(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2019년09월23일
(11) 등록번호 10-2024468
(24) 등록일자 2019년09월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H05H 1/00 (2006.01) *H01J 37/32* (2006.01)
(52) CPC특허분류
H05H 1/0093 (2013.01)
H01J 37/32935 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0067116
(22) 출원일자 2018년06월12일
심사청구일자 2018년06월12일
(56) 선행기술조사문헌
KR101456542 B1
KR101225010 B1
KR1020040093017 A

(73) 특허권자
충남대학교산학협력단
대전광역시 유성구 대학로 99 (궁동, 충남대학교)
(72) 발명자
유신재
대전광역시 유성구 가정로 63, 106동 1201호
이장재
대구광역시 수성구 노변공원로 95, A동 301호
김시준
대전광역시 동구 산서로 1633-16
(74) 대리인
특허법인 누리

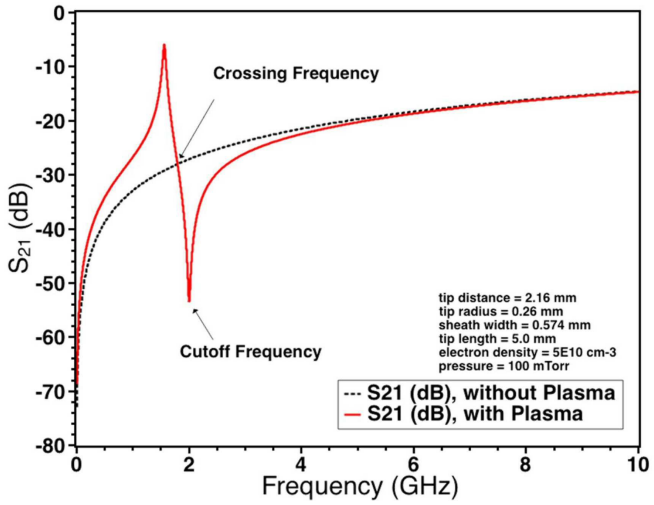
전체 청구항 수 : 총 3 항 심사관 : 이민형

(54) 발명의 명칭 **초고주파를 이용한 교차 주파수 플라즈마 진단 방법**

(57) 요 약

본 발명의 일 실시예에 따른 교차 주파수 플라즈마 진단 방법은, 플라즈마가 없는 상태에서 네트워크 분석기의 제1 포트에 연결된 방사 안테나에 초고주파수의 구동 주파수를 스캔하면서 초고주파를 방사하고, 상기 네트워크 분석기의 제2 포트에 연결된 수신 안테나를 통하여 주파수에 따른 제1 투과 계수를 측정하는 단계; 플라즈마가 있는 상태에서 네트워크 분석기의 제1 포트에 연결된 방사 안테나에 초고주파수의 구동 주파수를 스캔하면서 초고주파를 방사하고, 상기 네트워크 분석기의 제2 포트에 연결된 수신 안테나를 통하여 주파수에 따른 제2 투과 계수를 측정하는 단계; 및 상기 제1 투과 계수과 상기 제2 투과 계수가 일치하는 교차 주파수를 산출하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도2



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	20172010105020
부처명	산업통상자원부
연구관리전문기관	한국에너지기술평가원
연구사업명	에너지기술개발사업
연구과제명	PFC 가스대체용 Fluorocarbon 계역 Precursor를 이용한 식각 공정 개발
기 여 율	1/1
주관기관	성균관대학교산학협력단
연구기간	2017.12.01 ~ 2018.06.30

명 세 서

청구범위

청구항 1

플라즈마가 없는 상태에서 네트워크 분석기의 제1 포트에 연결된 방사 안테나에 초고주파수의 구동 주파수를 스캔하면서 초고주파를 방사하고, 상기 네트워크 분석기의 제2 포트에 연결된 수신 안테나를 통하여 주파수에 따른 제1 투과 계수를 측정하는 단계;

플라즈마가 있는 상태에서 네트워크 분석기의 제1 포트에 연결된 방사 안테나에 초고주파수의 구동 주파수를 스캔하면서 초고주파를 방사하고, 상기 네트워크 분석기의 제2 포트에 연결된 수신 안테나를 통하여 주파수에 따른 제2 투과 계수를 측정하는 단계; 및

상기 제1 투과 계수과 상기 제2 투과 계수가 일치하는 교차 주파수를 산출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 교차 주파수 플라즈마 진단 방법.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 제2 투과 계수를 측정하는 동안 상기 구동 주파수를 스캔하는 범위는 컷오프 주파수 이하인 것을 특징으로 하는 교차 주파수 플라즈마 진단 방법.

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 교차 주파수($f_{crossing}$)는 전자 밀도 또는 플라즈마 밀도(n_e)와 다음과 같은 조건을 만족하고,

$$f_{crossing} = 0.85 f_{pe} = 0.85 \times 8980 \sqrt{n_e}$$

여기서, f_{pe}는 플라즈마 주파수인 것을 특징으로 하는 교차 주파수 플라즈마 진단 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 플라즈마 진단 방법에 관한 것으로, 더 구체적으로 컷오프 주파수가 아닌 교차 주파수를 이용한 플라즈마 진단 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 반도체, 태양전지, 평면디스플레이 등의 제조 산업에 있어 플라즈마 공정(플라즈마 식각, 증착, 세정 등)은 전체 공정의 30% 정도의 비율을 차지하기 하고 있다. 현재 플라즈마 공정의 중요성이 대두되고 있는 상황이다. 이러한 플라즈마 공정의 효율 및 생산성은 플라즈마의 전자밀도와 밀접한 관련이 있다. 특히 전자밀도는 플라즈마 실시간 공정 모니터링 변수 중 가장 직관적인 변수로 알려져 왔다. 따라서, 과거부터 플라즈마 밀도 진단을 위한 기술이 지속적으로 개발되어져 왔다. 그 중 마이크로파를 이용한 플라즈마 진단 기술은 공정에 적용이 쉽고 해석이 간단한 장점이 있어 많은 연구개발이 이루어져 왔다.

[0003] 마이크로파를 이용한 진단기술은 크게 마이크로파의 반사, 흡수 및 투과도를 측정하는 방법으로 분류된다. 현재까지 활발히 연구되고 있는 마이크로파의 반사도를 측정하는 Multipole Resonance , Hair-pin 과 흡수도를 측정하는 Plasma Absorption , 그리고 투과도를 측정하는 컷오프 이 대표적인 예이다. 이 중 컷오프 은 높은 정밀도와 재현성으로 차세대 플라즈마 실시간 모니터링 진단 장치로써 큰 관심을 받고 있는 상황이다.

[0004] 하지만 기존 컷오프 기술의 경우, 플라즈마 식각과 같은 저압 환경 하에서 진단이 용이하지만, 플라즈마 증착 공정과 같은 압력이 높은 환경 하에서 진단이 어려운 문제가 보고되고 있다. 따라서, 높은 압력 환경 하에 정밀

한 플라즈마 밀도를 모니터링하는 기술이 요구된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 플라즈마 발생 전/후의 초고주파 투과 스펙트럼을 측정하고, 두 스펙트럼이 교차하는 주파수를 측정함으로써 플라즈마 내 전자밀도를 측정하는 교차 주파수 측정 방법을 제공하는 것이다.

[0006] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는, 기존 컷오프 방법으로 압력이 높은 환경에서 플라즈마 밀도 측정의 한계를 극복하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명의 일 실시예에 따른 교차 주파수 플라즈마 진단 방법은, 플라즈마가 없는 상태에서 네트워크 분석기의 제1 포트에 연결된 방사 안테나에 초고주파수의 구동 주파수를 스캔하면서 초고주파를 방사하고, 상기 네트워크 분석기의 제2 포트에 연결된 수신 안테나를 통하여 주파수에 따른 제1 투과 계수를 측정하는 단계; 플라즈마가 있는 상태에서 네트워크 분석기의 제1 포트에 연결된 방사 안테나에 초고주파수의 구동 주파수를 스캔하면서 초고주파를 방사하고, 상기 네트워크 분석기의 제2 포트에 연결된 수신 안테나를 통하여 주파수에 따른 제2 투과 계수를 측정하는 단계; 및 상기 제1 투과 계수과 상기 제2 투과 계수가 일치하는 교차 주파수를 산출하는 단계를 포함한다.

[0008] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제2 투과 계수를 측정하는 동안 상기 구동 주파수를 스캔하는 범위는 컷오프 주파수 이하일 수 있다.

[0009] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 교차 주파수($f_{crossing}$)는 전자 밀도 또는 플라즈마 밀도(n_e)와 다음과 같은 조건을 만족하고,

[0010] $$f_{crossing} = 0.85 f_{pe} = 0.85 \times 8980 \sqrt{n_e}$$

[0011] 여기서, f_{pe}는 플라즈마 주파수일 수 있다.

발명의 효과

[0012] 본 발명은 초고주파 의 진단 시스템을 이용하여 고압 플라즈마를 진단할 수 있다.

[0013] 본 발명의 일 실시예에 따른 교차 주파수 플라즈마 진단 방법은 기존의 컷오프 진단 시스템으로 측정이 어려웠던 고압 플라즈마를 진단할 수 있다.

[0014] 본 발명의 일 실시예에 따른 교차 주파수 플라즈마 진단 방법은 스캔 주파수의 범위가 좁아 기존의 컷오프 진단 방법보다 측정 시간을 감소시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0015] 도 1a 및 도 1b는 본 발명에서 제안하는 플라즈마 진단 방법의 새로운 해석 방법의 원리에 대한 개념도들을 나타낸다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 진단 방법에서 제1 투과 계수의 절대값(S_{21}) 및 제2 투과 계수의 절대값(S_{21})를 나타내는 그래프이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 초고주파 탑침에서 쉬스 두께가 팁 사이에서 차지하는 비율에 따른 교차 주파수의 특성을 나타낸 그래프이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 진단 방법에서 압력에 따른

제1 투과 계수(S_{21}) 및 는 제2 투과 계수(S_{21})를 나타낸다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 진단 방법에서 회로 모델을 이용하여 계산한 컷오프 주파수

(f_{cutoff}) 및 교차 주파수($f_{crossing}$)를 플라즈마 주파수(f_{pe})로 각각 나눈 값(f_{cutoff}/f_{pe},$f_{crossingf}/f_{pe}$)의 변화를 나타낸 그래프이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 진단 방법에서 회로 모델을 이용하여 계산한 컷오프 주파수(f_{cutoff}) 및 교차 주파수($f_{crossing}$)를 플라즈마 주파수(f_{pe})로 각각 나눈 값(f_{cutoff}/f_{pe},$f_{crossingf}/f_{pe}$)의 변화를 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명을 보다 상세하게 설명한다. 이하, 바람직한 실시예를 들어 본 발명을 더욱 상세하게 설명한다. 그러나 이들 실시예는 본 발명을 보다 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 실험 조건, 물질 종류 등에 의하여 본 발명이 제한되거나 한정되지는 않는다는 것은 당업계의 통상의 지식을 가진 자에게 자명할 것이다. 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 제공되는 것이다. 도면들에 있어서, 구성요소는 명확성을 기하기 위하여 과장되어진 것이다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호로 표시된 부분들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.

[0017] 도 1a 및 도 1b는 본 발명에서 제안하는 플라즈마 진단 방법의 새로운 해석 방법의 원리에 대한 개념도들을 나타낸다.

[0018] 도 1a 및 도 1b를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 초고주파를 이용한 교차 주파수 플라즈마 진단 장치(100)는 방사 안테나(112)와 상기 방사 안테나(112)와 이격되어 배치된 수신 안테나(114)를 포함한다. 초고주파(110)은 동축 케이블에 연결된 방사 안테나(112)와 상기 방사 안테나와 인접하게 배치되고 동축 케이블에 연결된 수신 안테나(114)를 포함할 수 있다.

[0019] 상기 방사 안테나(112)는 동축 케이블을 통하여 네트워크 분석기(120)의 제1 포트에 연결되고, 상기 수신 안테나(114)는 동축 케이블을 통하여 상기 네트워크 분석기(120)의 제2 포트에 연결된다. 상기 네트워크 분석기(120)는 구동 주파수를 스캔하면서 제1 포토와 제2 포트 사이의 투과 계수를 측정한다. 스캔 범위는 0 GHz 내지 10 GHz일 수 있다. 상기 방사 안테나(112) 및 상기 수신 안테나는 동일한 구조이고, 일정한 길이를 가진 원통형상일 수 있다.

[0020] 플라즈마가 발생하지 않은 상태에서, 초고주파 (110)의 임피던스(Z_{vac})는 다음과 같은 회로로 모델링될 수 있다.

[0021] [수학식 1]

[0022] $Z_{vac}= 1/(j\ \omega\ C_{vac})$

[0023] 여기서, ω는 네트워크 분석기(120)의 구동 각주파수이고, C_{vac}는 방사 안테나(112)와 수신 안테나(114) 사이의 진공 정전 용량이다.

[0024] 한편, 플라즈마가 발생한 상태에서, 초고주파 (110)의 총 임피던스(Z_t)는 다음과 같은 회로로 모델링될 수 있다.

[0025] [수학식 2]

[0026] $Z_t= Z_p + 2\ Z_{sh}$

[0027] 여기서, Z_{sh}는 방사 안테나 (또는 수신 안테나)와 플라즈마 사이의 플라즈마 쉬스에 의한 쉬스 임피던스이다. Z_p는 상기 방사 안테나와 상기 수신 안테나 사이의 플라즈마에서의 플라즈마 임피던스이다. 상기 플라즈마 임피던스(Zp)는 서로 직렬 연결된 플라즈마 저항(Rp)와 플라즈마 인턱터(L_p), 및 상기 직렬 연결된 플라즈마 저항(R_p)와 플라즈마 인턱터(L_p)에 병렬 연결된 플라즈마 축전기(C_0)로 구성될 수 있다.

[0028] 통상적인 컷오프 주파수 측정 방법은 플라즈마 공진 현상을 기반으로 한다. 플라즈마 자체 공진 현상이란, 플라즈마 공진 각주파수($\omega_R= 1/sqrt(L_p\ C_0)$)에서 플라즈마 임피던스($Z_p$)가 최대값을 가지는 것을 의미한다.

[0029] 따라서 이러한 공진 특성으로 인해 마이크로파의 투과 계수(S_{21})는 공진 주파수에서 최소값을 가진다. 통상적인

컷오프 주파수 측정 방법은 마이크로파 투과 계수(S_{21})에서 최소값을 갖는 주파수(또는 컷오프 주파수, 플라즈마 공진 주파수)를 찾는다. 상기 컷오프 주파수는 플라즈마 밀도만의 함수로 주어진다.

[0030] 하지만, 통상적인 컷오프 주파수 측정 방법은 압력이 높은 환경 하에서 플라즈마 저항(R_p)의 증가에 기인하여 플라즈마 공진 회로의 Q-인자가 작아진다 ($Q \sim 1/\omega R_p C_0$). 이에 따라, 컷오프 주파수를 마이크로파 투과 계수(S_{21})에서 구별해 내기가 어려워진다.

[0031] 통상적인 컷오프 측정법은 총 임피던스(Z_t)의 플라즈마 공진 회로에 기인한 공진 주파수(또는 컷오프 주파수)를 측정한다. 상기 컷오프 주파수(f_{cutoff})는, 플라즈마 공진 회로의 Q-인자가 큰 경우, 플라즈마 주파수(f_{pe})와 실질적으로 일치할 수 있다. 그러나, 통상적인 컷오프 측정법은, 플라즈마 공진 회로의 Q-인자가 작은 경우, 공진 주파수(또는 컷오프 주파수)를 찾을 수 없다. 플라즈마 주파수(f_{pe})는 플라즈마 밀도 또는 전자 밀도에 의하여 주어지는 플라즈마 고유의 주파수이다.

[0032] 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 발명은 교차 주파수를 측정하는 방법을 제안하고자 한다. 여기서 교차 주파수($f_{crossing}$)란 플라즈마 발생 전/후의 마이크로파 투과 계수의 절대값이 일치하는 주파수로 정의한다. 즉, 교차 주파수는 플라즈마가 발생하지 않은 상태에서 초고주파 (110)의 임피던스(Z_{vac})와 플라즈마가 발생한 상태에서 초고주파 (110)의 총 임피던스(Z_t)가 일치하는 조건을 만족하는 주파수를 의미한다.

[0033] 본 발명은 플라즈마 공진 회로에 기인한 공진 주파수(또는 컷오프 주파수) 대신에 별도의 구속 조건을 사용하여 교차 주파수를 측정한다.

[0034] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 진단 방법에서 제1 투과 계수의 절대값(S_{21}) 및 제2 투과 계수의 절대값(S_{21})를 나타내는 그래프이다.

[0035] 초고주파가 제1 포트 및 동축 케이블을 통하여 방사 안테나에 전달된다, 돌출된 방사 안테나는 초고주파를 방사하며, 초고주파는 쉬스-플라즈마를 거쳐 수신 안테나를 통하여 제2 포트로 들어오게 된다. 이 때 입력신호(V_{in}) 대비 출력 신호(V_{out}) 비를 계산하면, 투과 계수를 얻어낼 수 있다, 마이크로파 주파수를 변화시켜가며 측정한다. 제2 포트에는 50 오옴의 부하 저항(R_L)이 연결된다.

[0036] 플라즈마 쉬스는 진공상태의 커패시터로 모델링될 수 있다. 플라즈마 쉬스의 커패시턴스를 C_{sh}라 하면, 쉬스 임피던스(Z_{sh})는 다음과 같이 표현될 수 있다.

[0037] [수학식 3]

[0038] $Z_{sh} = 1/(j\omega C_{sh})$

[0039] 플라즈마는 플라즈마가 차 있는 커패시터로 모델링될 수 있다. 이 때의 커패시턴스를 C_p라 하면, 플라즈마 임피던스 (Z_p)는 다음과 같이 주어진다.

[0040] [수학식 4]

[0041] $Zp = 1/(j\omega C_p)$

[0042] 여기서 플라즈마 임피던스(Z_p)의 경우, 인덕터(L_p)-커패시터(C_o) 공진회로에 깃럴 저항(R_p)가 연결된 형태로 모델링될 수 있다.

[0043] [수학식 5]

[0044] $$Z_p = \frac{1}{i\omega C_p} = \frac{1}{i\omega C_0 + \frac{1}{R_p + i\omega L_p}}$$

[0045] 여기서, C_p는 플라즈마의 커패시턴스,C_o는 플라즈마가 차지하는 공간에서의 진공 커패시턴스, $L_p\left(=\frac{1}{C_0\omega_{pe}^2}\right)$ 는 플

라즈마 전자의 관성에 의한 인덕턴스, 그리고 $R_p(=L_p\nu_m)$ 는 플라즈마 전자의 탄성충돌에 의한 저항, ω_{pe}는 플라즈마 진동의 각주파수, 그리고 ν_m은 전자-중성종 탄성충돌 주파수를 의미한다.

[0046] 각각의 커패시턴스는 $C_{sh}=\frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln((r+s)/r)}$ (동축 케이블 형태의 커패시턴스), $C_0=\frac{\pi\epsilon_0 h}{\cosh^{-1}(d/2(r+s))}$ (두 전선 사이의 커패시턴스)이며, $C_p=\frac{\pi\epsilon_p h}{\cosh^{-1}(d/2(s+r))}$ (쉬스를 포함한 두 전선 사이의 커패시턴스), 여기서 h, t, d, s, ε_0 는 각각 의 길이, 의 반지름, 간의 거리, 쉬스 두께, 진공에서의 유전율, 그리고 $\epsilon_p(=\epsilon_0(1-\frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega-i\nu_m)})$ 는 플라즈마의 유전율을 나타낸다. 이러한 회로에서, 플라즈마가 있을 때의 제2 투과계수(S_{21}^{on})는 dB 단위로, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

[0047] [수학식 6]

[0048] $$S_{21}^{on}(dB)=20\log_{10}(\frac{50}{Z_p+2Z_{sh}+50})$$

[0049] 동일한 방식으로, 플라즈마가 없을 때(플라즈마 발생 전) 방사 안테나와 수신 안테나 사이의 임피던스를 $Z_{vac}(=\frac{1}{j\omega C_{vac}})$ 이라 한다면, 그 때의 제1 투과 계수(S_{21}^{off})는 다음과 같이 주어진다.

[0050] [수학식 7]

[0051] $$S_{21}^{off}(dB)=20\log(\frac{50}{Z_{vacuum}+50})$$

[0052] 여기서, $C_{vac}=\frac{\pi\epsilon_0 h}{\cosh^{-1}(d/2r)}$ 이다.

[0053] 플라즈마 발생 전에는 제1 투과 계수(S_{21}^{off})가 주파수에 따라 대수적으로 증가하고, 플라즈마 발생 후에는 제2 투과 계수(S_{21}^{on})는 주파수에 따라 두 개의 극값을 가지며 전체적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 제2 투과 계수(S_{21}^{on})이 최대값을 갖는 주파수는 Cp-Lp의 직렬-공진으로 해석할 수 있고, 최소값을 갖는 주파수는 Cp-Lp의 병렬-공진으로 해석할 수 있다.

[0054] 제1 투과 계수의 절대값(S_{21}^{off}) 그래프와 제2 투과 계수의 절대값(S_{21}^{on}) 그래프가 교차가되는 지점이 존재한다. 이는 플라즈마가 발생했음에도 불구하고, 플라즈마-쉬스 임피던스간의 작용으로 인해 마치 플라즈마가 존재하지 않는 것처럼 보이는 구간을 의미한다. 이러한 주파수를 교차 주파수(crossing frequency, $f_{crossing}$)라 명명하며, 이 때의 조건은, 제2투과 계수의 절대값(S_{21}^{on})과 제1 투과 계수(S_{21}^{off})의 절대값(S_{21}^{off})이 같을 때 이므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[0055] [수학식 8]

[0056] $$|Z_p+2Z_{sh}|=|Z_{vac}|$$

[0057] 수학식 8로부터 교차 각주파수($\omega_{crossing}$)와 플라즈마 진동 각주파수(ωpe)의 해석적 관계를 얻어내고자 한다. 먼저, 쉬스 임피던스는 주파수에 반비례하는 관계를 가지고 있기 때문에 Lp-Csh의 직렬-공진 주파수 이후에는 $Z_{sh}<<Z_p$ 로 근사할 수 있다. 따라서, 수학식 6은 다음과 같이 표시될 수 있다.

[0058] [수학식 9]

[0059] $$\frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{1}{C_pC_p^*}}=\frac{1}{\omega C_{vac}}$$

[0060] 여기서, Cp*는 Cp의 켤레복소수를 의미한다. 교차 주파수는 압력에 무관하다는 것을 활용하면, $\nu_m\simeq 0$ 으로 근사

할 수 있다.

[0061] α, β 다음과 같이 치환될 수 있다.

[0062] [수학식 10]

[0063] $$\alpha \equiv \omega_{crossing}/\omega_{pe}$$

[0064] $$\beta \equiv acosh(d/2(r+s))/acosh(d/2r)$$

[0065] 수학식 9는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다,

[0066] [수학식 11]

[0067] $$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1+\beta^2}}$$

[0068] 상기 제2 투과 계수를 측정하는 동안 상기 구동 주파수를 스캔 범위는 컷오프 주파수 이하일 수 있다. 이에 따라, 컷오프 주파수보다 스캔 범위를 감소시키어, 측정 시간을 감소시킬 수 있다.

[0069] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 초고주파수 탑침에서 쉬스 두께가 팁 사이에서 차지하는 비율에 따른 교차 주파수의 특성을 회로 모델로 계산한 결과와 수학식 8의 계산 결과를 나타낸 그래프이다.

[0070] 도 3을 참조하면, 점선은 수학식 8의 결과를 나타낸다.산포 데이터를 확인해봤을 때, $f_{crossing}/f_{pe}$ 는 전자밀도에 의존하지 않고, 쉬스 두께에 크게 의존한다. 하지만 수학식 8은 회로 모델 결과 (도 3의 산포 데이터)와 차이가 있는데, 이것은 쉬스 임피던스를 무시한 결과($Z_{sh} << Z_p$)로 인한 차이로 보여진다.

[0071] 하지만, 통상적으로 쉬스 두께를 측정하는 것은 어렵기 때문에, 쉬스 변화를 평균화하게 된다면 측정에 용이하다.

[0072] 따라서, 도 3에서 평균 값, 즉, $f_{crossing} = 0.85 f_{pe}$ 관계를 취하게 되면, 플라즈마 쉬스에 의한 오차 ± 15 % 정도를 감수하고, $f_{pe} = 8980\sqrt{n_e}$ (ne는 cm^{-3} 단위)로부터 전자밀도를 얻어낼 수 있다. 이에 따라, 교차 주파수($f_{crossing}$)는 다음과 같이 주어진다.

[0073] [수학식 12]

[0074] $$f_{crossing} = 0.85 f_{pe} = 0.85 \times 8980\sqrt{n_e}$$

[0075] 여기서, n_e는 cm^{-3} 단위를 갖는 전자밀도이다. 다만, 쉬스 두께의 정보를 무시하기 위하여 평균값을 취했으므로, 쉬스 두께에 의한 오차를 포함할 수 있다. 따라서, 교차 주파수($f_{crossing}$)는 상기 쉬스 임피던스(Zsh)의 근사값의 사용에 기인하여 이론적 오차는 ±15 % 이다. 상기 이론적 오차는 상기 쉬스 임피던스(Z_{sh})의 쉬스 두께에 기인할 수 있다.

[0076] 상기 교차 주파수는 컷오프 주파수(또는 공진 주파수)에 높은 압력에서도 추출될 수 있다. 따라서, 교차 주파수 측정법은 그 응용 범위를 확장할 수 있다.

[0077] 본 발명의 일 실시예에 따른 측정 시스템은 기존 컷오프 의 측정 시스템과 동일하다. 컷오프 의 측정 방법은 플라즈마 자체 공진 현상을 측정하는 것으로 기반으로 한다. 플라즈마 자체 공진 현상이란, $L_p - C_0$ 병렬-공진을 의미하며, 이 공진 주파수를 컷오프 주파수(f_{cutoff})라 한다. 이 때 Zp는 최대가 되며, 따라서, S21은 최소값을 가지게 된다. 기존 연구를 통하여, $f_{cutoff} = f_{pe}$ 를 밝혀 냈다. 이로부터 플라즈마 밀도를 측정하는 방법을 이용해 왔다. 하지만 이러한 방법은 챔버 압력이 높은 환경 하에서 플라즈마 저항(R_p)이 커짐에 따라 공진회로의 Q-인자가 작아진다. 이로부터 공진 밴드 폭이 넓어짐에 따라, 컷오프 공진을 제2 투과 계수의 절대값(S21)에서 구별해 내기가 어려워지는 문제를 야기한다.

[0078] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 진단 방법에서 압력에 따른

[0079] 제1 투과 계수(S_{21}) 및 는 제2 투과 계수(S_{21})를 나타낸다.

[0080] 도 4를 참조하면, 플라즈마 회로 모델(circuit model)은 도 1b에 도시된 회로를 사용하였다. 압력변화에 따른 초고주파 (110)의 제1 투과 계수의 절대값(S_{21}) 및 제2 투과 계수의 절대값(S_{21})이 표시된다.

[0081] 압력(p)이 1.0 Torr이고 플라즈마 밀도가 5 X 10^9 /cm^3 에서 컷오프 주파수 및 교차주파수는 모두 확인할 수 있다. 하지만, 동일한 플라즈마 밀도(5 X 10^9 /cm^3 에)에서 압력(p)이 2.0 Torr로 증가하면, 컷오프 주파수는 제2 투과 계수(S_{21})에서 구분이 불가능하다. 그러나, 교차 주파수($f_{crossing}$)는 추출될 수 있다.

[0082] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 진단 방법에서 회로 모델을 이용하여 계산한 컷오프 주파수(f_{cutoff}) 및 교차 주파수($f_{crossing}$)를 플라즈마 주파수(f_{pe})로 각각 나눈 값(f_{cutoff}/f_{pe},$f_{crossingf}/f_{pe}$)의 변화를 나타낸 그래프이다.

[0083] 도 5를 참조하면, 저밀도 플라즈마 환경(n_e=10^9/cm^3)에서의 컷오프 주파수 특성 및 교차 주파수 특성을 비교한 결과를 나타낸다. 컷오프 주파수(f_{cutoff})는 압력 변화에 따라 그 값이 플라즈마 주파수(f_{pe})에서 미세한 변동을 가진다. 상기 컷오프 주파수(f_{cutoff})와 플라즈마 주파수(f_{pe})의 차이는 압력에 따라 플라즈마를 구성하는 회로의 저항(R_p)이 증가하고 이로 인해 전류가 주로 C_0로 흐름으로써 유효 축전용량이 커짐에 따라 공진 주파수가 감소하는 것으로 해석된다. 한편, 컷오프 주파수(f_{cutoff})는 약 0.7 Torr 영역 이상에서 측정할 수 없다.

[0084] 하지만, 교차 주파수($f_{crossing}$)는 플라즈마를 구성하는 공진 회로의 Q-인자에 의존하지 않기 때문에 압력 변화에 따라 그 값이 일정하다. 교차 주파수($f_{crossing}$)는 압력 변화에 따라 플라즈마 주파수(f_{pe})와 0.85 배 차이를 가지고 일정하다. 또한, 교차 주파수($f_{crossing}$)는 컷오프 주파수(f_{cutoff})보다 훨씬 높은 압력까지 측정할 수 있다.

[0085] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 진단 방법에서 회로 모델을 이용하여 계산한 컷오프 주파수(f_{cutoff}) 및 교차 주파수($f_{crossing}$)를 플라즈마 주파수(f_{pe})로 각각 나눈 값(f_{cutoff}/f_{pe},$f_{crossingf}/f_{pe}$)의 변화를 나타낸 그래프이다.

[0086] 도 6을 참조하면, 고밀도 플라즈마 환경(n_e=10^{12}/cm^3)에서의 컷오프 주파수 특성 및 교차 주파수 특성이 비교된다. 컷오프 주파수(f_{cutoff})는 플라즈마를 구성하는 공진 회로의 Q-인자의 감소에 기인하여 대략 16 Torr 영역 이상에서 측정할 수 없다. 교차 주파수($f_{crossing}$)는 컷오프 주파수보다 훨씬 높은 압력까지 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

[0087] 회로모델 결과, 원리적으로 컷오프 주파수(f_{cutoff})는 전자밀도 측정에 있어 압력 한계를 지니고 있다. 교차 주파수($f_{crossing}$)는 측정에 있어 압력한계를 지니지 않는다. 결과적으로, 회로 모델 계산 결과, 교차 주파수가 다양한 플라즈마 밀도 범위 내에서 컷오프 주파수보다 훨씬 높은 압력 범위까지 측정 가능한 결과를 얻었다.

[0088] 고밀도 플라즈마 환경에서의 측정 주파수 특성을 비교한 결과를 나타내며, 컷오프 주파수는 대략 16 Torr 영역 이상에서 측정할 수 없음을 확인할 수 있다. 이렇게 컷오프 주파수의 측정 압력 한계는 전자밀도와 같이 증가한다. 그 이유는 $R_p = \nu_m L_p = \frac{\nu_m}{C_0 \omega_{pe}^2}$ 에서 알 수 있듯이, 같은 Rp일 때 $\omega_{pe}^2 (\sim n_e)$ 와 ν_m 가 서로 비례하기 때문이다.

[0089] 교차 주파수는 컷오프 주파수보다 훨씬 높은 압력까지 측정할 수 있다. 회로모델 결과, 원리적으로 컷오프 주파수는 전자밀도 측정에 있어 압력 한계를 지니고 있으나, 교차주파수는 측정에 있어 압력한계를 지니지 않는다.

[0090] 결과적으로, 회로 모델 계산 결과, 교차 주파수가 다양한 플라즈마 밀도 범위 내에서 컷오프 주파수보다 훨씬 높은 압력 범위까지 측정 가능한 결과를 얻었다.

[0091] 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

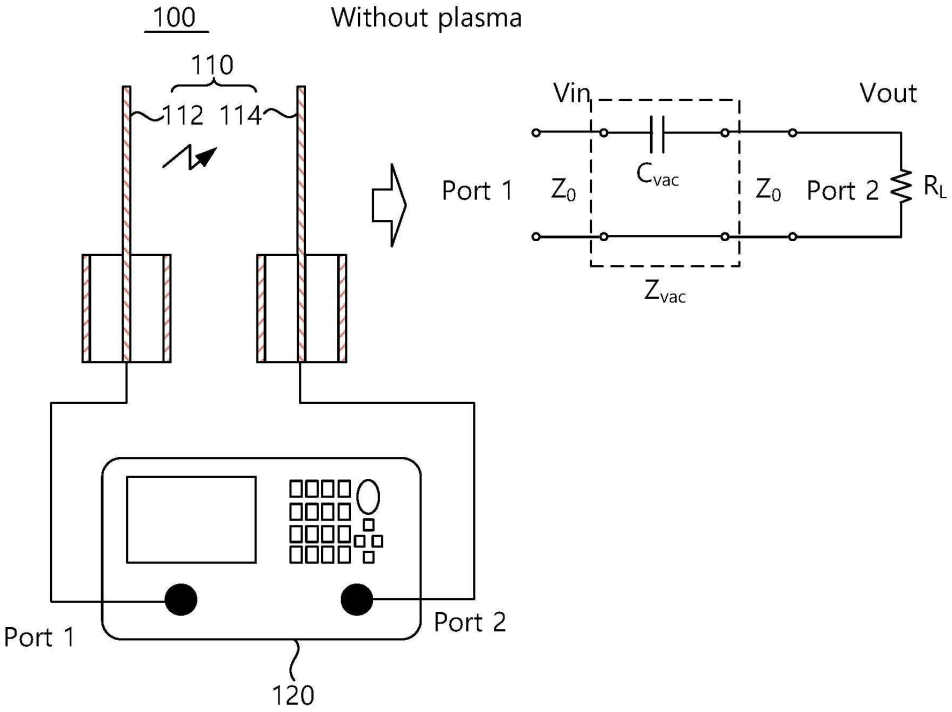
[0092] 110: 초고주파

112: 방사 안테나

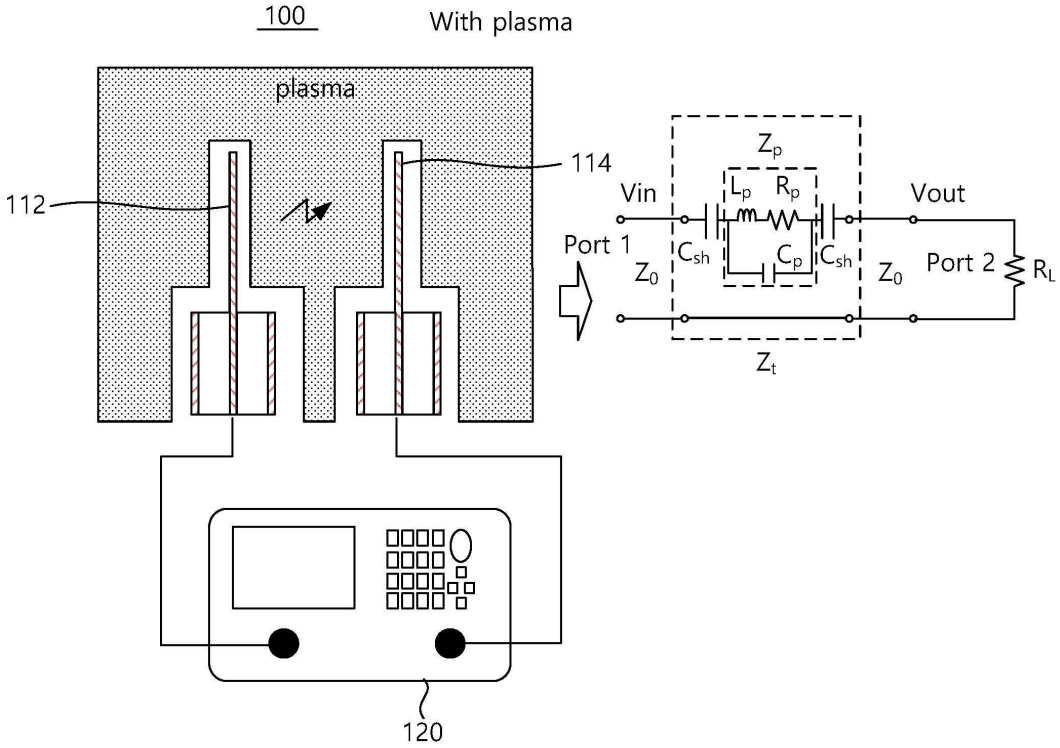
114: 수신 안테나

도면

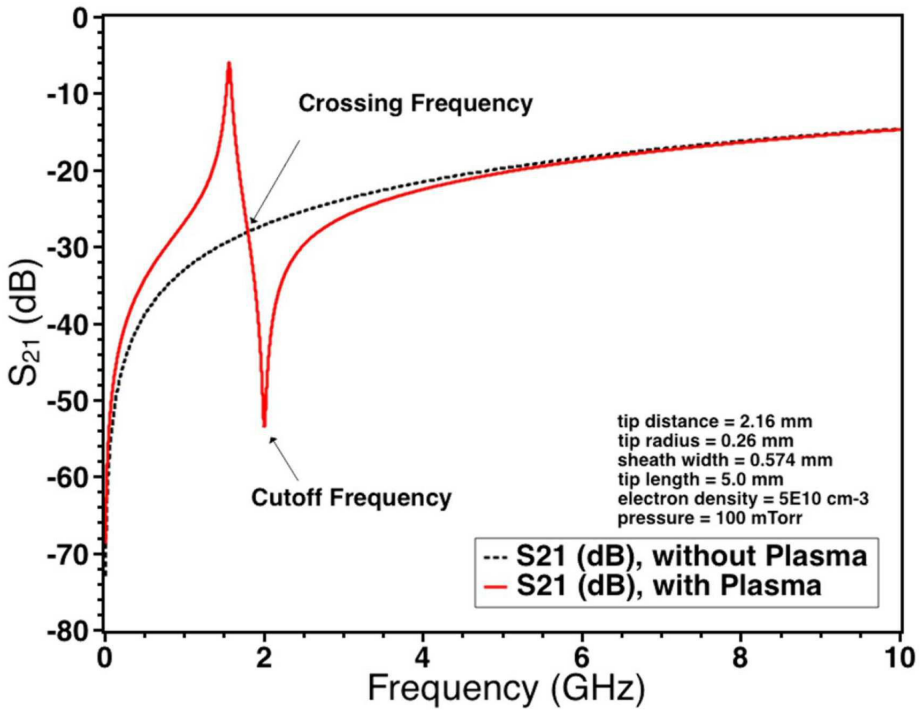
도면1a



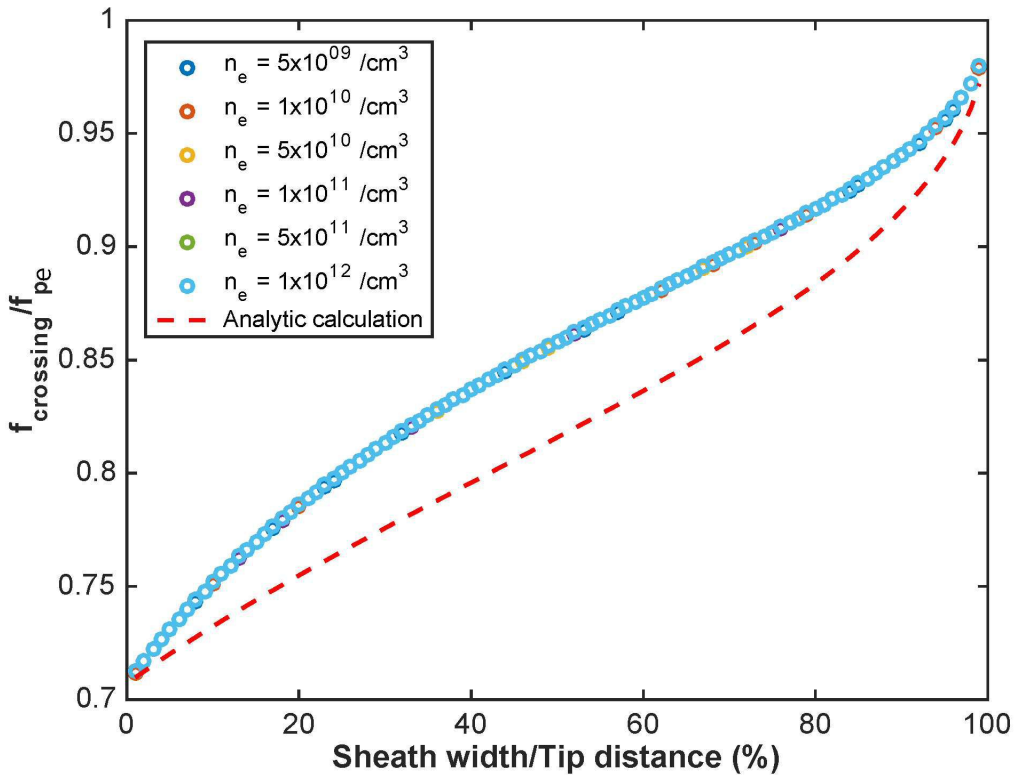
도면1b


100
With plasma
plasma
112
114
120
Vin
Port 1
Z_0
Z_p
L_p
R_p
C_{sh}
C_p
C_{sh}
Z_t
Vout
Z_0
Port 2
R_L

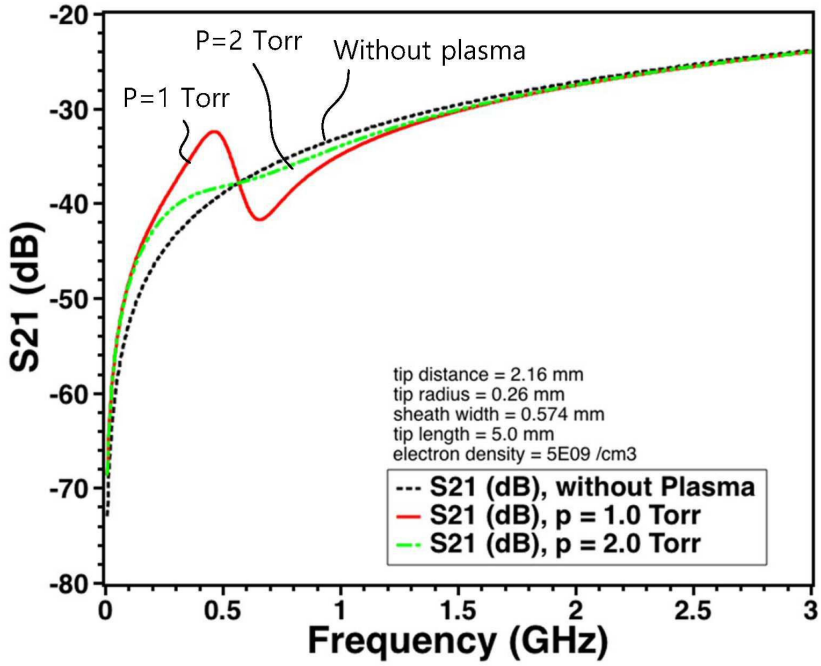
도면2


Crossing Frequency
Cutoff Frequency
tip distance = 2.16 mm
tip radius = 0.26 mm
sheath width = 0.574 mm
tip length = 5.0 mm
electron density = 5E10 cm-3
pressure = 100 mTorr
--- S21 (dB), without Plasma
— S21 (dB), with Plasma
S21 (dB)
Frequency (GHz)
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
-80
0
2
4
6
8
10

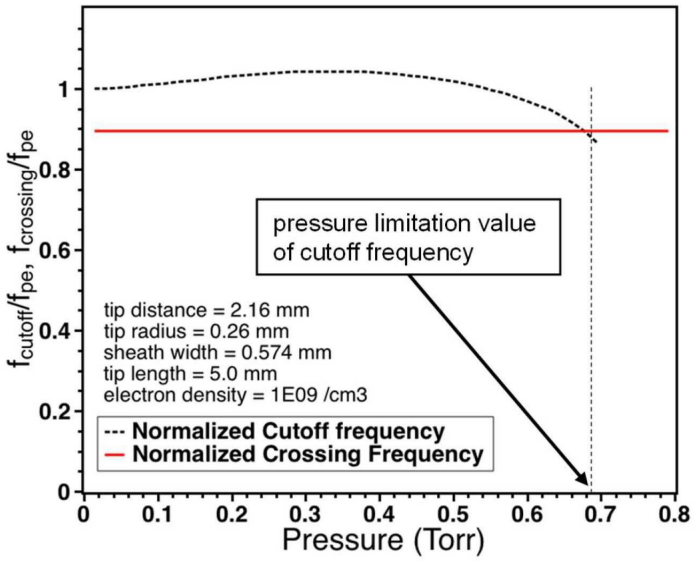
도면3


n_e = 5x10^{09} /cm^3
n_e = 1x10^{10} /cm^3
n_e = 5x10^{10} /cm^3
n_e = 1x10^{11} /cm^3
n_e = 5x10^{11} /cm^3
n_e = 1x10^{12} /cm^3
Analytic calculation
$f_{crossing}/f_{pe}$
Sheath width/Tip distance (%)

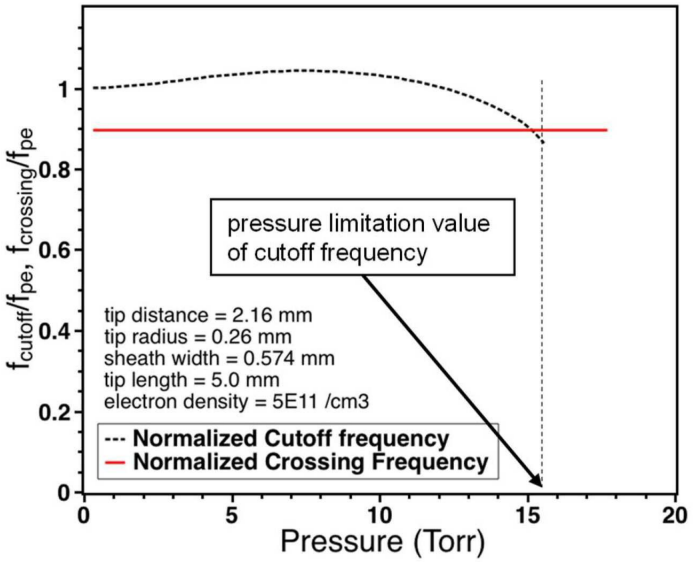
도면4


P=2 Torr
Without plasma
P=1 Torr
tip distance = 2.16 mm
tip radius = 0.26 mm
sheath width = 0.574 mm
tip length = 5.0 mm
electron density = 5E09 /cm3
--- S21 (dB), without Plasma
— S21 (dB), p = 1.0 Torr
-·- S21 (dB), p = 2.0 Torr
S21 (dB)
Frequency (GHz)

도면5


pressure limitation value
of cutoff frequency
tip distance = 2.16 mm
tip radius = 0.26 mm
sheath width = 0.574 mm
tip length = 5.0 mm
electron density = 1E09 /cm3
--- Normalized Cutoff frequency
— Normalized Crossing Frequency
fcutoff/fpe, fcrossing/fpe
Pressure (Torr)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0.1
0.3
0.5
0.7

도면6


pressure limitation value
of cutoff frequency
tip distance = 2.16 mm
tip radius = 0.26 mm
sheath width = 0.574 mm
tip length = 5.0 mm
electron density = 5E11 /cm3
--- Normalized Cutoff frequency
— Normalized Crossing Frequency
fcutoff/fpe, fcrossing/fpe
Pressure (Torr)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
5
10
15
20