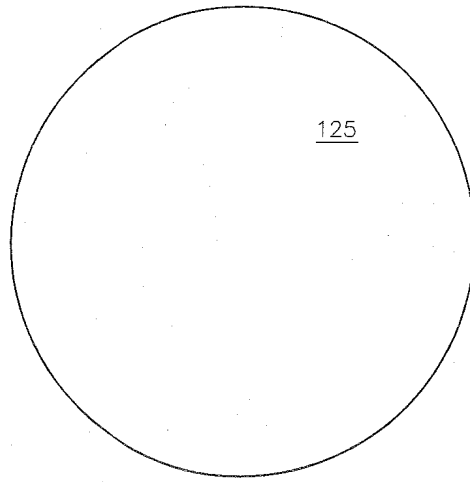
도면5



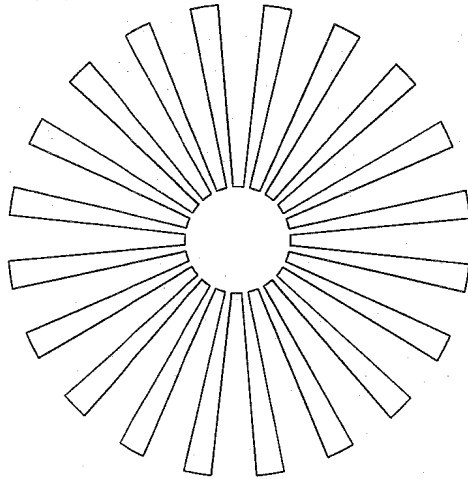
도면6



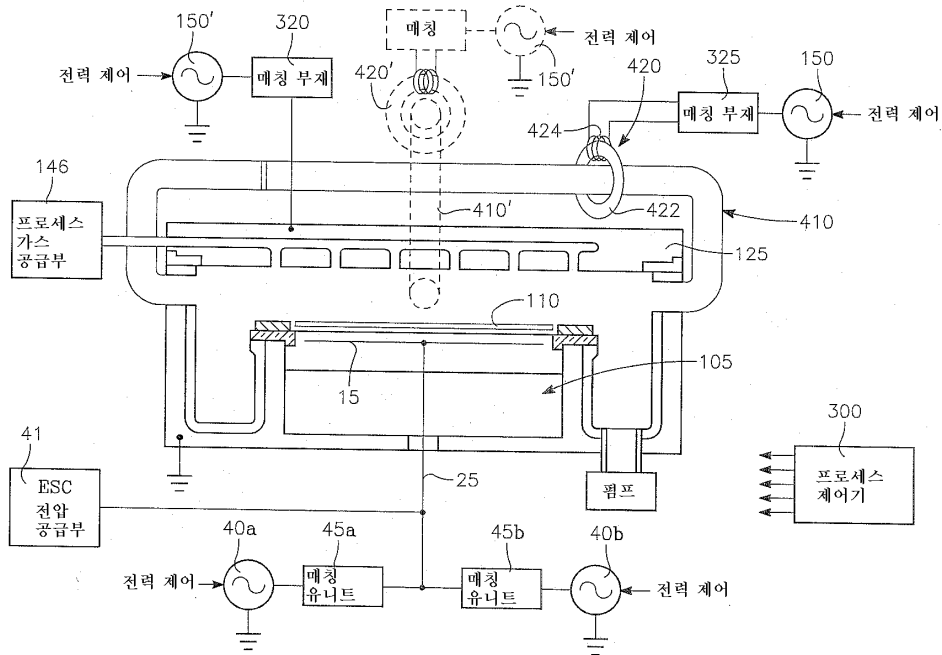
도면7



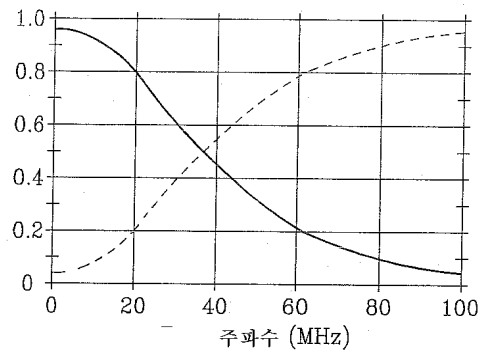
도면8



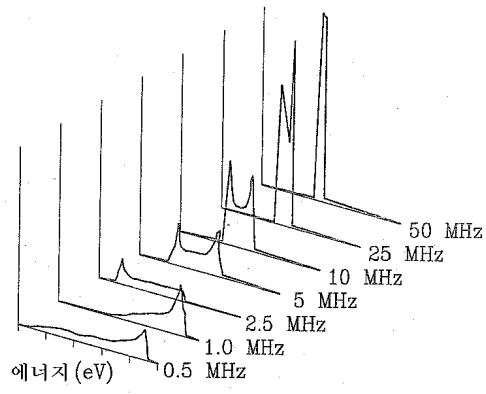
도면9



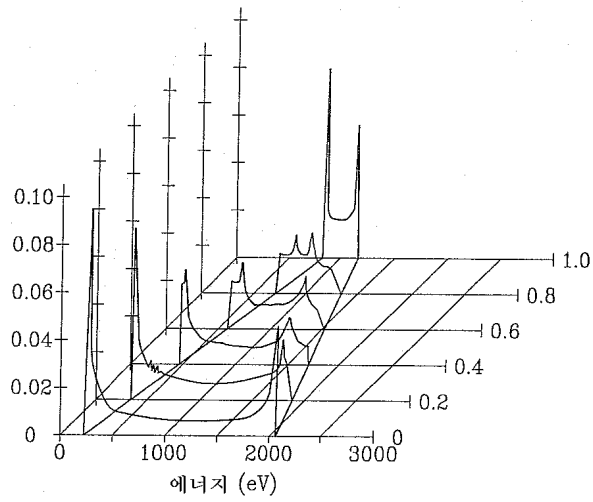
도면10a



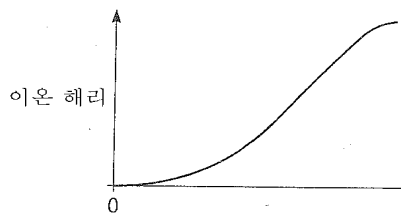
도면10b



도면10c

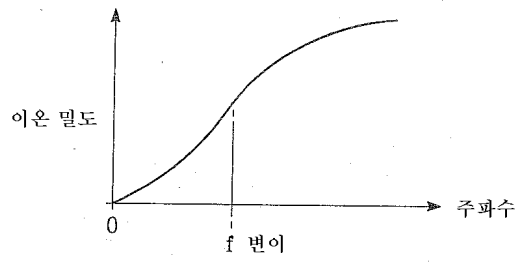


도면11a

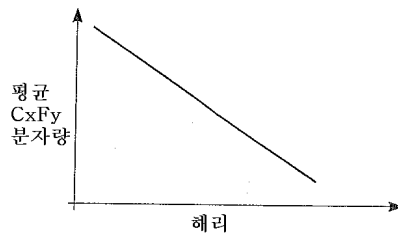




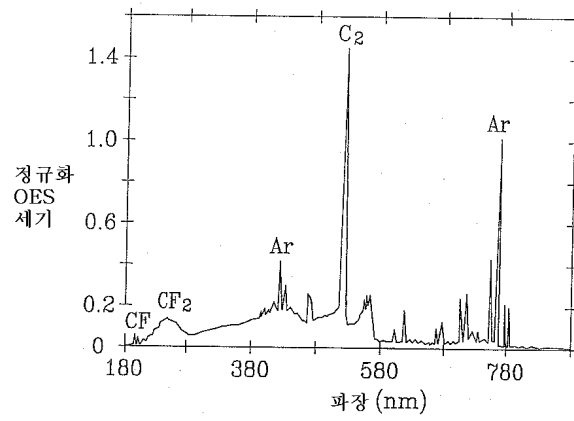
도면11b



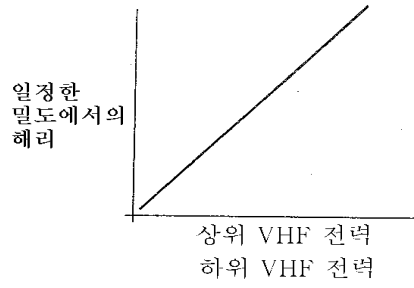
도면12



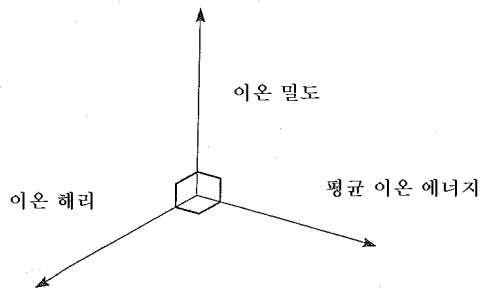
도면13



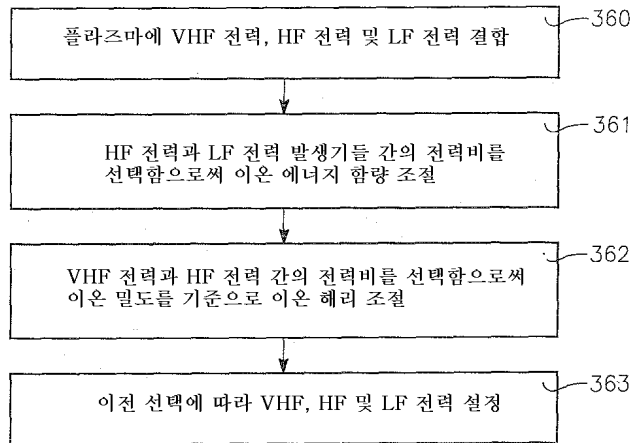
도면14



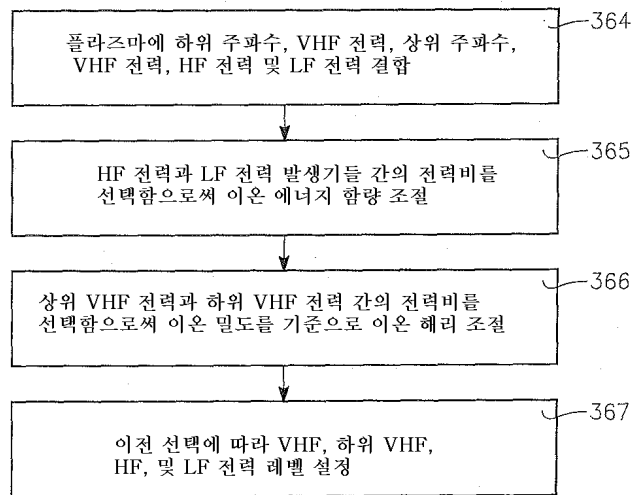
도면15



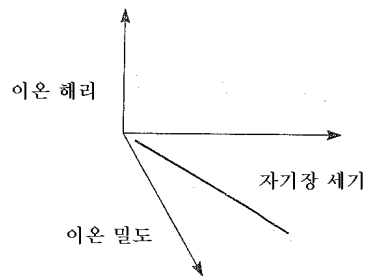
도면16



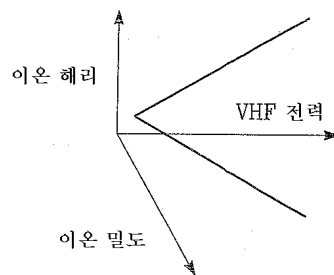
도면17



도면18



도면19



도면20

