



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년01월12일
(11) 등록번호 10-2200662
(24) 등록일자 2021년01월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01J 37/32 (2006.01) H05H 1/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01J 37/32972 (2013.01)
H05H 1/0062 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0132290
(22) 출원일자 2019년10월23일
심사청구일자 2019년10월23일
(56) 선행기술조사문헌
JP2010232110 A*
KR1020170028094 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
충남대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 대학로 99 (궁동, 충남대학교)
(72) 발명자
유신재
대전광역시 유성구 가정로 63 럭키하나아파트
106-1201
이상호
서울특별시 중구 동호로17길 145
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
이은철, 김재문

전체 청구항 수 : 총 5 항

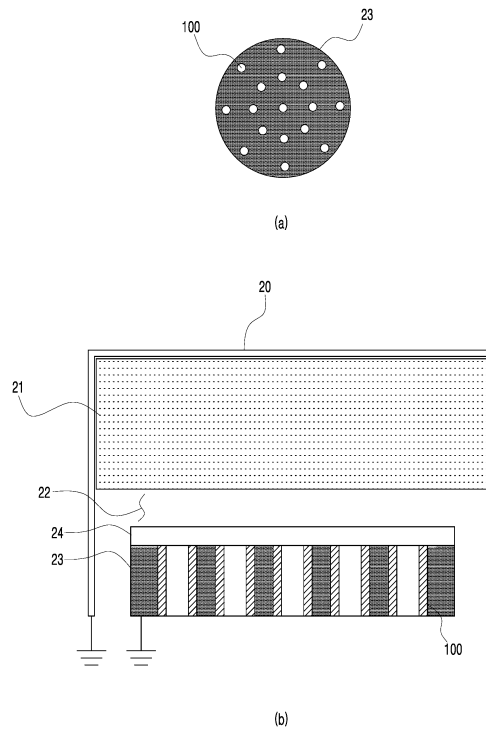
심사관 : 정우열

(54) 발명의 명칭 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치

(57) 요약

본 발명은 표면과 공진 원리를 기반으로 플라즈마-쉬스(Plasma-sheath)에서 발생하는 표면과 공진 주파수를 측정하여 플라즈마 공정을 실시간으로 모니터링할 수 있는 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치에 관한 것이다. 본 발명에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법은 정전척(ESC, Electrostatic Chuck)의 일측 또는 챔(뒷면에 계속)

대표도 - 도12



버의 내벽에 적어도 하나의 프로브를 설치하는 단계(S10), 상기 프로브를 이용하여 플라스마 또는 쉬스에 고주파를 투사하는 단계(S20) 및 상기 프로브가 플라스마 또는 쉬스로부터 반사되는 주파수를 검출하는 단계(S30)를 포함할 수 있다. 또한, 상기 프로브에서 검출된 주파수를 이용하여 주파수에 따른 반사 스펙트럼을 추출하는 단계(S40), 상기 프로브에서 검출된 주파수 또는 반사 스펙트럼을 이용하여 플라스마-쉬스의 표면과 공진 주파수를 추출하는 단계(S50) 및 상기 표면과 공진 주파수를 토대로 플라스마의 전자밀도 또는 균일도(uniformity)를 추출하는 단계(S60)를 포함할 수 있다.

(72) 발명자

김시준

대전광역시 동구 산서로 1633-16

이장재

대전광역시 유성구 계룡로105번길 20 케이타운 434호

이영석

제주특별자치도 제주시 신성로4길 21 도남리치빌아파트 604호

김정형

대전광역시 유성구 지족로 362 반석마을아파트3단지 309동 802호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415163518
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술평가관리원
연구사업명	에너지수요관리핵심기술개발(에특)(R&D)
연구과제명	PFC 가스 대체용 Fluorocarbon 계열 Precursor를 이용한 식각 공정 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	성균관대학교산학협력단
연구기간	2019.05.01 ~ 2020.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

챔버 내에 생성 또는 유입되는 플라즈마를 진단하는 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법에 있어서,
 정전척(ESC, Electrostatic Chuck)의 일측에 적어도 하나의 프로브를 설치하는 단계(S10);
 상기 프로브를 이용하여 플라즈마 또는 쉬스에 고주파를 투사하는 단계(S20);
 상기 프로브가 플라즈마 또는 쉬스로부터 반사되는 주파수를 검출하는 단계(S30);
 상기 프로브에서 검출된 주파수를 이용하여 주파수에 따른 반사 스펙트럼을 추출하는 단계(S40);
 상기 프로브에서 추출된 주파수 또는 상기 반사 스펙트럼을 이용하여 플라즈마-쉬스의 표면과 공진 주파수를 추출하는 단계(S50); 및
 상기 표면과 공진 주파수를 토대로 플라즈마의 전자밀도 또는 균일도(uniformity)를 추출하는 단계(S60)를 포함
 하며,
 상기 프로브는 동축 케이블(Coaxial cable) 형상의 송수신 안테나로 구성되고, 상기 송수신 안테나의 크기는 동
 축 코어(Coaxial core)의 지름과 동축 페리페럴의 유전체 두께에 따라 결정되며, 상기 송수신 안테나의 크기가
 작을수록 이상적인 표면과 공진 주파수와 측정되는 표면과 공진 주파수 간의 측정 오차(discrepancy)가 감소하
 는 것을 특징으로 하는 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
 상기 주파수에 따른 반사 스펙트럼을 추출하는 단계(S40)는 초고주파 방사/계측 시스템 또는 펄스파-오실로스코
 프 계측 시스템을 이용하여 상기 반사 스펙트럼을 추출하는 것을 특징으로 하는 비침습형 플라즈마 공정 진단
 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,
 상기 표면과 공진 주파수를 추출하는 단계(S50)는 상기 반사 스펙트럼에서 최소값을 갖는 주파수를 추출하여 표
 면과 공진 주파수로 설정하는 것을 특징으로 하는 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,
 상기 플라즈마의 전자밀도는 아래의 [수학식 1]을 이용하여 산출되는 것을 특징으로 하는 비침습형 플라즈마 공
 정 진단 방법.

[수학식 1]

$$n_e = (f_{SWR}/6350)^{1/2}$$

여기에서, n_e 는 플라즈마의 전자밀도이고, f_{SWR} 는 표면파 공진 주파수이다.

청구항 5

챔버 내에 생성 또는 유입되는 플라즈마를 진단하는 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치에 있어서,

제어부의 제어에 따라 고주파를 생성하여 프로브에 전송하는 고주파 발생부;

정전척(ESC, Electrostatic Chuck)의 일측에 설치되며, 내측 동축 코어(Coaxial core)는 금속 재질로 이루어지고, 외측의 동축 페리페럴(Coaxial peripheral)은 유전체로 이루어지는 동축 케이블(Coaxial cable) 형상의 송수신 안테나로 구성되며, 플라즈마(Plasma) 또는 쉬스(sheath)에 고주파를 투사하고, 상기 플라즈마(Plasma) 또는 쉬스(sheath)로부터 반사되는 주파수를 검출하는 적어도 하나의 프로브;

상기 적어도 하나의 프로브에서 검출된 주파수를 측정하는 측정부; 및

상기 적어도 하나의 프로브에서 검출된 주파수 또는 측정부에서 측정된 데이터를 이용하여 상기 플라즈마 또는 쉬스의 표면파 공진 주파수를 산출하고, 산출된 표면파 공진 주파수를 이용하여 플라즈마의 전자밀도 또는 균일도를 추출하는 연산부를 포함하고,

상기 송수신 안테나의 크기는 동축 코어(Coaxial core)의 지름과 동축 페리페럴의 유전체 두께에 따라 결정되며, 상기 송수신 안테나의 크기가 작을수록 이상적인 표면파 공진 주파수와 측정되는 표면파 공진 주파수 간의 측정 오차(discrepancy)가 감소하는 것을 특징으로 하는 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치.

청구항 6

삭제

청구항 7

삭제

청구항 8

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치에 관한 것으로서, 표면파 공진 원리를 기반으로 플라즈마-쉬스(Plasma-sheath)에서 발생하는 표면파 공진 주파수를 측정하여 플라즈마 공정을 실시간으로 모니터링할 수 있는 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 일반적으로 반도체, 태양전지, 평면디스플레이 등의 제조 산업에 있어 플라즈마(Plasma) 공정(플라즈마 식각, 증착, 세정 등)은 전체 공정의 30% 정도 비율을 차지하고 있으며, 현재 그 중요성이 더욱 대두되고 있는 상황이다. 특히, 최근 산업계에선 지구온난화지수(Global warming potential)가 낮은 L-PFC(Liquid-perfluorocarbon) 전구체(Precursor)를 이용한 플라즈마 공정이 대두되고 있는 상황이다.

[0004] 이러한 플라즈마 공정의 효율 및 생산성은 플라즈마 변수와 밀접한 관련이 있으며, 이 중 전자 밀도는 중요한 플라즈마의 실시간 공정 모니터링 변수 중 하나로 알려져있다.

[0005] 이로 인해 과거부터 플라즈마의 밀도 진단을 위한 마이크로파 플라즈마 진단 방법들이 많이 개발 되어져 왔다. 또한, 종래의 마이크로파를 이용한 반사파 플라즈마 진단 방법은 높은 측정 정확도를 확보하고 있다.

[0006] 하지만, 이러한 종래의 진단 방법은 실시간 플라즈마 공정 모니터링의 적용에 있어 다음과 같은 문제점이 있다.

첫째, 대부분의 마이크로파를 이용한 플라즈마 진단 방법은 침습 형태의 안테나 구조로써 이는 플라즈마 공정에 있어 안테나의 모양이 웨이퍼에 전사되는 등의 문제를 야기한다.

- [0007] 둘째, 대부분의 마이크로파 반사파를 측정하는 진단 방법은 구조체 공진 현상을 이용하기 때문에 안테나가 커야만 하므로 챔버 내부에 장착하기가 어려운 문제가 있다. 셋째, 구조체 공진 현상을 이용하기 위해서는 반드시 플라즈마 방전 전 기준 스펙트럼이 필요한 문제가 있다. 이는 공정 중 챔버 내벽의 증착물 등에 의해 기준 스펙트럼의 변화가 생겼을 경우 아주 큰 오차로 작용할 수 있는 문제가 있다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0009] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-0476460호(2005년 03월 17일 공고)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 따라서, 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 종래의 단점을 해결한 것으로서, 플라즈마 공정 진단을 위한 비침습형의 안테나 구조를 제공하고자 하는데 그 목적이 있다. 또한, RF 노이즈에 민감하지 않고, 플라즈마 발생 챔버의 내부에 장착할 수 있도록 소형화가 가능한 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치를 제공하고자 하는데 그 목적이 있다.
- [0011] 또한, 플라즈마 공정 진단을 위해 측정되는 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)를 줄여 플라즈마 공정을 정확하게 모니터링하고자 하는데 그 목적이 있다. 또한, 플라즈마 공정에서 중요한 웨이퍼 바로 위의 플라즈마 밀도 및 균일도를 실시간으로 측정하고자 하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0013] 이러한 기술적 과제를 이루기 위한 본 발명의 일 측면에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법은 정전척(ESC, Electrostatic Chuck)의 일측 또는 챔버의 내벽에 적어도 하나의 프로브를 설치하는 단계(S10), 상기 프로브를 이용하여 플라즈마 또는 쉬스에 고주파를 투사하는 단계(S20) 및 상기 프로브가 플라즈마 또는 쉬스로부터 반사되는 주파수를 검출하는 단계(S30)를 포함할 수 있다.
- [0014] 또한, 상기 프로브에서 검출된 주파수를 이용하여 주파수에 따른 반사 스펙트럼을 추출하는 단계(S40), 상기 프로브에서 검출된 주파수 또는 반사 스펙트럼을 이용하여 플라즈마-쉬스의 표면과 공진 주파수를 추출하는 단계(S50) 및 상기 표면과 공진 주파수를 토대로 플라즈마의 전자밀도 또는 균일도(uniformity)를 추출하는 단계(S60)를 포함할 수 있다.
- [0015] 또한, 본 발명의 다른 측면에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치는 프로브, 고주파 발생부, 제어부, 측정부, 연산부, 저장부 및 디스플레이부를 포함한다. 상기 고주파 발생부는 제어부의 제어에 따라 고주파를 생성하여 프로브에 전송한다.
- [0016] 또한, 상기 프로브는 플라즈마(Plasma) 또는 쉬스(sheath)에 고주파를 투사하고, 상기 플라즈마(Plasma) 또는 쉬스(sheath)로부터 반사되는 주파수를 검출한다. 이때, 상기 프로브는 동축 케이블(Coaxial cable) 형상으로 구성되며, 상기 프로브의 내측 동축 코어(Coaxial core)는 금속 재질로 이루어지고, 외측의 동축 페리페럴(Coaxial peripheral)은 유전체로 이루어진다.
- [0017] 상기 측정부는 프로브에서 검출된 주파수를 측정한다. 또한, 상기 연산부는 프로브에서 검출된 주파수 또는 측정부에서 측정된 데이터를 이용하여 상기 플라즈마 또는 쉬스의 표면과 공진 주파수를 산출하고, 산출된 표면과 공진 주파수를 이용하여 플라즈마의 전자밀도 또는 균일도를 추출한다.
- [0018] 상기 제어부는 프로브, 고주파 발생부, 측정부, 연산부 및 디스플레이부를 제어하고, 연산부의 추출 결과를 토대로 플라즈마 공정을 모니터링할 수 있다.

발명의 효과

[0021] 이상에서 설명한 바와 같이, 본 발명에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치는 표면과 공진 원리를 기반으로 플라즈마-쉬스(Plasma-sheath)에서 발생하는 공진 주파수를 측정함으로써 플라즈마 공정에서 중요한 웨이퍼 바로 위의 플라즈마 밀도 및 균일도를 실시간으로 측정할 수 있다. 또한, 플라즈마 공정 진단을 위해 측정되는 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)를 줄여 플라즈마 공정을 정확하게 모니터링함으로써 공정의 안정화 및 수율을 향상할 수 있는 효과가 있다.

[0022] 또한, 비침습형의 안테나 구조를 이용함으로써 안테나의 모양이 웨이퍼에 전사되지 않고 플라즈마 공정을 진단할 수 있는 효과가 있다. 또한, RF 노이즈에 민감하지 않고, 안테나의 소형화가 가능하여 안테나를 플라즈마 발생 챔버의 내부에 장착할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0024] 도 1 및 도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치를 개략적으로 나타내는 구성도이다.

도 3은 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치를 나타내는 블록도이다.

도 4는 본 발명의 실시 예에 따른 프로브를 나타내는 사시도이다.

도 5는 본 발명의 실시 예에 따른 반사 스펙트럼을 나타내는 도면이다.

도 6은 본 발명의 실시 예에 따른 전기장 분포를 나타내는 도면이다.

도 7, 도 8a, 도 8b 및 도 9는 본 발명의 실시 예에 따른 표면과 공진 주파수의 측정 오차를 나타내는 도면이다.

도 10a, 도 10b, 도 10c 및 도 10d는 본 발명의 실시 예에 따른 프로브의 설치 위치를 나타내는 도면이다.

도 11a 및 도 11b는 본 발명의 프로브 설치 위치 변화에 따른 반사 스펙트럼을 나타내는 도면이다.

도 12는 본 발명의 다른 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치를 개략적으로 나타내는 도면이다.

도 13은 도 12의 프로브에서 측정된 반사 스펙트럼을 나타내는 도면이다.

도 14는 본 발명의 일 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법을 나타내는 순서도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025] 아래에서는 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시 예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시 예에 한정되지 않는다. 그리고 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면부호를 붙였다.

[0026] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다. 또한, 명세서에 기재된 "...부", "...기", "...모듈" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어나 또는 소프트웨어 또는 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.

[0027] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 설명함으로써, 본 발명을 상세히 설명한다.

[0028] 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0029] 도 1 및 도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치(10)를 개략적으로 나타내는 구성도이다. 또한, 도 3은 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치(10)를 나타내는 블록도이고, 도 4는 본 발명의 실시 예에 따른 프로브(100)를 나타내는 사시도이다.

[0030] 즉, 도 1은 플라즈마(21)와, 정전척(ESC)(23)의 일측에 배치되는 프로브(100)의 형상을 나타내는 도면이고, 도 2는 정전척(ESC)(23) 상에 웨이퍼(Wafer)(24)가 구비되는 경우에 정전척(ESC)(23)의 일측에 배치되는 프로브(100)를 나타내는 도면이다.

[0031] 또한, 도 4는 도 1 및 도 2의 프로브(100)를 입체적으로 나타내는 도면이다. 예를 들어, 도 4에서 프로브(100)

의 동축 코어(Coaxial core)(110) 지름(d)은 2mm이고, 동축 페리페럴(Coaxial peripheral)(120)의 유전체 두께(t)는 1.0mm로 설정될 수 있다.

- [0032] 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치(10)는 종래의 반사파 플라즈마 진단 방법에서 사용하는 구조체 공진 원리를 기반으로 하지 않고, 플라즈마(21)-쉬스(22)에서 발생하는 표면파 공진 원리를 기반으로 하여 실시간으로 플라즈마(21)의 밀도 및 균일도를 모니터링하는 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치(10)에 관한 것이다.
- [0033] 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치(10)는 전자기 시뮬레이션을 이용하여 검증될 수 있다. 이때, 상기 전자기 시뮬레이션은 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 방법을 기반으로 하는 맥스웰 방정식을 연산하여 추출할 수 있다.
- [0034] FDTD 방법은 전자기장 수치해석 기법 중의 하나로 초기 경계치 문제에 대한 해석을 맥스웰(Maxwell) 방정식의 미분형으로부터 구해진 차분방정식을 이용하여 비교적 쉽게 해석할 수 있다.
- [0035] 즉, FDTD 방법은 전기 역학을 모델링하는데 사용하는 수치 분석 기술이다. 또한, FDTD 솔루션은 단일 시뮬레이션 실행으로 넓은 주파수 범위를 처리하고 비선형 재료 특성을 자연스럽게 처리할 수 있는 시간 영역 방식이다.
- [0036] FDTD 방법은 현재 광범위한 분야에서 적용되고 있으며 그 응용분야는 크게 5가지로 구분할 수 있다. 첫째로 차폐(shielding), 전자기 결합(coupling), 낙뢰(lightning), EMP(electromagnetic pulse) 현상, 패키징(packaging) 등의 EMI/EMC 문제를 해석할 수 있다.
- [0037] 둘째로 산란(scattering), RCS(radar cross section) 관련 문제를 해석할 수 있으며, 셋째로 전자파가 인체에 미치는 영향(biological hazards)을 해석할 수 있다. 넷째로 안테나 문제에서 복사패턴(radiation pattern), 입력 임피던스(input impedance) 등을 계산할 수 있으며, 마지막으로 초고주파 능동 및 수동 소자 회로와 도파관 등을 해석할 수 있다. 이와 같이 FDTD 방법은 적용되지 않는 분야가 없을 정도로 거의 모든 전자장 분야에서 폭넓게 사용되고 있다.
- [0038] 도 3에서 도시된 바와 같이 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치(10)는 프로브(100), 고주파 발생부(200), 제어부(300), 측정부(400), 연산부(500), 저장부(600) 및 디스플레이부(700)를 포함할 수 있다.
- [0039] 고주파 발생부(200)는 제어부(300)의 제어에 따라 고주파를 생성하여 프로브(100)에 전송한다. 프로브(100)는 플라즈마(Plasma)(21) 또는 쉬스(sheath)(22)에 고주파를 투사하고, 플라즈마(Plasma)(21) 또는 쉬스(sheath)(22)로부터 반사되는 신호를 검출한다.
- [0040] 즉, 프로브(100)는 도 4에서 도시된 바와 같이 고주파를 송신하고, 반사되는 주파수를 수신하는 송수신 안테나일 수 있다.
- [0041] 측정부(400)는 프로브(100)에서 검출된 신호를 측정한다. 이때, 측정부(400)는 회로망 분석기(Network Analyzer)와 같은 초고주파 방사/계측 시스템(410) 또는 펄스파-오실로스코프 계측 시스템(420)을 포함할 수 있다.
- [0042] 연산부(500)는 측정부(400)에서 측정된 데이터를 이용하여 플라즈마(21)의 밀도 및 균일도를 산출한다. 즉, 연산부(500)는 프로브(100)에서 검출된 신호 또는 측정부(400)에서 측정된 데이터를 이용하여 플라즈마(21)의 표면파 공진 주파수(f_{SWR})를 산출하고, 산출된 표면파 공진 주파수(f_{SWR})를 이용하여 플라즈마(21)의 전자밀도 및 균일도를 추출할 수 있다.
- [0043] 제어부(300)는 프로브(100), 고주파 발생부(200), 측정부(400), 연산부(500) 및 디스플레이부(700)를 제어하고, 연산부(500)의 추출 결과를 토대로 플라즈마(21) 공정을 모니터링할 수 있다.
- [0044] 또한, 저장부(600)는 측정부(400)에서 측정된 데이터와 연산부(500)에서 산출된 결과를 저장한다. 또한, 디스플레이부(700)는 프로브(100) 또는 측정부(400)의 데이터를 디스플레이할 수 있다.
- [0045] 즉, 디스플레이부(700)는 프로브(100) 또는 측정부(400)에서 검출된 데이터를 토대로 주파수에 따른 반사 스펙트럼을 이용하여 추출된 공진 주파수를 나타낼 수 있다. 또한, 디스플레이부(700)는 주파수별 또는 전계 강도별 전기장 분포 이미지를 나타낼 수도 있다.
- [0046] 또한, 도 1 및 도 2는 상기 전자기 시뮬레이션에서 사용된 경계조건을 포함하는 도메인과, 방사 및 송신 안테나

의 기능을 하는 프로브(100)를 나타낸다. 이때, 플라즈마(21)는 드루드 모형(Drude model)을 이용하여 유전율이 아래의 [수학식 1]과 같이 나타내는 유전체로 근사할 수 있다.

[수학식 1]

$$\epsilon_p(\omega) = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_{pe}}{\omega(\omega - j\nu_m)}\right)$$

여기에서, $\epsilon_p(\omega)$ 는 플라즈마(21)의 유전율이고, ϵ_0 는 진공에서의 유전율이며, ω_{pe} 는 플라즈마(21)의 각진동수이다. 또한, ω 는 인가되는 전자기파의 각진동수이고, 허수항인 ν_m 은 전자-중성종 충돌 주파수를 나타낸다.

또한, 본 발명의 실시 예에 따라 플라즈마(21)는 원통형 챔버(20)를 기반으로 지름의 길이가 330mm, 높이가 40mm인 원통형 형태를 사용할 수 있다.

또한, 플라즈마(21)의 각진동수는 아래의 [수학식 2]를 이용하여 추출할 수 있다.

[수학식 2]

$$\omega_{pe} = \left(\frac{e^2 n_e^{input}}{\epsilon_0 m_e}\right)^{1/2}$$

여기에서, n_e^{input} 는 입력 전자밀도이고, e 는 전자의 전하량이며, m_e 는 전자의 질량이다. 또한, 본 발명의 실시 예에 따라 상기 전자기 시뮬레이션에서 전자-중성종 충돌 주파수는 아르곤 가스를 기준으로 운동량 전달(momentum transfer) 충돌 반응만을 고려하고, 전자 온도는 1.0eV로 가정한다.

또한, 쉬스(sheath)(22)는 비유전율이 1.0인 유전체로 근사하고, 쉬스(sheath)(22) 두께는 시뮬레이션 변수로 정의할 수 있다. 또한, 정전척(ESC, Electrostatic chuck)(23)은 시뮬레이션을 위해 지름이 70mm이고 높이가 20mm인 원통형을 가정한다.

프로브(100)는 도 4에 도시된 바와 같이 내측의 동축 코어(Coaxial core)(110)와 외측의 동축 페리페럴(Coaxial peripheral)(120)로 이루어지는 동축관 또는 동축 케이블(Coaxial cable) 구조의 안테나일 수 있다. 여기에서, 동축 코어(110)는 금속 재질로 이루어지고, 동축 페리페럴(120)은 유전체로 이루어질 수 있다. 예를 들어, 동축 페리페럴(120)은 유전율(ϵ_r)이 2.1인 테프론(Teflon)으로 구성될 수 있다.

또한, 프로브(100)는 동축 코어(110)의 지름을 변수 "a"로, 동축 페리페럴(120)에 사용되는 유전체의 두께는 변수 "c"로 정의하고, 정전척(ESC, Electrostatic chuck)(23)의 일측에 배치된다.

시뮬레이션을 위한 경계조건은 z축 값이 0인 경계면에서 접지 경계조건을 사용($\vec{E}_t = 0$)하고, 이외의 경계면에 대해서는 열린 경계조건(open boundary)을 사용한다.

도 5는 본 발명의 실시 예에 따른 반사 스펙트럼을 나타내는 도면이다. 즉, 도 5는 쉬스(sheath)(22) 두께가 1.0mm이고, 입력 전자밀도가 $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 이며, 압력이 1.0 토르(Torr)인 경우의 주파수에 따른 반사 스펙트럼과, 이상적인 표면과 공진 주파수(f_{ideal}^{SWR}) 및 스펙트럼 상의 표면과 공진 주파수(f_{SWR})를 나타내는 그래프이다.

또한, 도 5는 프로브(100)가 동축 코어(110)의 지름(d)은 2mm이고, 동축 페리페럴(120)의 두께(t)는 1.0mm인 경우에 대해 전자기 시뮬레이션을 수행하여 추출한 반사 스펙트럼 그래프이다. 여기에서, 그래프 내부의 이상적인 표면과 공진 주파수(f_{ideal}^{SWR})인 1.41GHz와 플라즈마(21) 진동 주파수(f_{pe})인 2.01GHz는 각각 점선으로 나타낸다.

도 6은 본 발명의 실시 예에 따른 전기장 분포를 나타내는 도면이다. 즉, 도 6은 도 5의 반사 스펙트럼에서 최

소값을 갖는 주파수인 1.31GHz와, 주파수(f)가 각각 2.00GHz 및 3.00GHz에서 z-축 방향의 위상 변화에 따른 전기장 분포 이미지를 나타내는 도면이다. 여기에서, 검정색 화살표는 표면파의 위치 중 어느 한 위치의 위상 변화에 따른 위치 변화를 나타내기 위한 것이다.

[0062] 또한, 각 그래프에서 색상은 전계 강도를 나타낸다. 즉, 전계 강도가 강할수록 전기장 분포가 적색에 근접하고, 전계 강도가 약할수록 전기장 분포는 청색에 가까워진다.

[0063] 도 6에서 보는 바와 같이 반사 스펙트럼에서 최소값을 갖는 주파수 1.31GHz에서 표면파가 발진되고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 주파수 2.00GHz 및 3.00GHz에서는 전기장이 방사 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

[0064] 따라서, 이를 통해 반사 스펙트럼에서 최소값을 갖는 주파수를 표면파 공진 주파수(f_{SWR})로 정의할 수 있다.

[0065] 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치(10)는 플라즈마(21)-쉬스(22) 경계면에서 발생되는 표면파 공진 주파수의 원리를 기반으로 하기 때문에 공정에서 가장 중요한 웨이퍼(Wafer)(24) 상단의 플라즈마(21)를 측정할 수 있는 효과가 있다.

[0066] 플라즈마(21)-쉬스(22) 경계면에서 표면파가 발진할 수 있는 공명 주파수(f_{SWR}^{ideal})는 아래의 [수학식 3]과 같이 나타낼 수 있다.

[0067] [수학식 3]

$$f_{SWR}^{ideal} = f_{pe} / \sqrt{2}$$

[0069] 여기에서, f_{pe} 는 플라즈마(21) 진동 주파수이다. 따라서, 웨이퍼(Wafer)(24) 상단 플라즈마(21)의 밀도(n_e)는 아래의 [수학식 4]를 이용하여 추출할 수 있다.

[0070] [수학식 4]

$$n_e = (f_{SWR}^{ideal} / 6350)^{1/2}$$

[0072] 여기에서, n_e 는 웨이퍼(Wafer)(24) 상단 플라즈마(21)의 밀도이다.

[0073] 도 5에서 도시된 바와 같이 이상적인 표면파 공진 주파수(f_{SWR}^{ideal})와 측정되는 표면파 공진 주파수(f_{SWR}) 간에는 차이가 있음을 알 수 있다. 본 발명의 실시 예에 따라 이러한 공진 주파수 간의 차이를 측정 오차(discrepancy)로 정의하고, 아래의 [수학식 5]를 이용하여 추출할 수 있다.

[0074] [수학식 5]

$$|discrepancy| = (f_{SWR} - f_{SWR}^{ideal}) / f_{SWR}^{ideal} \times 100 \text{ (\%)}$$

[0076] 여기에서, $|discrepancy|$ 는 표면파 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)이고, f_{SWR} 는 측정되는 표면파 공진 주파수이며, f_{SWR}^{ideal} 는 이상적인 표면파 공진 주파수를 나타낸다.

[0077] 도 7, 도 8a, 도 8b 및 도 9는 본 발명의 실시 예에 따른 표면파 공진 주파수의 측정 오차를 나타내는 도면이다. 즉, 도 7은 쉬스(sheath)(22) 두께와 프로브(100)의 동축 코어(110) 지름(d) 및 동축 페리페럴(120)의 유전체 두께(t)에 따른 표면파 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)를 나타내는 그래프이다.

[0078] 도 7과 같이 쉬스(sheath)(22)의 두께가 두꺼울수록 표면파 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)는 감소한다. 또한, 프로브(100)의 안테나 크기(동축 코어(110) 지름(d) 및 동축 페리페럴(120)의 유전체 두께(t))가 작을수록 표면파 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)는 감소한다.

[0079] 즉, 프로브(100)의 동축 코어(110) 지름(d)과 동축 페리페럴(120)의 유전체 두께(t)를 합산한 안테나의 크기가 작을수록 표면파 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)는 감소한다. 도 7에서 "a"는 동축 코어(110) 지름(d)이

고, "c"는 동축 페리페럴(120)의 유전체 두께(t)를 나타낸다.

- [0080] 또한, 도 7에서는 동축 코어(110) 지름(d)이 2.0mm이고, 동축 페리페럴(120)의 유전체 두께(t)가 1.0mm인 프로브(100)가 최적화된 가장 작은 측정 오차(discrepancy)를 나타낸다.
- [0081] 따라서, 프로브(100)를 이용하여 검출한 표면과 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)를 줄이기 위해서는 프로브(100)의 안테나 크기(동축 코어(110) 지름(d) 및 동축 페리페럴(120)의 유전체 두께(t))를 상대적으로 작게 형성하는 것이 바람직하다. 또한, 작은 크기로 형성되는 다수의 프로브(100)들을 플라즈마(21)의 측정 위치에 대응되도록 정전척(ESC)(23) 내에 배치하는 것이 바람직하다.
- [0082] 또한, 도 8a는 압력이 1.0 토르(Torr)이고, 쉬스(sheath)(22) 두께가 5.0mm인 경우에 압력 및 입력 전자밀도에 따른 표면과 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)를 나타내는 그래프이고, 도 8b는 압력이 1.0 토르(Torr)이고, 쉬스(sheath)(22) 두께가 0.5mm인 경우에 압력 및 입력 전자밀도에 따른 표면과 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)를 나타내는 그래프이다.
- [0083] 즉, 도 8a 및 도 8b는 입력 전자밀도가 각각 $5 \times 10^{09} \text{cm}^{-3}$, $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 및 $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 인 경우의 표면과 공진 주파수 측정 오차(discrepancy)를 나타낸다. 또한, 도 8a 및 도 8b는 압력이 10mTorr에서 10Torr 범위까지의 표면과 공진 주파수 측정 오차(discrepancy)를 나타낸다.
- [0084] 이러한 범위는 일반적인 플라즈마(21) 공정에서 사용되는 플라즈마(21)의 전자밀도 및 압력 조건이다.
- [0085] 따라서, 표면과 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)는 도 8a에서 보는 바와 같이 쉬스(sheath)(22) 두께가 5.0mm인 경우에 10% 내외인 것을 확인할 수 있다. 또한, 도 8b에서 보는 바와 같이 쉬스(sheath)(22) 두께가 0.5mm인 경우에도 표면과 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)는 20% 내외인 것을 확인할 수 있다.
- [0086] 즉, 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치(10)는 일반적인 플라즈마(21) 공정에서 측정 오차가 최대 25% 이하로 전자 밀도를 측정할 수 있다. 특히, 쉬스(sheath)(22) 두께가 5.0mm 이상인 경우에는 최대 15% 이하의 측정 오차를 가지고 전자밀도를 측정할 수 있는 효과가 있다.
- [0087] 한편, 프로브(100)는 도 1 및 도 2에서 도시된 바와 같이 정전척(ESC)(23)의 일측에 장착되어 사용될 수 있고, 플라즈마(21)를 발생하는 챔버(20)의 측벽에 장착되어 플라즈마(21) 가장자리(edge)의 전자밀도를 측정할 수도 있다.
- [0088] 이때, 각 표면과 공진 주파수의 측정 오차(discrepancy)는 상기 [수학식 5]를 이용하여 추출될 수 있다.
- [0089] 또한, 도 9는 입력 전자밀도가 $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 이고, 압력이 1.0 토르(Torr)인 경우의 웨이퍼(Wafer)(24) 두께와 유전율 및 쉬스(sheath)(22) 두께에 따른 표면과 공진 주파수의 측정오차(discrepancy)를 나타내는 그래프이다.
- [0090] 즉, 도 2와 같이 프로브(100) 위에 웨이퍼(Wafer)(24)가 올려져 있는 경우에 웨이퍼(24)의 비유전율과 웨이퍼(24)의 두께 및 쉬스(sheath)(22) 두께의 변화에 따른 표면과 공진 주파수의 측정오차(discrepancy)를 나타내는 그래프이다.
- [0091] 여기에서, 표면과 공진 주파수의 측정오차(discrepancy)는 상기 [수학식 5]를 이용하여 추출될 수 있다.
- [0092] 도 9에서 도시된 바와 같이 표면과 공진 주파수의 측정오차(discrepancy)는 웨이퍼(24)의 두께가 두꺼워질수록 증가한다. 반면에, 웨이퍼(24)의 비유전율 변화에는 표면과 공진 주파수의 측정오차(discrepancy)에 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.
- [0093] 따라서, 프로브(100) 위에 웨이퍼(24)가 올려져 있더라도 1mm 이하인 웨이퍼(24) 두께에 대하여 프로브(100)는 측정오차 10% 이내로 전자밀도를 측정할 수 있다. 일반적으로 반도체 공정에서 사용되는 실리콘 웨이퍼(24)의 두께는 1mm 이하이다.
- [0094] 도 10a, 도 10b, 도 10c 및 도 10d는 본 발명의 실시 예에 따라 플라즈마(21) 발생 챔버(20)가 있는 경우에 정전척(23) 내에서 프로브(100)의 설치 위치를 나타내는 도면이다. 즉, 도 10a는 프로브(100)가 정전척(23) 중앙에 설치되는 경우를 나타내는 도면이고, 도 10b는 프로브(100)가 정전척(23) 중앙으로부터 15mm 이격되어 설치되는 경우를 나타내는 도면이다.

- [0095] 또한, 도 10c는 프로브(100)가 정전척(23) 중앙으로부터 30mm 이격되어 설치되는 경우를 나타내는 도면이고, 도 10d는 정전척(23) 내에 복수의 프로브(101, 102, 103)가 설치되는 경우를 나타내는 도면이다.
- [0096] 도 10d는 본 발명의 실시 예에 따라 3개의 프로브(101, 102, 103)가 하나의 정전척(23) 내에 설치되는 경우에 프로브(101, 102, 103) 간의 상호 간섭 영향을 분석하기 위해 수행하는 시뮬레이션을 위한 구성도이다.
- [0097] 도 11a 및 도 11b는 본 발명의 프로브(100) 설치 위치 변화에 따른 반사 스펙트럼을 나타내는 도면이다. 즉, 도 11a는 도 10a와 같이 정전척(23) 중앙에 설치되는 프로브(100)에서 측정한 반사 스펙트럼(11a1)과, 도 10b와 같이 정전척(23) 중앙으로부터 15mm 이격되어 설치되는 프로브(100)에서 측정한 반사 스펙트럼(11a2)과, 도 10c와 같이 정전척(23) 중앙으로부터 30mm 이격되어 설치되는 프로브(100)에서 측정한 반사 스펙트럼(11a3)을 나타내는 그래프이다.
- [0098] 도 11a에서 나타난 바와 같이 프로브(100)가 플라즈마(21) 발생 챔버(20)의 내부에 있는 경우에도 또는 정전척(23)의 중앙으로부터 벗어나 설치되는 경우에도 표면과 공진 주파수(f_{SWR})가 정확히 측정되며, 측정값이 이상적인 표면과 공진 주파수(f_{ideal}^{SWR}) 값과 일치하는 것을 확인할 수 있다.
- [0099] 또한, 도 11b는 도 10d와 같이 정전척(23) 내에 3개의 프로브(101, 102, 103)가 동시에 설치되는 경우에 각 프로브(101, 102, 103)에서 측정한 반사 스펙트럼을 나타내는 그래프이다.
- [0100] 즉, 도 11b에서 반사 스펙트럼(11b1)은 도 10d의 정전척(23) 중앙에 설치되는 프로브(101)에서 측정한 반사 스펙트럼(11b1)이고, 반사 스펙트럼(11b2)은 도 10d의 정전척(23) 중앙으로부터 15mm 이격되어 설치되는 프로브(102)에서 측정한 반사 스펙트럼(11b2)이며, 반사 스펙트럼(11b3)은 도 10d의 정전척(23) 중앙으로부터 30mm 이격되어 설치되는 프로브(103)에서 측정한 반사 스펙트럼(11b3)을 나타낸다.
- [0101] 도 11b에서 나타난 바와 같이 정전척(23) 내에 복수의 프로브(100)가 설치되는 경우에도 반사 스펙트럼이 크게 변화하지 않고 정확히 측정되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 정전척(23) 내에 복수의 프로브(100)가 설치되는 경우에도 상호간 간섭 효과의 영향이 없는 것을 확인할 수 있다.
- [0102] 도 12는 본 발명의 다른 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치를 개략적으로 나타내는 도면이고, 도 13은 도 12의 프로브(100)를 이용하여 측정된 반사 스펙트럼을 나타내는 도면이다.
- [0103] 즉, 도 12의 상단 도면(a)은 정전척(23) 내에 다수의 프로브(100)들이 배치되는 것을 나타내는 평면도이고, 도 12의 하단 도면(b)은 다수의 프로브(100)들이 배치된 정전척(23)이 챔버(20) 내에 설치되는 것을 나타내는 단면도이다.
- [0104] 도 13은 도 12에서 정전척(23)의 정 중앙에 있는 프로브(100)로부터 측정된 반사 스펙트럼이다. 도 13에서 도시된 바와 같이 정전척(23) 내에 다수의 프로브(100)들이 설치되는 경우에도 표면과 공진 주파수가 정확하게 측정되는 것을 확인할 수 있다.
- [0105] 따라서, 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 장치(10)는 전자기 시뮬레이션을 통하여 측정된 프로브(100)의 반사 스펙트럼으로부터 플라즈마(21)-쉬스(22) 경계면에서 발생하는 표면과 공진 주파수를 측정함으로써 플라즈마(21)의 전자밀도와 균일도(uniformity)를 측정할 수 있다.
- [0106] 도 14는 본 발명의 일 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법을 나타내는 순서도이다. 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법은 정전척(ESC, Electrostatic Chuck)(23)의 일측 또는 챔버(20)의 내벽에 적어도 하나의 프로브(100)를 설치하는 단계(S10), 제어부(300)가 프로브(100)를 이용하여 플라즈마(21) 또는 쉬스(22)에 고주파를 투사하는 단계(S20) 및 프로브(100)가 플라즈마(21) 또는 쉬스(22)로부터 반사되는 주파수를 검출하는 단계(S30)를 포함할 수 있다.
- [0107] 또한, 측정부(400)가 프로브(100)에서 검출된 주파수를 이용하여 주파수에 따른 반사 스펙트럼을 추출하는 단계(S40), 연산부(500)가 프로브(100)에서 검출된 주파수 또는 측정부(400)에서 추출된 반사 스펙트럼을 이용하여 플라즈마(21)-쉬스(22)의 표면과 공진 주파수를 추출하는 단계(S50) 및 연산부(500)가 상기 표면과 공진 주파수를 토대로 플라즈마(21)의 전자밀도 또는 균일도(uniformity)를 추출하는 단계(S60)를 포함할 수 있다.
- [0108] 이와 같이 본 발명의 실시 예에 따른 비침습형 플라즈마 공정 진단 방법 및 장치(10)는 플라즈마(21) 실시간 모니터링 기술을 실공정에 적용하여 공정의 안정화 및 수율의 향상을 이룰 수 있는 효과가 있다.

[0109] 이상으로 본 발명에 관한 바람직한 실시 예를 설명하였으나, 본 발명은 상기 실시 예에 한정되지 아니하며, 본 발명의 실시 예로부터 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의한 용이하게 변경되어 균등하다고 인정되는 범위의 모든 변경을 포함한다.

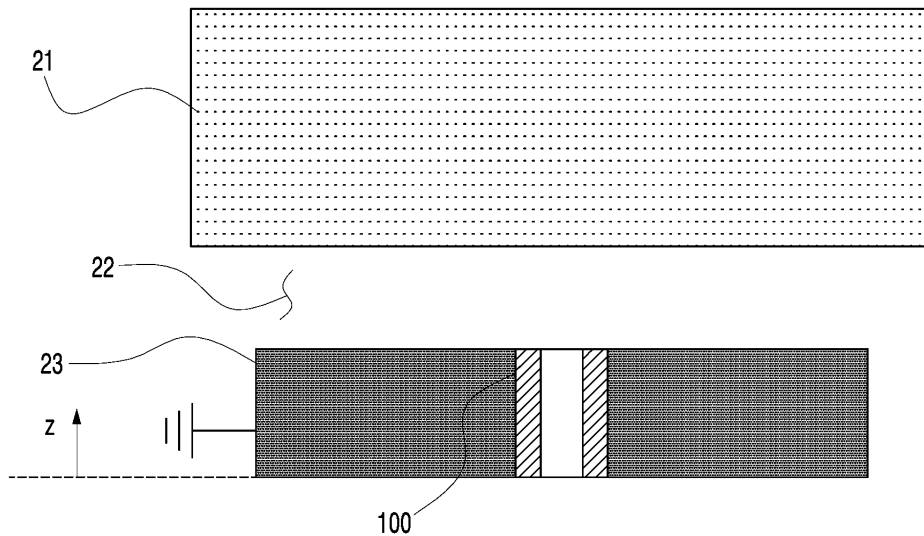
부호의 설명

[0111]

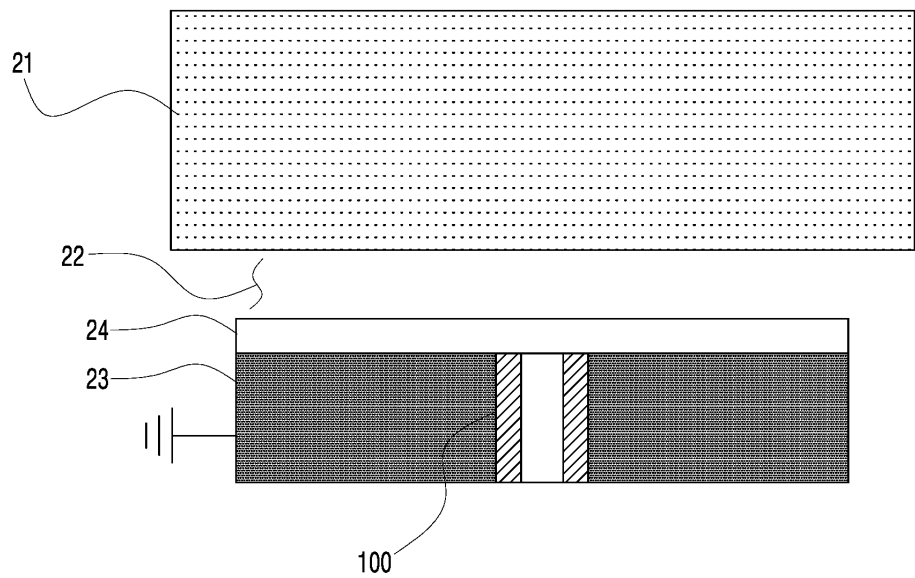
10 : 플라즈마 공정 진단 장치	20 : 챔버
21 : 플라즈마	22 : 쉬스
23 : 정전척	24 : 웨이퍼
100, 101, 102, 103 : 프로브	110 : 동축 코어
120 : 동축 페리페럴	200 : 고주파 발생부
300 : 제어부	400 : 측정부
410 : 초고주파 방사/계측 시스템	
420 : 펄스파-오실로스코프 계측 시스템	
500 : 연산부	600 : 저장부
700 : 디스플레이부	

도면

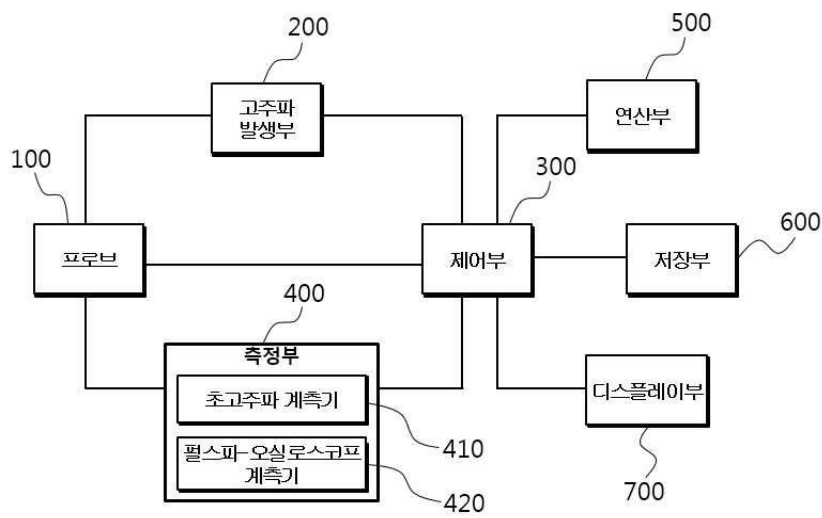
도면1



도면2

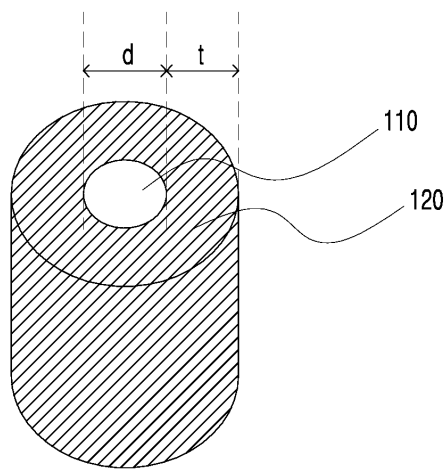


도면3

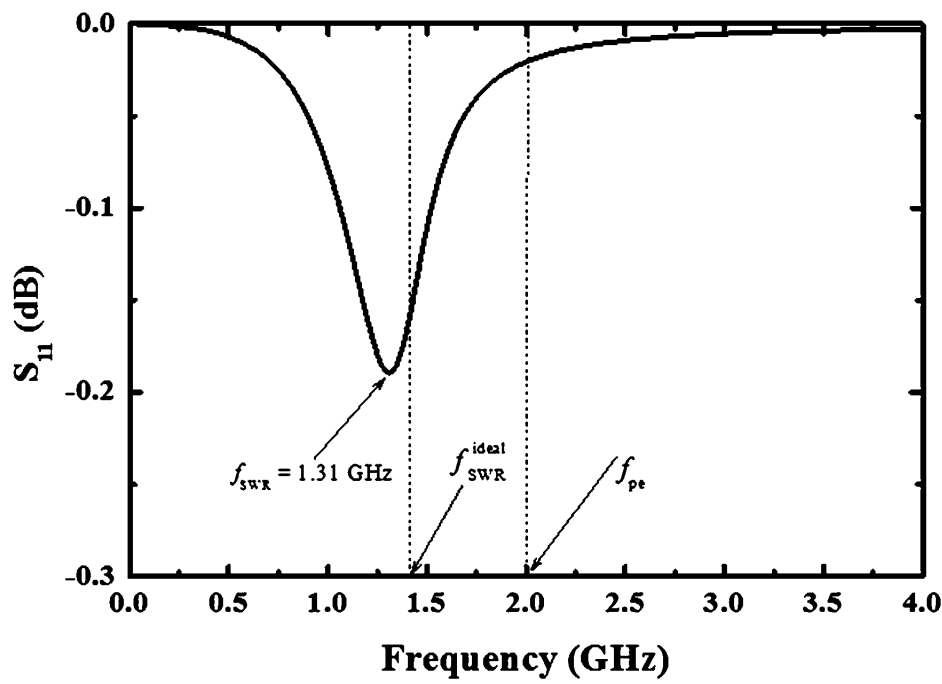


도면4

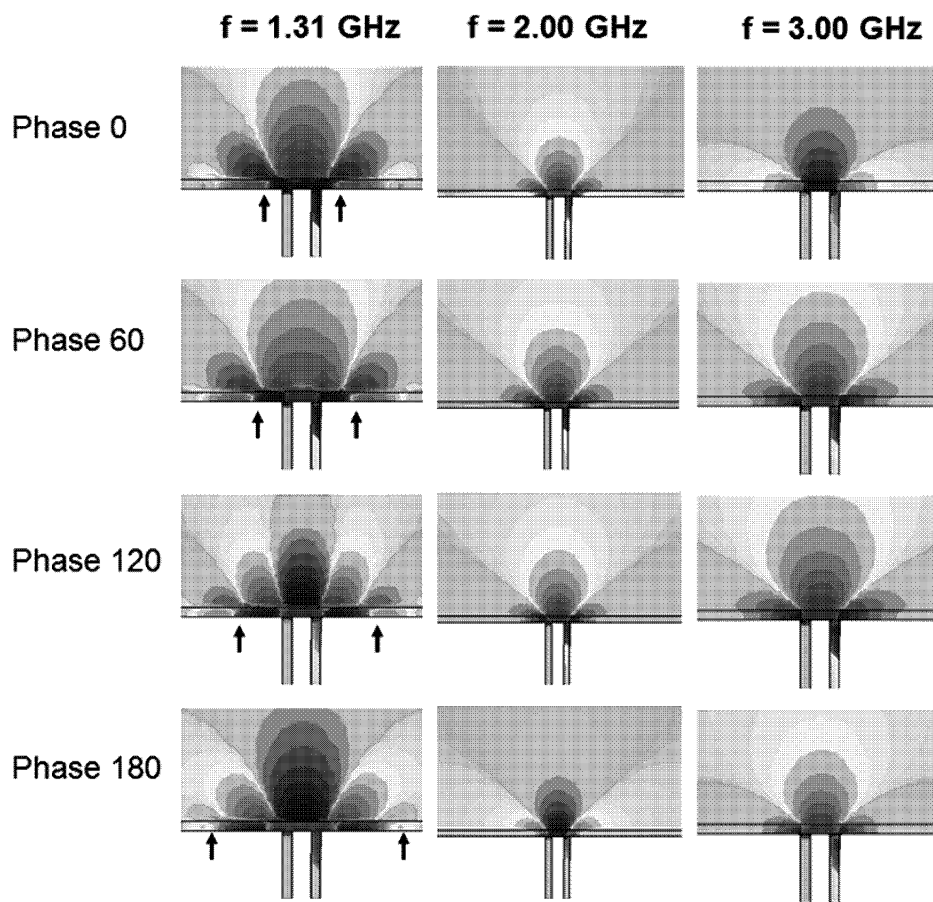
100



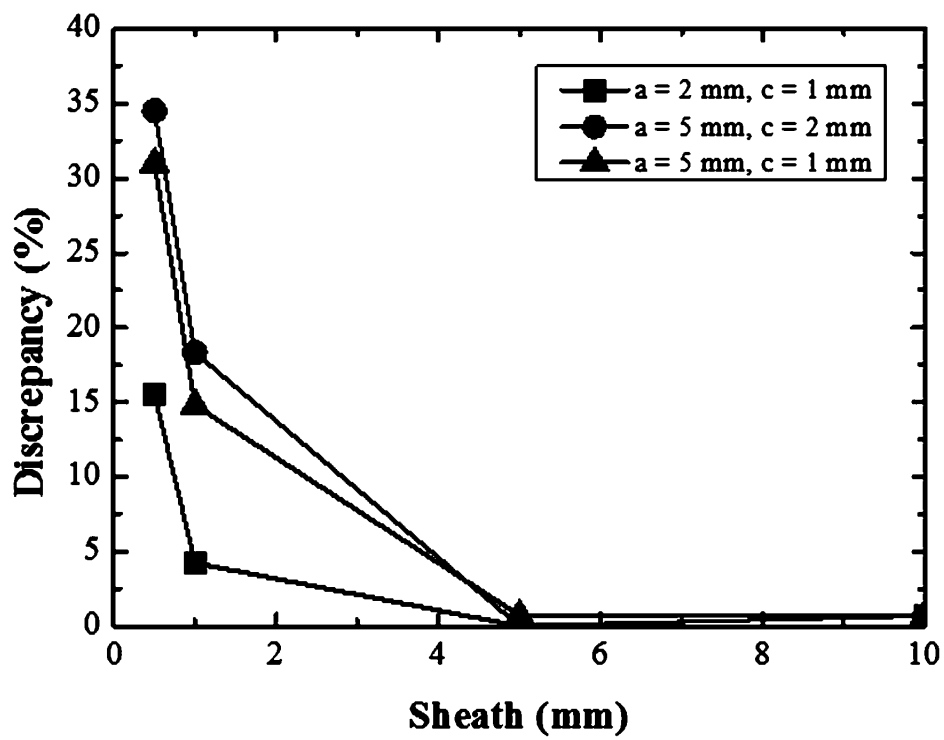
도면5



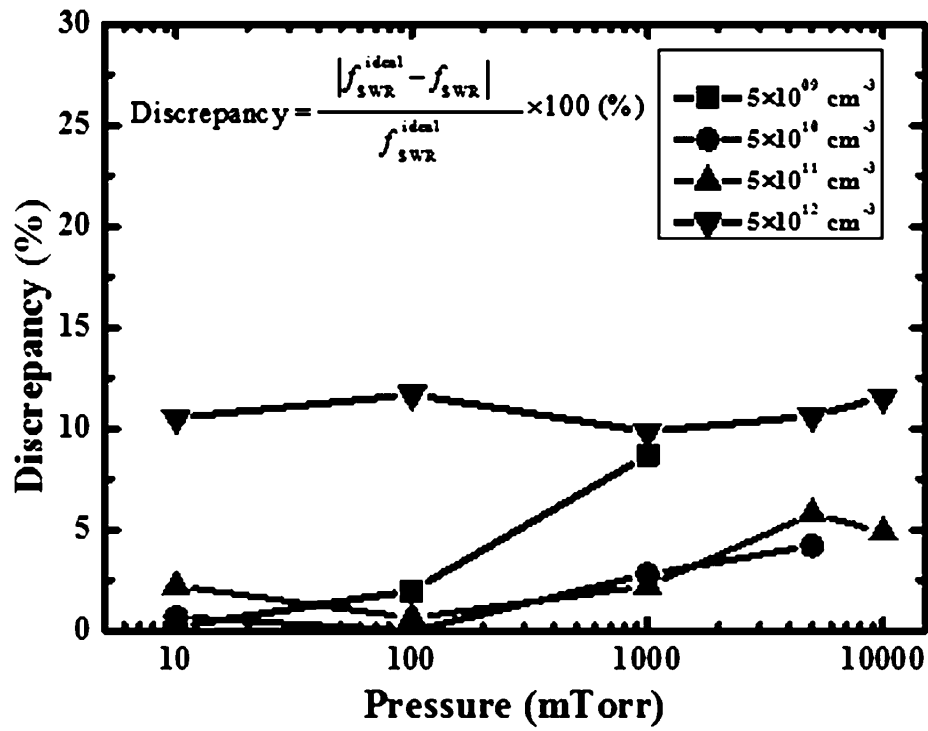
도면6



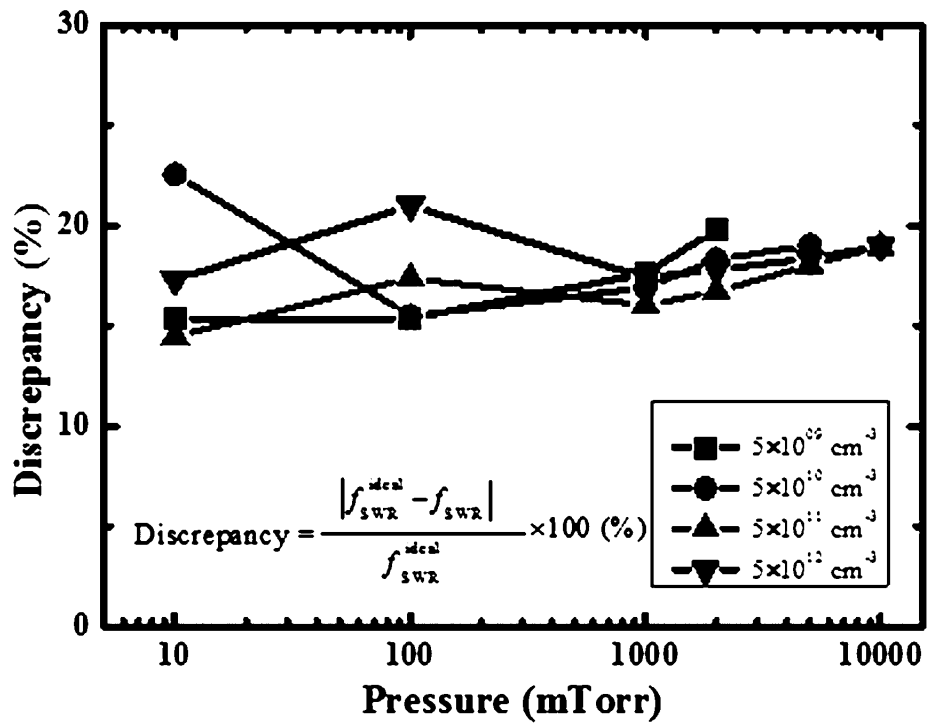
도면7



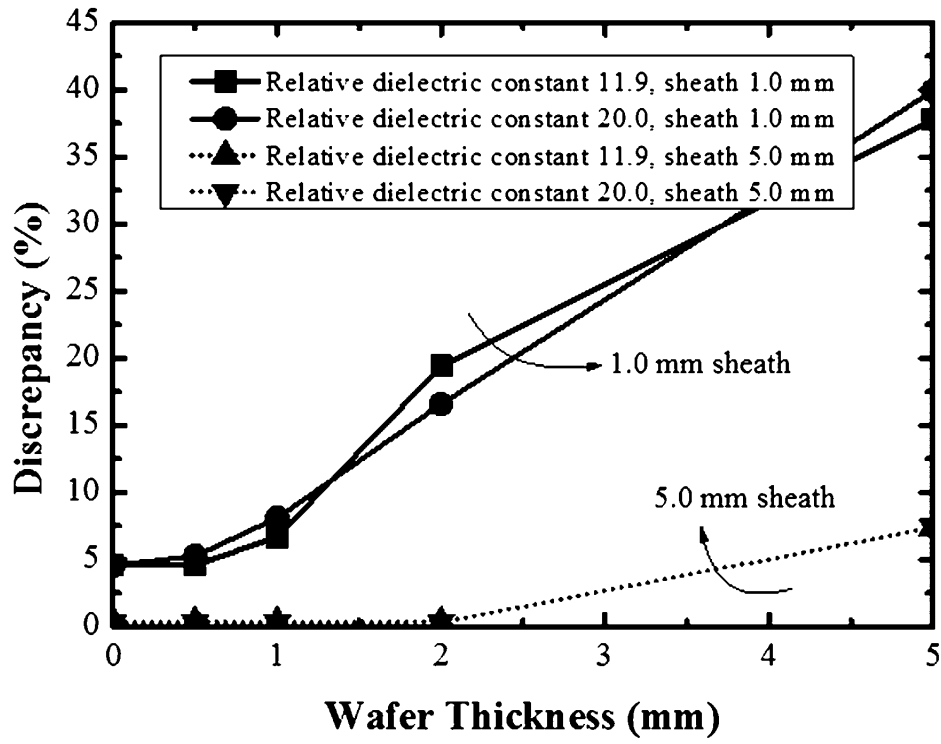
도면8a



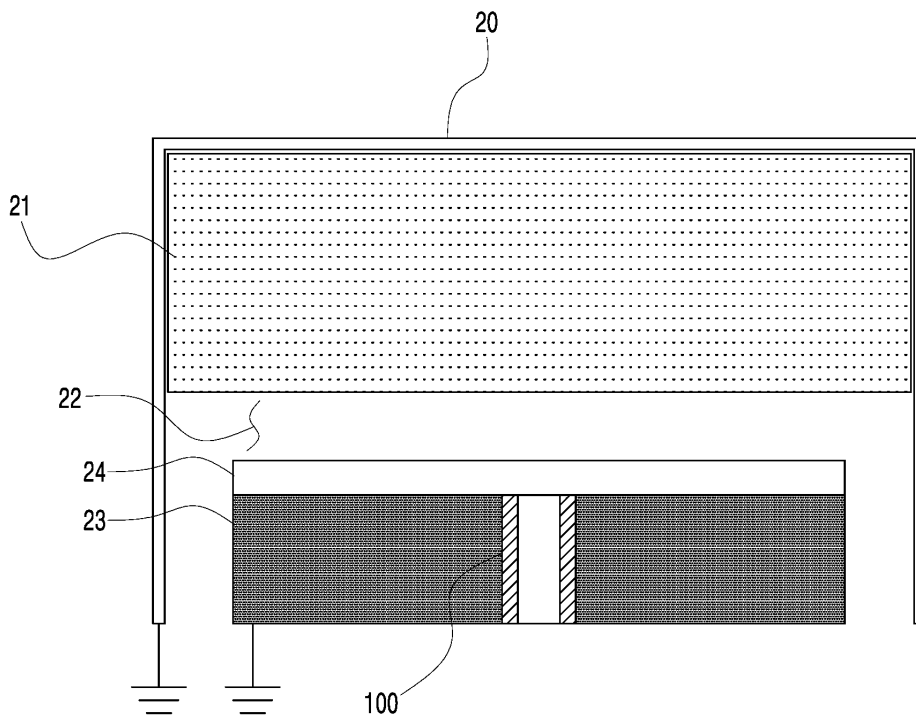
도면8b



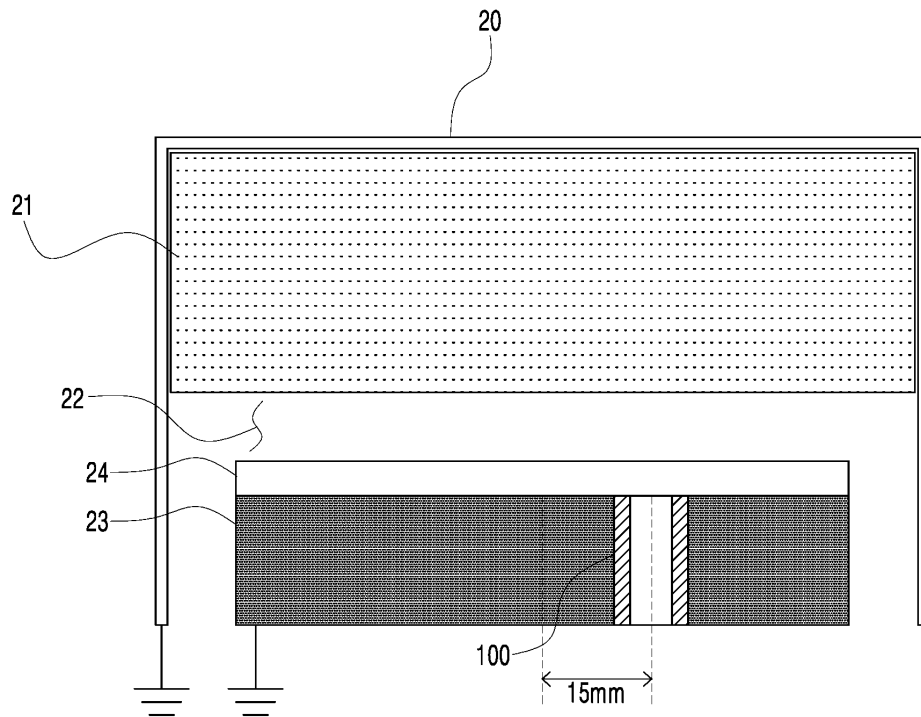
도면9



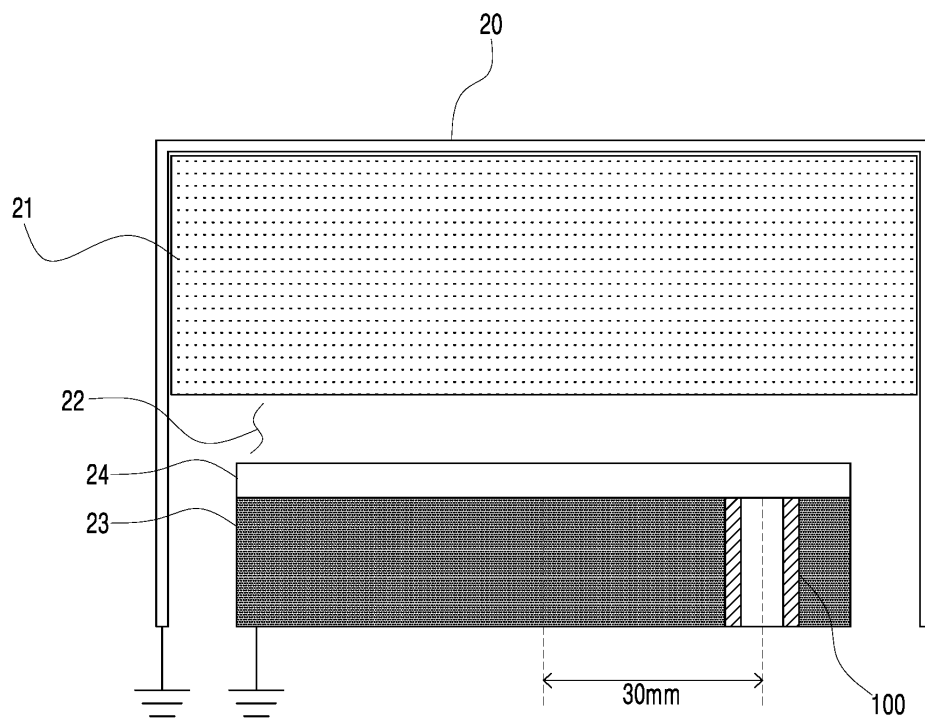
도면10a



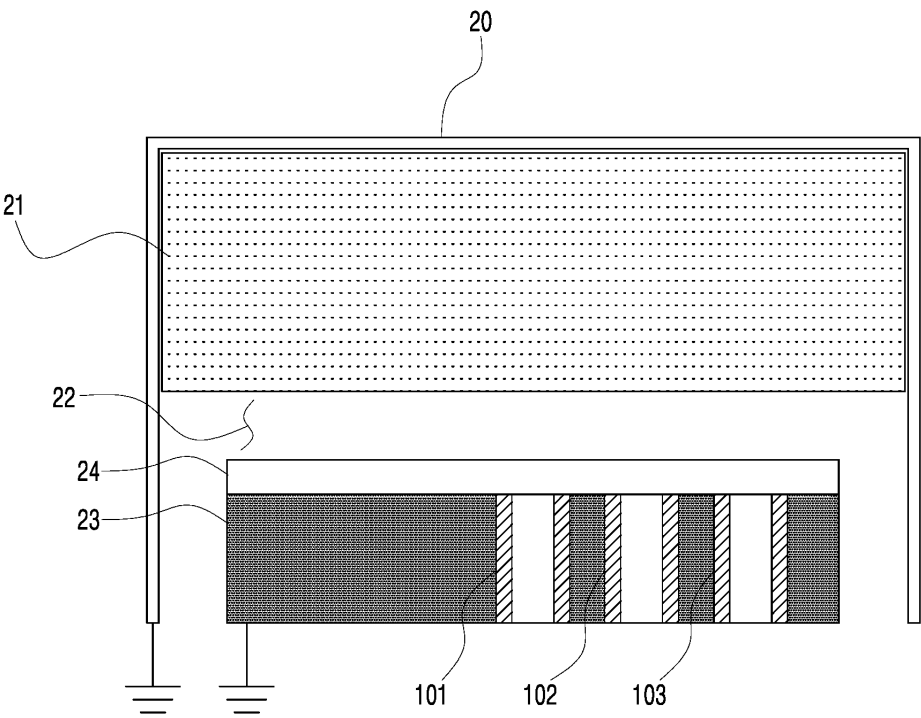
도면10b



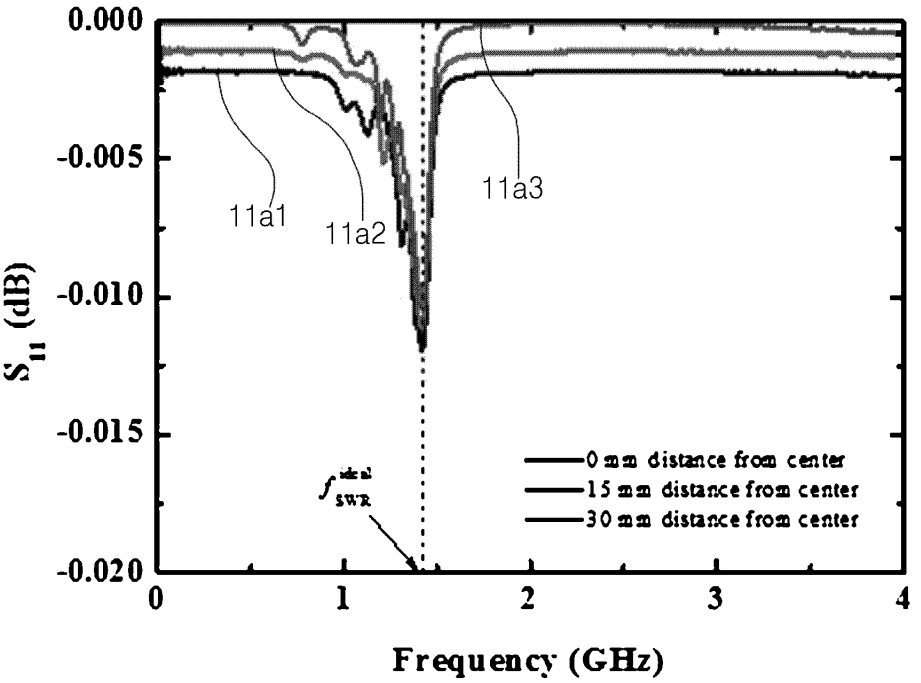
도면10c



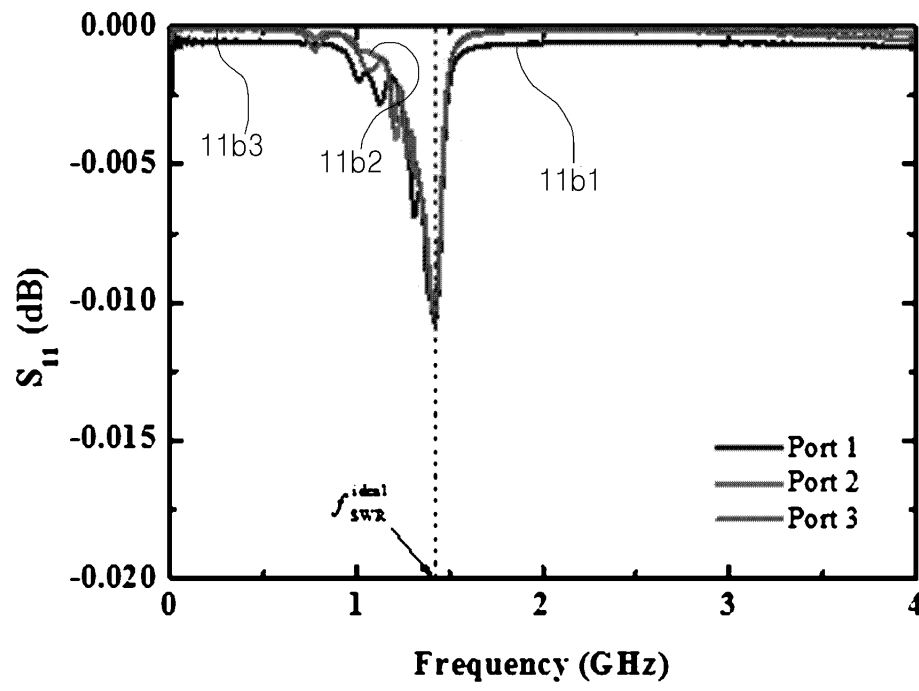
도면10d



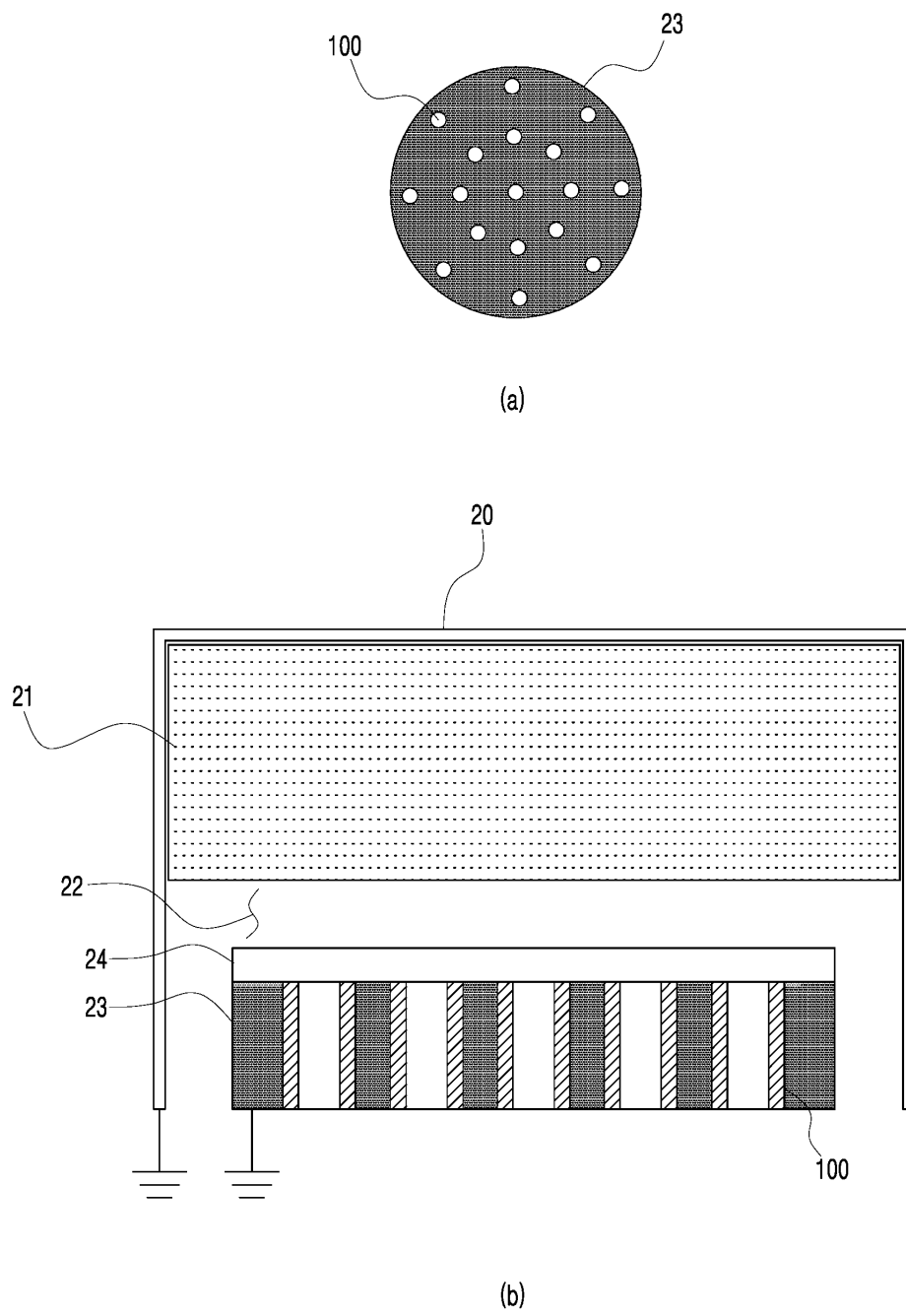
도면11a



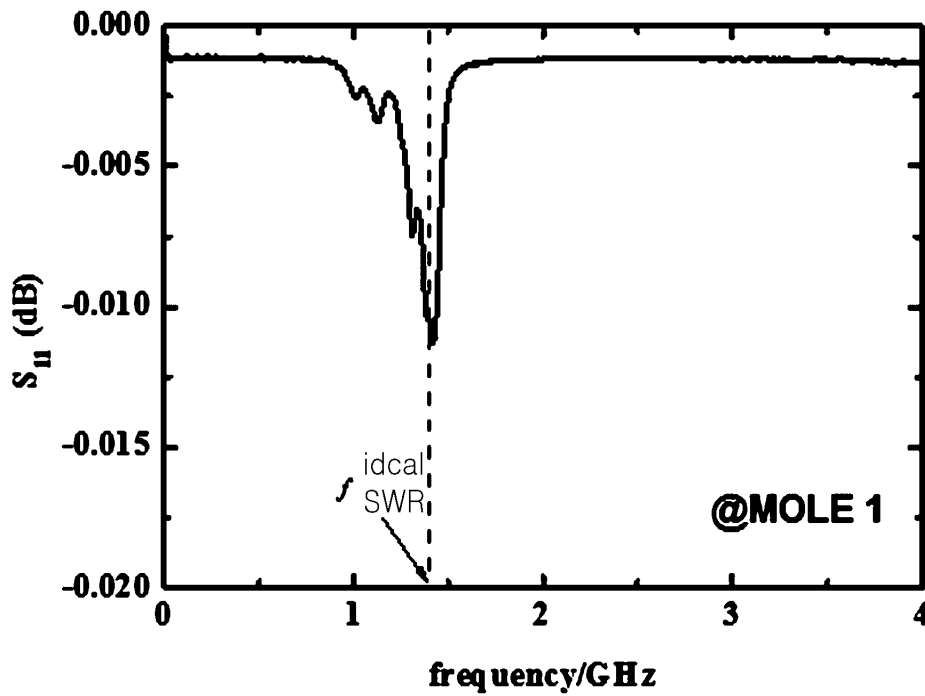
도면11b



도면12



도면13



도면14

