



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2013년11월04일  
(11) 등록번호 10-1324990  
(24) 등록일자 2013년10월29일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G01N 27/02 (2006.01) H05H 1/46 (2006.01)  
G01R 27/04 (2006.01)  
(21) 출원번호 10-2011-0089172  
(22) 출원일자 2011년09월02일  
심사청구일자 2011년09월02일  
(65) 공개번호 10-2013-0025698  
(43) 공개일자 2013년03월12일  
(56) 선행기술조사문헌  
KR100833646 B1  
KR1020040093017 A

(73) 특허권자  
한국표준과학연구원  
대전 유성구 도룡동 1  
(72) 발명자  
유신재  
대전광역시 유성구 신성동 하나아파트 109동 907호  
김정형  
대전광역시 동구 백룡로5번길 124 (자양동)  
(뒷면에 계속)  
(74) 대리인  
이평우

전체 청구항 수 : 총 4 항

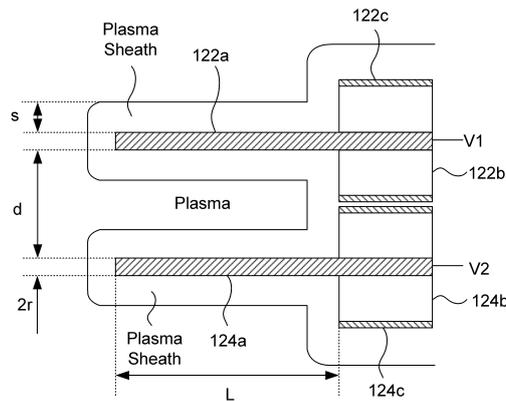
심사관 : 노대현

(54) 발명의 명칭 플라즈마 측정 장치 및 측정 방법

**(57) 요약**

본 발명은 플라즈마 측정 장치 및 플라즈마 측정 방법을 제공한다. 이 장치는 플라즈마 내부에 삽입되고 전자기파를 발산하는 송신 안테나, 플라즈마 내부에 삽입되고 송신 안테나와 나란히 배치되는 수신 안테나, 가변 주파수를 안테나에 송신 안테나에 제공하고, 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 전기적 특성을 측정하여 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 임피던스를 출력하는 네트워크 분석부, 및 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 임피던스를 분석하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하는 처리부를 포함한다.

**대표도 - 도2**



(72) 발명자

**유광호**

충청남도 연기군 조치원읍 허만석로 59-1

**성대진**

충청남도 공주시 반포면 공암양지말길 10-12

**신용현**

대전광역시 유성구 계룡로 55, 103동 2504호 (봉명동, 유성자이)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 11102028

부처명 지식경제부

연구사업명 국가연구개발사업

연구과제명 우주 모사 환경 발생 및 정밀 제어 기반 신공정 기술 개발

주관기관 한국표준과학연구원

연구기간 2011.07.01 ~ 2012.06.30

---

## 특허청구의 범위

### 청구항 1

플라즈마 내부에 삽입되고 전자기파를 발산하는 송신 안테나;

플라즈마 내부에 삽입되고 상기 송신 안테나와 나란히 배치되는 수신 안테나;

가변 주파수를 안테나에 상기 송신 안테나에 제공하고, 상기 송신 안테나와 상기 수신 안테나 사이의 전기적 특성을 측정하여 상기 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 임피던스를 출력하는 네트워크 분석부; 및

상기 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 직렬 임피던스를 분석하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하는 처리부를 포함하고,

상기 처리부는 상기 직렬 임피던스의 허수부를 미분하여 미분한 영인 제1 미분 주파수 및 제2 미분 주파수를 추출하고, 상기 제1 미분 주파수 및 상기 제2 미분 주파수를 이용하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하고,

상기 직렬 임피던스는:

서로 직렬 연결된 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터;

상기 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터에 병렬 연결된 플라즈마 축전기;

상기 플라즈마 축전기의 일단과 상기 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터의 일단이 연결되는 제1 노드에 연결되는 송신 안테나 스위스 축전기; 및

상기 플라즈마 축전기의 타단과 상기 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터의 타단이 연결되는 제2 노드에 연결되는 수신 안테나 스위스 축전기를 포함하는 것을 특징으로 하는 플라즈마 측정 장치.

### 청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 송신 안테나는:

네트워크 분석부로부터 전력을 공급받는 중심 도선;

상기 중심 도선을 감싸는 절연체; 및

접지되고 상기 절연체를 감싸는 외부 도선을 포함하고,

상기 중심 도선의 일부가 상기 플라즈마에 노출되도록 상기 절연체의 일부가 제거된 것을 특징으로 하는 플라즈마 측정 장치.

### 청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 수신 안테나는:

중심 도선;

상기 중심 도선을 감싸는 절연체; 및

접지되고 상기 절연체를 감싸는 외부 도선을 포함하고,

상기 중심 도선의 일부가 상기 플라즈마에 노출되도록 상기 절연체의 일부가 제거된 것을 특징으로 하는 플라즈마 측정 장치.

### 청구항 4

플라즈마에 노출되는 송신 안테나와 플라즈마에 노출되고 저항에 연결된 수신 안테나 사이에 주파수에 따른 투과계수 또는 스퀘터링 매트릭스를 측정하는 단계;

상기 투과계수 또는 스캐터링 매트릭스를 이용하여 상기 송신 안테나와 상기 수신 안테나 사이의 직렬 임피던스를 추출하는 단계; 및

상기 직렬 임피던스를 이용하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하는 단계를 포함하고,

상기 직렬 임피던스를 이용하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하는 단계는:

상기 직렬 임피던스의 허수부를 미분하여 미분한 영인 제1 미분 주파수 및 제2 미분 주파수를 추출하는 단계; 및

상기 제1 미분 주파수 및 상기 제2 미분 주파수를 이용하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하는 단계를 포함하고,

상기 직렬 임피던스는:

서로 직렬 연결된 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터;

상기 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터에 병렬 연결된 플라즈마 축전기;

상기 플라즈마 축전기의 일단과 상기 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터의 일단이 연결되는 제1 노드에 연결되는 송신 안테나 스위스 축전기; 및

상기 플라즈마 축전기의 타단과 상기 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터의 타단이 연결되는 제2 노드에 연결되는 수신 안테나 스위스 축전기를 포함하는 것을 특징으로 하는 플라즈마 측정 방법.

## 청구항 5

삭제

## 명세서

### 기술분야

[0001] 본 발명은 플라즈마의 특성을 측정하는 플라즈마 측정 장치에 관한 것으로, 더 구체적으로 전자-중성 충돌 주파수를 측정하는 플라즈마 측정 장치에 관한 것이다.

### 배경기술

[0002] 종래에는 전자 밀도와 전자-중성입자 충돌 주파수를 통해서 공정을 모니터링하는 장치로 SEERS(self excited electron resonance spectroscopy)가 사용되고 있다.

### 발명의 내용

#### 해결하려는 과제

[0003] 본 발명의 해결하고자 하는 일 기술적 과제는 광학적인 방법을 사용하지 않고 전기적 방법으로 신뢰성 있는 전자-중성 충돌 주파수(electron-neutral collision frequency) 구하는 장치를 제공하는 것이다.

#### 과제의 해결 수단

[0004] 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 측정 장치는 플라즈마 내부에 삽입되고 전자기파를 발산하는 송신 안테나; 플라즈마 내부에 삽입되고 상기 송신 안테나와 나란히 배치되는 수신 안테나; 가변 주파수를 안테나에 상기 송신 안테나에 제공하고, 상기 송신 안테나와 상기 수신 안테나 사이의 전기적 특성을 측정하여 상기 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 임피던스를 출력하는 네트워크 분석부; 및 상기 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 임피던스를 분석하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하는 처리부를 포함한다.

[0005] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 송신 안테나는 네트워크 분석부로부터 전력을 공급받는 중심 도선; 상기 중심 도선을 감싸는 절연체; 및 접지되고 상기 절연체를 감싸는 외부 도선을 포함할 수 있다. 상기 중심 도선의 일부가 상기 플라즈마에 노출되도록 상기 절연체의 일부가 제거될 수 있다.

[0006] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 수신 안테나는 중심 도선; 상기 중심 도선을 감싸는 절연체; 및 접지되고

상기 절연체를 감싸는 외부 도선을 포함할 수 있다. 상기 중심 도선의 일부가 상기 플라즈마에 노출되도록 상기 절연체의 일부가 제거될 수 있다.

[0007] 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 측정 방법은 플라즈마에 노출되는 송신 안테나와 플라즈마에 노출되고 저항에 연결된 수신 안테나 사이에 주파수에 따른 투과계수 또는 스퀘터링 매트릭스를 측정하는 단계; 상기 투과계수 또는 스퀘터링 매트릭스를 이용하여 상기 송신 안테나와 상기 수신 안테나 사이의 직렬 임피던스를 추출하는 단계; 및 상기 직렬 임피던스를 이용하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0008] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 직렬 임피던스를 이용하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하는 단계는 상기 직렬 임피던스의 허수부를 미분하여 미분한 영인 제1 미분 주파수 및 제2 미분 주파수를 추출하는 단계; 및 상기 제1 미분 주파수 및 상기 제2 미분 주파수를 이용하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0009] 상기 직렬 임피던스는 서로 직렬 연결된 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터; 상기 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터에 병렬 연결된 플라즈마 축전기; 상기 플라즈마 축전기의 일단과 상기 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터의 일단이 연결되는 제1 노드에 연결되는 송신 안테나 스위스 축전기; 및 상기 플라즈마 축전기의 타단과 상기 플라즈마 저항 및 플라즈마 인덕터의 타단이 연결되는 제2 노드에 연결되는 수신 안테나 스위스 축전기를 포함할 수 있다.

### 발명의 효과

[0010] 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 측정 장치는 플라즈마를 이용하는 공정에 적용하여 전자-중성입자 충돌 주파수(electron-neutral collision frequency)의 시간에 따른 변화를 측정할 수 있다. 전자-중성입자 충돌 주파수는 공정의 미세한 제어할 수 있다. 구체적으로, 전자-중성입자 충돌 주파수는 진공 용기의 리크(leak) 감지, 챔버 벽의 오염 상태확인, 챔버 세정의 종료 시점의 확인을 제공할 수 있다. 본 발명은 종래의 광학적 방법(SEERS)에 비하여 경제적이고 작은 부피로 전자-중성입자 충돌 주파수를 제공할 수 있다. 또한, 플라즈마 밀도가 추가적으로 관측될 수 있다. 또한, 본 발명은 설치가 용이하고 기존의 방법에 비해서 특정 지점을 선택하여 측정할 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

[0011] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 측정 장치를 설명하는 도면이다.

도 2는 도 1의 플라즈마 측정 장치의 송신 안테나와 수신 안테나를 설명하는 단면도이다.

도 3 및 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 측정 장치의 등가 회로도이다.

도 5는 주파수에 따른 직렬 임피던스의 허수부(리액턴스)를 표시하는 도면이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 전자 밀도(원형,  $W_{rx}$ )와 랑뮈어 프로브를 이용한 전자밀도(사각형, SLP)를 비교하는 도면이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 중성-전자 충돌 주파수(원형,  $W_{rx}$ )와 랑뮈어 프로브를 이용하여 구한 중성-전자 충돌 주파수(사각형, EEDF))를 표시한다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0012] 반도체, LCD, 태양전지 등을 생산하기 위하여 플라즈마 공정은 널리 이용되고 있다. 플라즈마 공정의 신뢰성을 확보하기 위하여 플라즈마의 상태 또는 공정조건 등을 실시간으로 모니터링하는 기술이 요구된다. 플라즈마의 상태를 나타내는 변수 중 전자 밀도와 전자-중성입자 충돌 주파수(electron-neutral collision frequency)는 매우 중요한 변수이다. 전자 밀도와 전자-중성입자 충돌 주파수를 통해서 공정을 모니터링하는 장치로 SEERS(self excited electron resonance spectroscopy)가 사용되고 있다. 하지만 SEERS에서 얻어진 전자밀도와 전자-중성입자 충돌 주파수는 플라즈마 전체를 평균한 결과이다. SEERS는 전체적인 공정 상태의 확인을 제공할 수 있으나, 특정 지점에서의 플라즈마 상태를 측정하지 못한다. 따라서 특정지점의 전자밀도와 전자-중성입자 충돌 주파수를 실시간으로 모니터링하는 기술이 요구된다.

[0013] 또한, 간접적으로, 전자-중성입자 충돌 주파수는 전자 에너지 분포 함수(electron energy distribution function)을 이용하여 계산될 수 있다. 상기 전자 에너지 분포 함수는 랑뮈어 프로브를 이용하여 측정될 수 있

다. 전자 에너지 분포 함수를 이용한 방법은 정확성이 떨어진다.

- [0014] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예들을 상세히 설명하기로 한다. 그러나, 본 발명은 여기서 설명되어지는 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되어지는 것이다. 도면들에 있어서, 구성요소는 명확성을 기하기 위하여 과장되어진 것이다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호로 표시된 부분들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.
- [0015] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 측정 장치를 설명하는 도면이다.
- [0016] 도 2는 도 1의 플라즈마 측정 장치의 송신 안테나와 수신 안테나를 설명하는 단면도이다.
- [0017] 도 1 및 도 2를 참조하면, 플라즈마 측정 장치는 송신 안테나(122), 수신 안테나(124), 네트워크 분석부(126), 및 처리부(128)를 포함한다.
- [0018] 송신 안테나(122)는 플라즈마 내부에 삽입되고 전자기파를 발산한다. 상기 송신 안테나(122)는 상기 네트워크 분석부(126)의 제1 포트와 동축 케이블을 통하여 연결될 수 있다. 상기 송신 안테나(122)는 네트워크 분석부(126)로부터 전력을 공급받는 중심 도선(122a), 상기 중심 도선(122a)을 감싸는 절연체(122b), 및 접지되고 상기 절연체(122b)를 감싸는 외부 도선(122c)을 포함할 수 있다. 상기 중심 도선(122a)의 일부가 상기 플라즈마에 노출되도록 상기 절연체(122b)의 일부가 제거될 수 있다. 상기 절연체(122b)가 제거된 부분에서 전자기파가 방사된다. 상기 방사된 전자기파는 플라즈마를 통과하여 상기 수신 안테나(124)에 수신될 수 있다. 상기 중심 도선(122a)은 원통형 금속 원형 막대 형상일 수 있다. 상기 송신 안테나(122)의 주위에 플라즈마 쉬스(plasma sheath)가 형성될 수 있다. 플라즈마 쉬스(plasma sheath)는 쉬스 정전용량(Cs)을 가질 수 있다.
- [0019] 수신 안테나(124)는 플라즈마 내부에 삽입되고 상기 송신 안테나(122)와 나란히 배치될 수 있다. 상기 수신 안테나(124)와 상기 송신 안테나(122)는 동일한 구조일 수 있다. 상기 수신 안테나(124)는 상기 네트워크 분석부(126)의 제2 포트에 동축 케이블을 통하여 연결될 수 있다. 상기 수신 안테나(124)는 중심 도선(124a), 상기 중심 도선(124a)을 감싸는 절연체(124b), 및 접지되고 상기 절연체(124b)를 감싸는 외부 도선(124c)을 포함할 수 있다. 상기 중심 도선(124a)의 일부가 상기 플라즈마에 노출되도록 상기 절연체(124b)의 일부가 제거될 수 있다.
- [0020] 상기 송신 안테나(122)의 노출된 길이는 L이고, 반경은 r일 수 있다. 플라즈마에 노출된 상기 송신 안테나(122)의 주위에는 플라즈마 쉬스가 형성될 수 있다. 상기 플라즈마 쉬스의 두께는 s일 수 있다. 또한, 상기 송신 안테나(122)의 전압은 V1이다.
- [0021] 상기 수신 안테나(124)의 노출된 길이는 L이고, 반경은 r일 수 있다. 플라즈마에 노출된 상기 수신 안테나의 주위에는 플라즈마 쉬스가 형성될 수 있다. 상기 플라즈마 쉬스의 두께는 s일 수 있다. 또한, 상기 수신 안테나(124)의 전압은 V2이다. 상기 수신 안테나(124)와 송신 안테나(122)의 이격된 거리는 d이다.
- [0022] 상기 네트워크 분석부(126)는 주파수의 변경이 가능한 RF 발전부를 포함할 수 있다. 상기 네트워크 분석부(126)의 주파수는 수백 khz 내지 수십 Ghz를 스캔할 수 있다. 상기 네트워크 분석부(126)의 스캔 시간은 수 초 이내일 수 있다.
- [0023] 상기 네트워크 분석부(126)는 주파수에 따른 스퀈터링 매트릭스(scattering matrix)를 추출할 수 있다. 상기 네트워크 분석부(126)는 가변 주파수를 상기 송신 안테나(122)에 제공한다. 상기 네트워크 분석부(126)는 상기 송신 안테나(122)와 상기 수신 안테나(124) 사이의 전기적 특성(스캐터링 매트릭스, 임피던스 매트릭스, 트랜스미션 매트릭스)을 측정하여 상기 송신 안테나(122)와 수신 안테나(124) 사이의 직렬 임피던스(Zs)를 출력할 수 있다.
- [0024] 처리부(128)는 상기 송신 안테나(122)와 수신 안테나(124) 사이의 직렬 임피던스(Zs)를 분석하여 전자-중성 충돌 주파수를 산출할 수 있다.
- [0025] 상기 플라즈마는 챔버(131)의 내부에 형성될 수 있다. 에너지 인가 수단(136)은 상기 챔버(131) 내부에 플라즈마를 형성할 수 있다. 상기 에너지 인가 수단(136)은 유도 결합 안테나, 축전 결합 전극, 또는 초고주파를 전송하기 위한 도파관과 유전체판일 수 있다.
- [0026] 상기 에너지 인가 수단(136)이 축전 결합 전극인 경우, RF 전원(132)은 상기 에너지 인가 수단(136)에 RF 전력을 제공할 수 있다. 임피던스 매칭 네트워크(134)는 상기 RF 전원(132)과 상기 에너지 인가 수단(136) 사이에

배치될 수 있다.

[0027] 상기 챔버(131)는 배기부(142)에 의하여 배기될 수 있다. 또한, 가스 공급부(148)는 가스를 상기 챔버(131)에 제공할 수 있다. 상기 가스 공급부(148)와 상기 챔버(131) 사이에 밸브(144) 및 유량 조절 수단(146)이 배치될 수 있다.

[0028] 상기 챔버(131)의 내부에는 기관 홀더(138)가 배치될 수 있다. 상기 기관 홀더(138) 상에 기관(137)이 장착될 수 있다.

[0029] 도 3 및 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 측정 장치의 등가 회로도이다.

[0030] 도 3 및 도 4를 참조하면, 송신 안테나와 수신 안테나는 직렬 임피던스( $Z_s$ )로 표현될 수 있다.

[0031] 상기 직렬 임피던스( $Z_s$ )는 서로 직렬 연결된 플라즈마 저항( $R_p$ ) 및 플라즈마 인덕터( $L_p$ ), 상기 플라즈마 저항( $R_p$ ) 및 플라즈마 인덕터( $L_p$ )에 병렬 연결된 플라즈마 축전기( $C_0$ ), 상기 플라즈마 축전기( $C_0$ )의 일단과 상기 플라즈마 저항( $R_p$ ) 및 플라즈마 인덕터( $R_p$ )의 일단이 연결되는 제1 노드( $N_1$ )에 연결되는 송신 안테나 쉬스 축전기( $CS_1$ ), 및 상기 플라즈마 축전기( $C_0$ )의 타단과 상기 플라즈마 저항( $R_p$ ) 및 플라즈마 인덕터( $L_p$ )의 타단이 연결되는 제2 노드( $N_2$ )에 연결되는 수신 안테나 쉬스 축전기( $Cs_2$ )를 포함할 수 있다.

[0032] 상기 송신 안테나에서부터 플라즈마를 지나 상기 수신 안테나까지의 직렬 임피던스( $Z_s$ )는 다음과 같이 표시될 수 있다.

**수학식 1**

$$Z_s = \frac{1}{j\omega C'_{sh}} + \frac{1}{j\omega C_0 + \frac{1}{R_p + j\omega L_p}}$$

[0033]

**수학식 2**

$$C'_{sh} = \frac{C_s}{2}$$

$$R_p = vL_p$$

$$L_p = \omega_{pe}^{-2} C_0^{-1}$$

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{\pi(L-s)}{\cosh^{-1}\left(\frac{d}{2(s+r)}\right)}$$

$$C_s = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{2\pi(L-s)}{\ln\left(\frac{r+s}{r}\right)}$$

$$s = 5\lambda_{De}$$

[0034]

[0035] 여기서, L은 송신 안테나의 길이이고, s는 플라즈마 쉬스(plasma sheath)의 두께이고, r은 송신 안테나의 반경이고, d는 송신 안테나의 중심과 수신 안테나의 중심 사이의 거리이고,  $\epsilon_0$ 은 진공의 유전율이고,  $\lambda_{De}$ 는 드바이 길이(Debye Length)이고,  $\omega_{pe}$ 는 플라즈마 각주파수이고, v는 전자-중성의 충돌 주파수이고,  $\omega$ 는 송신 안테나에서 방사되는 각주파수다.

[0036] 2 포트 네트워크의 스퀘터링 매트릭스의 S21 성분 및 직렬 임피던스( $Z_s$ )는 다음과 같이 표시될 수 있다.

**수학식 3**

$$S_{21} = 2 \frac{V_2}{V_G} = 2 \frac{Z_0}{Z_s + 2Z_0}$$

$$Z_s = \frac{2Z_0(1 - S_{21})}{S_{21}}$$

[0037]

[0038] 여기서,  $Z_0$ 는 R네트워크 분석부의 내부 임피던스 또는 동축 케이블의 특성 임피던스(characteristic impedance),  $V_g$ 는 네트워크 분석부의 진폭이다. 통상적으로,  $Z_0$ 는 50 오옴일 수 있다. 주파수에 따른  $S_{21}$  성분은 네트워크 분석부에 의하여 측정될 수 있다.  $S_{21}$  성분은 제2 포트에서의 투과 계수(transmission coefficient)와 동일할 수 있다.

[0039] 상기 직렬 임피던스( $Z_s$ )는 실수부( $\text{Re}(Z_s)$ )와 허수부( $\text{Im}(Z_s)$ )를 가질 수 있다. 직렬 임피던스의 실수부( $\text{Re}(Z_s)$ )는 다음과 같이 표현될 수 있다.

**수학식 4**

$$\text{Re}(Z) = \frac{1}{\omega_{pe} C_0} \frac{\delta}{(\gamma^2 - 1)^2 + \gamma^2 \delta^2}$$

[0040]

**수학식 5**

$$\gamma \equiv \frac{\omega}{\omega_{pe}}, \delta \equiv \frac{\nu}{\omega_{pe}}$$

[0041]

[0042] 또한, 직렬 임피던스의 허수부( $\text{Im}(Z_s)$ )는 다음과 같이 표현될 수 있다.

**수학식 6**

$$\text{Im}(Z) = -\frac{C_0[(\gamma^2 - 1)^2 + \gamma^2 \delta^2] + C_{sh}[(\gamma^2 - 1)\gamma^2 + \gamma^2 \delta^2]}{\omega_{pe} C_0 C_{sh}[(\gamma^2 - 1)^2 + \gamma^2 \delta^2]}$$

[0043]

[0044] 직렬 임피던스( $Z_s$ )의 허수부( $\text{Im}(Z_s)$ )를 각주파수( $\omega$ )로 미분하여 영이되는 조건에 의하여, 2개의 공명 각주파수가 존재한다. 공명 각주파수( $\omega_{rx}$ )는 다음과 같이 표현될 수 있다.

**수학식 7**

$$\omega_{rx} = \omega_{pe} \sqrt{1 \pm \left( \frac{\nu}{\omega_{pe}} \right)}$$

[0045]

[0046] 공명 각주파수( $\omega_{rx}$ )를 이용하면, 전자-중성 충돌 주파수( $\nu$ ) 및 플라즈마 각주파수( $\omega_{pe}$ )가 다음과 같이 결정될 수 있다.

**수학식 8**

[0047] 
$$v = \left[ \left( \frac{2\omega_{rX(+)}^2}{\omega_{rX(-)}^2 + \omega_{rX(+)}^2} \right) - 1 \right] \sqrt{\left( \frac{\omega_{rX(-)}^2 + \omega_{rX(+)}^2}{2} \right)}$$

[0048] 또한, 플라즈마 각주파수는 다음과 같이 표시될 수 있다.

**수학식 9**

[0049] 
$$\omega_{pe} = \sqrt{\left( \frac{\omega_{rX(-)}^2 + \omega_{rX(+)}^2}{2} \right)}$$

[0050] 이에 따라, 플라즈마 밀도(전자 밀도)는 상기 플라즈마 각주파수의( $\omega_{pe}$ ) 함수로 표현될 수 있다.

[0051] 도 5는 주파수에 따른 직렬 임피던스의 허수부(리액턴스)를 표시하는 도면이다.

[0052] 도 5를 참조하면,  $\omega_{rX(-)}$ 와  $\omega_{rX(+)}$ 를 수학식 7 및 수학식 8에 대입하여, 전자-중성 충돌 주파수( $v$ ), 플라즈마 각주파수( $\omega_{pe}$ ), 및 플라즈마 밀도(ne)가 구해질 수 있다.

[0053] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 전자 밀도(원형, Wrx)와 랑뮈어 프로브를 이용한 전자밀도(사각형, SLP)를 비교하는 도면이다.

[0054] 에너지 인가 수단에 공급되는 전력에 따라 플라즈마 밀도(전자 밀도, ne)가 표시된다. 전자 밀도와 랑뮈어 프로브를 이용한 전자밀도는 약간의 차이가 있다. 그러나, 본 발명에 의한 플라즈마 밀도가 더욱 정확한 값으로 평가된다.

[0055] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 중성-전자 충돌 주파수(원형, Wrx)와 랑뮈어 프로브를 이용하여 구한 중성-전자 충돌 주파수(사각형, EEDF))를 표시한다.

[0056] 랑뮈어 프로브를 이용하여 구한 중성-전자 충돌 주파수( $v$ )는 다음과 같이 계산되었다.

**수학식 10**

[0057] 
$$v = n_g \cdot \frac{1}{n_e} \int \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m}} \sigma(\varepsilon) g_e(\varepsilon) d\varepsilon$$

[0058] 여기서,  $n_g$ 는 중성 입자의 밀도,  $n_e$ 는 전자 밀도,  $m$ 은 전자의 질량,  $g_e$ 는 전자의 에너지 분포 함수(electron energy distribution function, EEDF),  $\sigma$ 는 산란 단면적,  $\varepsilon$ 은 전자의 운동 에너지이다.

[0059] 본 발명의 일 실시예에 따른 중성-전자 충돌 주파수( $v$ )와 랑뮈어 프로브를 이용하여 구한 중성-전자 충돌 주파수( $v$ )는 서로 차이가 있다. 그러나, 플라즈마 밀도의 부정확성 및 에너지 분포 함수의 부정확성 등에 기인하여 랑뮈어 프로브 방식의 오차가 더 클 것으로 판단된다.

[0060] 본 발명에 의한 중성-전자 충돌 주파수( $v$ )는 매우 고속으로 주파수를 스캔하여 추출될 수 있다. 따라서, 상기 중성-전자 충돌 주파수( $v$ )는 공정의 이상을 감지하는 수단으로 사용될 수 있다.

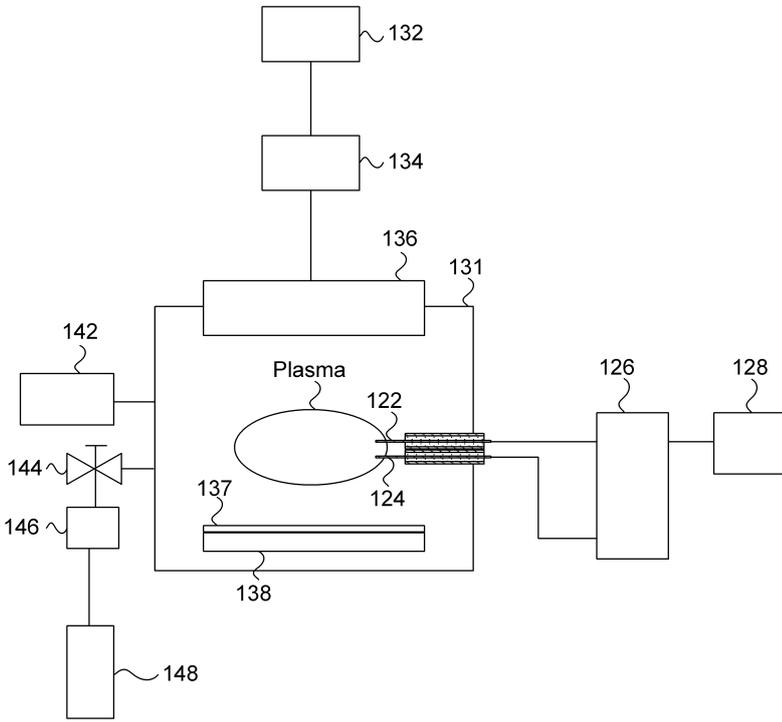
[0061] 이상에서는 본 발명을 특정의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 이러한 실시예에 한정되지 않으며, 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 실시할 수 있는 다양한 형태의 실시예들을 모두 포함한다.

**부호의 설명**

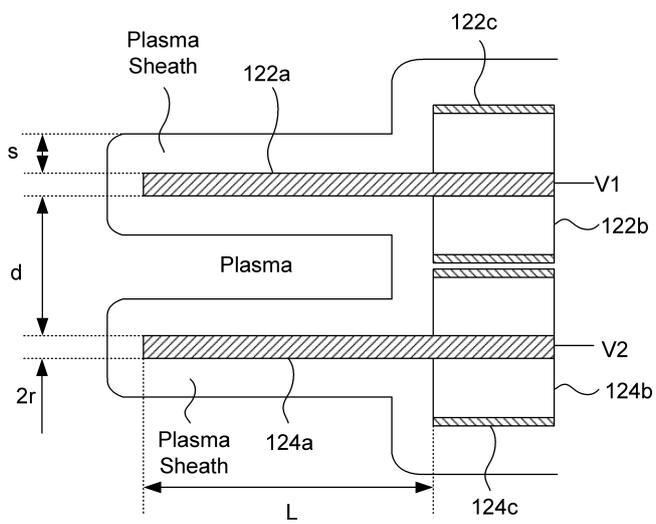
- [0062] 122: 송신 안테나
- 124: 수신 안테나
- 126: 네트워크 분석부
- 128: 처리부

도면

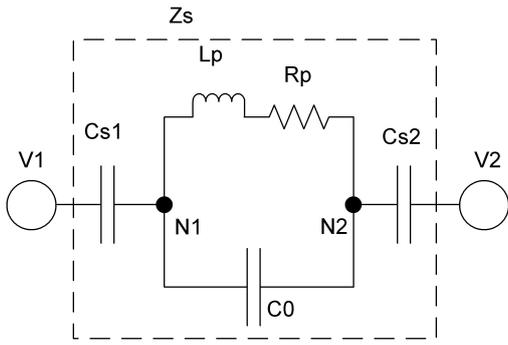
도면1



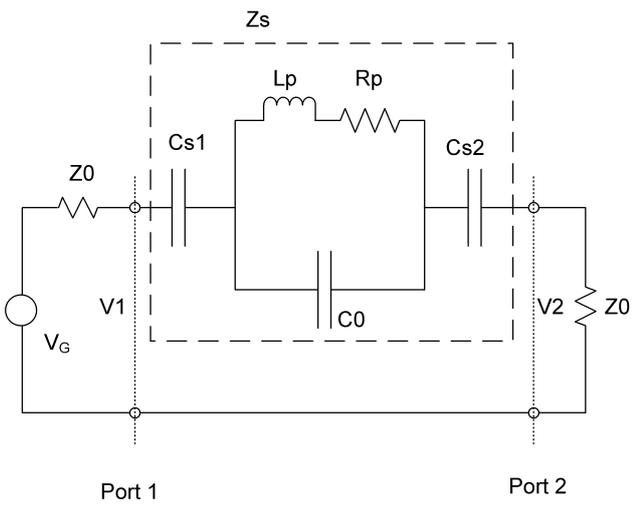
도면2



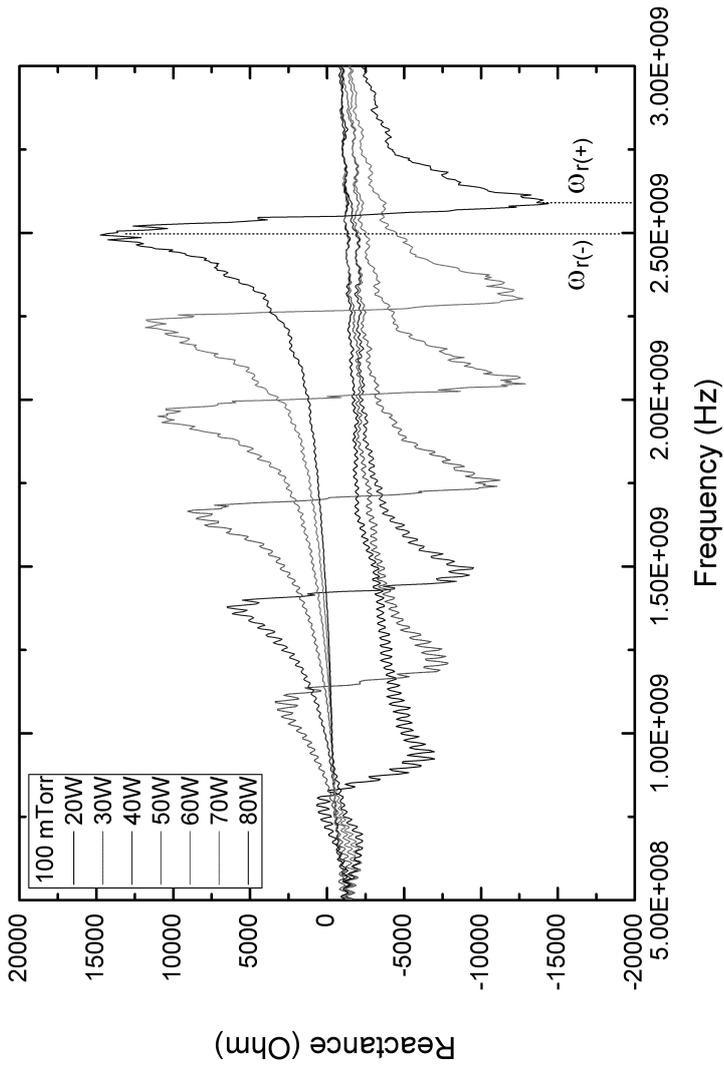
도면3



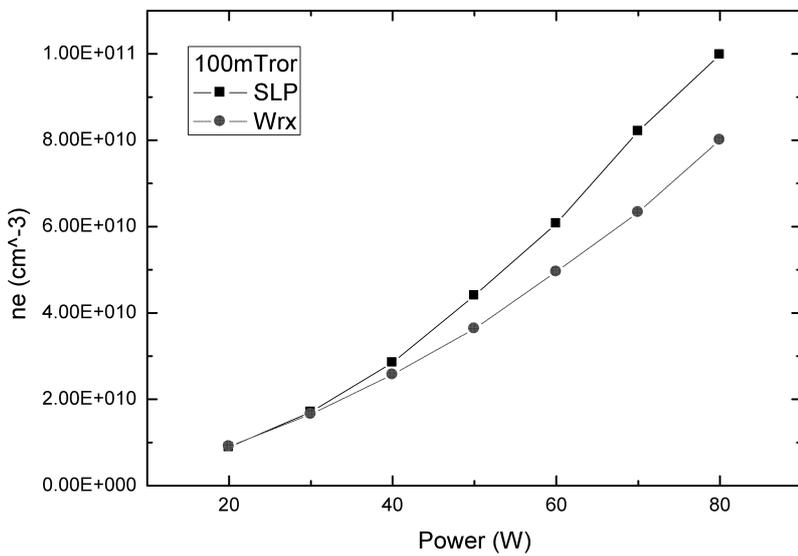
도면4



도면5



도면6



도면7

