(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0156411
(43) 공개일자 2021년12월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
*G01R 27/26* (2006.01) *G01R 27/32* (2006.01)
(52) CPC특허분류
*G01R 27/2623* (2013.01)
*G01R 27/2664* (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0073973
(22) 출원일자 2020년06월18일
심사청구일자 2020년06월18일

(71) 출원인
**울산과학기술원**
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
**최은미**
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
**최홍은**
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
**최원진**
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(74) 대리인
**특허법인 무한**

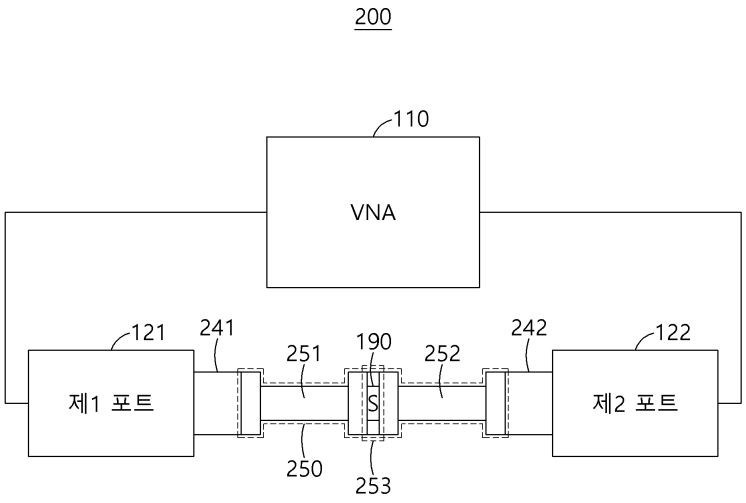
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 **원형 도파관에서의 TE01 모드를 이용한 유전율 측정 방법 및 장치**

## (57) 요 약

일 실시예에 따른 유전율 측정 장치는 구형 도파관(rectangular waveguide)에서의 $TE_{10}$ 모드의 전자파를 원형 도파관(circular waveguide)에서의 $TE_{01}$ 모드의 전자파로 변환하여 유전체 샘플에 투과시키고, 유전체 샘플을 투과한 전자파에 대한 산란 파라미터(scattering parameter)를 측정하며, 측정된 S 파라미터에 기초하여 유전체 샘플의 유전율을 결정할 수 있다.

*대 표 도* - 도2



(52) CPC특허분류
*G01R 27/32* (2013.01)

# 명 세 서

## 청구범위

### 청구항 1

유전율 측정 장치에 있어서,

2 포트 벡터 네트워크 분석기(Vector network analyzer, VNA);

상기 벡터 네트워크 분석기의 제1 포트와 연결되며, 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 제2 도파관 전파 모드의 전자파로 변환하여 원형 도파관 조립체(circular waveguide assembly)로 전달하는 제1 모드 컨버터(mode converter);

상기 제1 모드 컨버터로부터 변환된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 유전체 샘플에 투과시키며, 제2 모드 컨버터로 전달하는 원형 도파관 조립체; 및

상기 원형 도파관 조립체로부터 수신된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 제1 도파관 전파 모드로 변환하고, 상기 벡터 네트워크 분석기의 제2 포트로 전달하는 제2 모드 컨버터;

를 포함하고

상기 벡터 네트워크 분석기는,

상기 유전체 샘플을 투과한 전자파에 대한 산란 파라미터(scattering parameter)를 측정하고, 상기 측정된 산란 파라미터에 기초하여 상기 유전체 샘플의 유전율을 결정하는,

유전율 측정 장치.

### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제1 도파관 전파 모드는 구형 도파관(rectangular waveguide)에 대한 $TE_{10}$ 모드이고, 상기 제2 도파관 전파 모드는 원형 도파관(circular waveguide)에 대한 $TE_{01}$ 모드인,

유전율 측정 장치.

### 청구항 3

제1항에 있어서,

상기 원형 도파관 조립체는,

상기 제1 모드 컨버터로부터 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 수신하며, 상기 유전체 샘플에 전자파를 전달하는 제1 원형 도파관;

내부에 상기 유전체 샘플을 수용 가능한 홀(hole)이 형성된 샘플 홀더(sample holder); 및

상기 유전체 샘플을 투과한 전자파를 수신하는 제2 원형 도파관을 포함하는,

유전율 측정 장치.

### 청구항 4

제3항에 있어서,

상기 샘플 홀더에 삽입된 상기 유전체 샘플의 외면의 일부는 샘플 홀더의 내면의 일부로부터 이격되는,

유전율 측정 장치.

**청구항 5**

제1항에 있어서,

상기 제1 모드 컨버터는,

제1 도파관 전파 모드의 전자파를 동일한 진폭을 가지는 4개의 신호들로 분할하는 전력 분할 섹션(power-dividing section); 및

상기 분할된 4개의 신호들을 병합하여 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 형성하는 모드 변환 섹션(mode-converting section)을 포함하는,

유전율 측정 장치.

**청구항 6**

제1항에 있어서,

상기 유전율 측정 장치는,

미리 정한 주파수 대역에서 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 상기 유전체 샘플에 투과시켜 주파수 변화에 따른 산란 파라미터를 측정하고, 상기 측정된 산란 파라미터로부터 공진주파수를 결정하며, 상기 결정된 공진주파수로부터 상기 유전체 샘플의 유전율을 결정하는,

유전율 측정 장치.

**청구항 7**

제6항에 있어서,

상기 미리 정한 주파수 대역은 75GHz 이상의 주파수 대역인,

유전율 측정 장치.

**청구항 8**

제1항에 있어서,

상기 원형 도파관 조립체는,

제2 도파관 전파 모드의 전자파를 전송하여 상기 원형 도파관 조립체의 표면에서 임계 값 미만의 세기를 갖는 전기장을 형성하는,

유전율 측정 장치.

**청구항 9**

유전율 측정 방법에 있어서,

제1 모드 컨버터가 벡터 네트워크 분석기의 제1 포트와 연결되며, 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 제2 전파 모드의 전자파로 변환하는 단계;

원형 도파관 조립체가 상기 제1 모드 컨버터로부터 변환된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 유전체 샘플에 투

과시키며, 제2 모드 컨버터로 전달하는 단계;

상기 제2 모드 컨버터가 상기 원형 도파관 조립체로부터 수신된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 제1 도파관 전파 모드로 변환하고, 상기 벡터 네트워크 분석기의 제2 포트로 전달하는 단계; 및

상기 벡터 네트워크 분석기가 상기 유전체 샘플을 투과한 전자파에 대한 산란 파라미터를 측정하고, 상기 측정된 산란 파라미터에 기초하여 상기 유전체 샘플의 유전율을 결정하는 단계를 포함하는,

유전율 측정 방법.

## 발명의 설명

### 기 술 분 야

[0001] 이하, 유전율을 측정하는 방법 및 장치에 관한 기술이 제공된다.

### 배 경 기 술

[0002] 종래 유전율 측정 방법은 자유공간측정(free-space measurement) 방식, 공진기(resonant cavity)를 이용한 측정 방식, 공진방식에 기반을 둔 도파관(waveguide) 측정 방법이 존재한다. 최근, 전자파를 이용한 통신, 국방, 자연과학 등 여러 분야에서 고주파의 이용이 증가함에 따라 고주파 대역에서의 물질의 특성에 대한 연구가 활발해지고 있다. 특히, 유전율은 고주파 대역의 장비를 설계할 때 필수 요소이며 각 주파수 대역마다 유전체의 유전율을 정확히 측정해내는 것은 중요한 숙제 중 하나이다. 고주파수 대역의 경우, 저주파수 대역보다 손실이 크고, 측정을 위한 장비들의 크기에 제한이 생기면서 종래 유전율 측정 방법에 의하여는 유전체의 정확한 유전율을 측정하는데 어려움이 있다. 따라서 밀리미터파 대역 이상의 유전율 측정은 이러한 문제점을 해결되어야 정확한 측정이 가능하다.

### 발명의 내용

#### 해결하려는 과제

[0003] 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치는 2 포트 벡터 네트워크 분석기(Vector network analyzer, VNA); 상기 벡터 네트워크 분석기의 제1 포트와 연결되며, 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 제2 도파관 전파 모드의 전자파로 변환하여 원형 도파관 조립체(circular waveguide assembly)로 전달하는 제1 모드 컨버터(mode converter); 상기 제1 모드 컨버터로부터 변환된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 유전체 샘플에 투과시키며, 제2 모드 컨버터로 전달하는 원형 도파관 조립체; 및 상기 원형 도파관 조립체로부터 수신된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 제1 도파관 전파 모드로 변환하고, 상기 벡터 네트워크 분석기의 제2 포트로 전달하는 제2 모드 컨버터를 포함하고, 상기 벡터 네트워크 분석기는, 상기 유전체 샘플을 투과한 전자파에 대한 산란 파라미터를 측정하고, 상기 측정된 산란 파라미터에 기초하여 상기 유전체 샘플의 유전율을 결정할 수 있다.

[0004] 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치는 상기 제1 도파관 전파 모드는 구형 도파관(rectangular waveguide)에 대한 $TE_{10}$ 모드이고, 상기 제2 도파관 전파 모드는 원형 도파관(circular waveguide)에 대한 $TE_{01}$ 모드일 수 있다.

[0005] 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치의 상기 제1 모드 컨버터로부터 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 수신하며, 상기 유전체 샘플에 전자파를 전달하는 제1 원형 도파관; 내부에 상기 유전체 샘플을 수용 가능한 홀(hole)이 형성된 샘플 홀더(sample holder); 및 상기 유전체 샘플을 투과한 전자파를 수신하는 제2 원형 도파관을 포함할 수 있다.

[0006] 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치는 상기 샘플 홀더에 삽입된 상기 유전체 샘플의 외면의 일부는 샘플 홀더의 내면의 일부로부터 이격될 수 있다.

[0007] 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치의 상기 제1 모드 컨버터는, 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 동일한 진폭을 가지는 4개의 신호들로 분할하는 전력 분할 섹션(power-dividing section); 및 상기 분할된 4개의 신호들을 병합하여 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 형성하는 모드 변환 섹션(mode-converting section)을 포함할 수 있다.

[0008] 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치는 미리 정한 주파수 대역에서 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 상기 유전체 샘플에 투과시켜 주파수 변화에 따른 산란 파라미터를 측정하고, 상기 측정된 산란 파라미터로부터 공진주파

수를 결정하며, 상기 결정된 공진주파수로부터 상기 유전체 샘플의 유전율을 결정할 수 있다.

[0009] 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치의 상기 미리 정한 주파수 대역은 75GHz 이상의 주파수 대역일 수 있다.

[0010] 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치의 상기 원형 도파관 조립체는, 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 전송하여 상기 원형 도파관 조립체의 표면에서 임계 값 미만의 세기를 갖는 전기장을 형성할 수 있다.

[0011] 일 실시예에 따른 유전율 측정 방법은 제1 모드 컨버터가 벡터 네트워크 분석기의 제1 포트와 연결되며, 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 제2 전파 모드의 전자파로 변환하는 단계; 원형 도파관 조립체가 상기 제1 모드 컨버터로부터 변환된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 유전체 샘플에 투과시키며, 제2 모드 컨버터로 전달하는 단계; 상기 제2 모드 컨버터가 상기 원형 도파관 조립체로부터 수신된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 제1 도파관 전파 모드로 변환하고, 상기 벡터 네트워크 분석기의 제2 포트로 전달하는 단계; 및 상기 벡터 네트워크 분석기가 상기 유전체 샘플을 투과한 전자파에 대한 산란 파라미터를 측정하고, 상기 측정된 산란 파라미터에 기초하여 상기 유전체 샘플의 유전율을 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

## *발명의 효과*

[0012] 본 발명은 고주파 대역에서 보다 정확한 유전율 측정이 가능한 측정 장비 설계에 대한 것이다. 주파수 대역이 올라갈 수록 측정 장비 및 부품, 샘플 크기가 작아지면서 정밀 측정에 어려움이 생긴다. 본 발명을 이용하여 기존 방식의 어려움을 해결하며 고주파대역에서도 정확한 유전율을 측정해낼 수 있다.

## *도면의 간단한 설명*

[0013] 도 1 및 도 2는 일 실시예에 따른 2 포트 벡터 네트워크 분석기를 이용하여 유전체 샘플의 유전율을 결정하는 유전율 측정 장치를 도시한다.

도 3은 일 실시예에 따른 모드 컨버터(mode converter)의 세부적인 형상을 도시한다.

도 4는 일 실시예에 따른 원형 도파관 조립체 내부에 유전체 샘플이 삽입된 유전율 측정 장치의 일부를 도시한다.

도 5a 내지 도 5c는 일 실시예에 따른 샘플 홀더의 형태를 도시한다.

도 6은 일 실시예에 따른 모드 컨버터의 입력 포트 및 모드 컨버터의 출력 포트 주위에서의 전기장 패턴(electric field pattern)을 도시한다.

도 7은 일 실시예에 따른 제1 도파관 전파 모드의 전자파 및 제2 도파관 전파 모드의 전자파에 의한 전기장 패턴을 도시한다.

도 8은 샘플 홀더 내부에 삽입되는 유전체 샘플의 형태를 도시한다.

도 9 내지 도 12은 유전체 샘플의 변형 정도에 따른 전자파에 대한 주파수 응답 특성을 도시한다.

## *발명을 실시하기 위한 구체적인 내용*

[0014] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 실시예들을 상세하게 설명한다. 그러나, 실시예들에는 다양한 변경이 가해질 수 있어서 특허출원의 권리 범위가 이러한 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 실시예들에 대한 모든 변경, 균등물 내지 대체물이 권리 범위에 포함되는 것으로 이해되어야 한다.

[0015] 실시예에서 사용한 용어는 단지 설명을 목적으로 사용된 것으로, 한정하려는 의도로 해석되어서는 안된다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0016] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 실시예가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0017] 또한, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면 부호에 관계없이 동일한 구성 요소는 동일한 참조부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 실시예를 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 실시예의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.

[0018] 또한, 실시 예의 구성 요소를 설명하는 데 있어서, 제 1, 제 2, A, B, (a), (b) 등의 용어를 사용할 수 있다. 이러한 용어는 그 구성 요소를 다른 구성 요소와 구별하기 위한 것일 뿐, 그 용어에 의해 해당 구성 요소의 본질이나 차례 또는 순서 등이 한정되지 않는다. 어떤 구성 요소가 다른 구성요소에 "연결", "결합" 또는 "접속" 된다고 기재된 경우, 그 구성 요소는 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되거나 접속될 수 있지만, 각 구성 요소 사이에 또 다른 구성 요소가 "연결", "결합" 또는 "접속"될 수도 있다고 이해되어야 할 것이다.

[0019] 어느 하나의 실시 예에 포함된 구성요소와, 공통적인 기능을 포함하는 구성요소는, 다른 실시 예에서 동일한 명칭을 사용하여 설명하기로 한다. 반대되는 기재가 없는 이상, 어느 하나의 실시 예에 기재한 설명은 다른 실시 예에도 적용될 수 있으며, 중복되는 범위에서 구체적인 설명은 생략하기로 한다.

[0020] 도 1 및 도 2는 일 실시예에 따른 2 포트 벡터 네트워크 분석기를 이용하여 유전체 샘플의 유전율을 결정하는 유전율 측정 장치를 도시한다.

[0021] 도 1은 구형 도파관(rectangular waveguide)으로부터 수신된 $TE_{10}$ 모드의 전자파를 이용하여 유전체 샘플의 유전율을 결정하는 유전율 측정 장치를 도시한다. 도 1에 도시된 2 포트 벡터 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer, VNA)(110)는 주파수 발생원(frequency source) 및 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer)를 포함할 수 있다. 2 포트 벡터 네트워크 분석기는 주파수 발생원으로부터 발생된 전자파를 전송하고, 입력과 출력의 주파수 신호 분포 결과를 측정하여 산란 파라미터(scattering parameter)(이하, S 파라미터)를 측정할 수 있다.

[0022] 도 1은 구형 도파관을 이용한 유전율 측정 장치를 도시한다. 유전율 측정 장치(100)의 2 포트 벡터 네트워크 분석기(110)는 구형 도파관(130)과 연결될 수 있다. 구형 도파관(130)은 벡터 네트워크 분석기의 제1 포트(121) 및 벡터 네트워크 분석기의 제2 포트(122)와 연결될 수 있다. 구형 도파관(130) 사이에 유전체 샘플(190)이 삽입될 수 있다. 예를 들어, 유전체 샘플(190)은 사각 기둥 형태를 가질 수 있다. 구형 도파관(130)은 구형 도파관(130) 내부에 삽입되는 유전체 샘플(190)에 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 전달할 수 있다. 제1 도파관 전파 모드는 $TE_{10}$ 모드일 수 있다. 벡터 네트워크 분석기(110)는 유전체 샘플(190)을 투과한 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 벡터 네트워크 분석기의 제2 포트(122)를 통하여 수신할 수 있다. 벡터 네트워크 분석기(110)는 수신된 전자파를 분석하여, 유전체 샘플(190)에 대한 S 파라미터(S-parameter)를 측정하고, 측정된 S 파라미터에 기초하여 유전체 샘플(190)의 유전율을 결정할 수 있다.

[0023] 참고로, 벡터 네트워크 분석기(110)를 이용한 유전율 결정 방법은 다음과 같다. 예를 들어, 유전체 샘플의 유전율은 맥스웰 방정식(Maxwell's equation)과 경계 조건들(boundary conditions)으로부터 도출된 투과 곡선(transmission curve)의 형태로부터 결정할 수 있다. 예를 들어, 투과 계수(transmission coefficient) T는 아래의 수학식과 같이 나타낼 수 있다.

*수학식 1*

[0024]
$$T = \frac{4}{4 + \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} - \frac{\beta_1}{\beta_2}\right)^2 \sin^2(\beta_2 d)}.$$

[0025] d는 유전체 샘플의 두께(thickness), $\beta_1$은 자유 공간(air)에서의 전파 상수, $\beta_2$는 유전체(dielectric material)의 전파 상수(propagation constant)를 나타낼 수 있다. 유전체 샘플에서 전파 상수 $\beta_1$ 및 $\beta_2$는 아래의 수학식 2와 같이 나타낼 수 있다.

*수학식 2*

[0026]
$$\beta_1 = \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - k_c^2}$$

*수학식 3*

[0027]
$$\beta_2 = \sqrt{\varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - k_c^2}.$$

[0028] c는 진공에서의 빛의 속도, f는 전자파의 주파수, $k_c$는 도파관에서의 차단 파수(cut-off wavenumber), 및 $\epsilon_r$은 유전체 샘플의 비유전율을 나타낼 수 있다.

[0029] 수학식 1을 참조하면, 유전체 샘플의 유전율은 투과를 최대화하는 공진 주파수(resonant frequency)와 함수관계를 가질 수 있다. 따라서, 주파수에 따른 투과 곡선으로부터 유전체의 유전율이 결정될 수 있다.

[0030] 도 2는 원형 도파관(circular waveguide)을 따라 전파하는 $TE_{01}$ 모드의 전자파를 이용하여 유전체 샘플의 유전율을 결정하는 유전율 측정 장치를 도시한다.

[0031] 유전율 측정 장치(200)는 2 포트 벡터 네트워크 분석기(110), 모드 컨버터들(241, 242), 및 원형 도파관 조립체(circular waveguide assembly)(250)를 포함할 수 있다.

[0032] 원형 도파관 조립체(250)는 제1 원형 도파관(251), 샘플 홀더(253), 및 제2 원형 도파관(252)를 포함할 수 있다.

[0033] 유전율 측정 장치(200)의 2 포트 벡터 네트워크 분석기(110)는 모드 컨버터들(mode converters)(241, 242)과 연결될 수 있다. 제1 모드 컨버터(241)는 벡터 네트워크 분석기의 제1 포트(121) 및 원형 도파관 조립체의 제1 원형 도파관(251) 사이에 연결될 수 있다. 제1 모드 컨버터(241)는 구형 도파관으로부터 수신된 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 제2 도파관 전파 모드의 전자파로 변환하여 제1 원형 도파관(251)으로 전달할 수 있다.

[0034] 참고로, 제1 도파관 전파 모드는 제1 축 방향(예를 들어, 구형 도파관의 장축 방향)으로 전기장 피크가 1개인 모드 차수(mode index)의 횡방향 전계(TE, Transverse Electric field) 모드를 나타낼 수 있다. 제1 도파관 전파 모드의 모드 차수는 '10'이고, $TE_{10}$ 모드라고도 나타낼 수 있다. 제2 도파관 전파 모드는 원형 도파관(circular waveguide)에 대해 상기 제1 축 방향에 수직한 제2 축 방향으로 전기장 피크가 1개인 모드 차수의 횡방향 전계 모드를 나타낼 수 있다. 제2 도파관 전파 모드의 모드 차수는 '01'이고, $TE_{01}$ 모드라고도 나타낼 수 있다.

[0035] 제1 원형 도파관(251)은 제1 원형 도파관(251) 및 제2 원형 도파관(252) 사이의 샘플 홀더(253)에 삽입되는 유전체 샘플(190)에 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 전달할 수 있다. 유전체 샘플(190)은 샘플 홀더(253)의 내부에 형성된 홀에 삽입될 수 있으며, 샘플 홀더(253)에 관련한 내용은 후술한다.

[0036] 제2 원형 도파관(252)은 유전체 샘플(190)을 투과한 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 수신할 수 있다. 제2 모드 컨버터(242)는 제2 원형 도파관(252)에서 수신된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 제1 도파관 전파 모드로 변환하고, 벡터 네트워크 분석기의 제2 포트(122)로 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 전달할 수 있다.

[0037] 벡터 네트워크 분석기(110)는 제2 모드 컨버터(242)로부터 전송되는 유전체 샘플을 투과한 전자파에 대한 S 파라미터(S-parameter)를 측정하고, 측정된 S 파라미터에 기초하여 유전체 샘플의 유전율을 결정할 수 있다.

[0038] 도 3은 일 실시예에 따른 모드 컨버터(mode converter)의 세부적인 형상을 도시한다.

[0039] 모드 컨버터(300)는, 예시적으로 도 2에 도시된 제1 모드 컨버터(241)로서, 구형 도파관에서 전파되는 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 원형 도파관에서 전송되는 제2 도파관 전파 모드의 전자파로 변환할 수 있다. 제1 도파관 전파 모드는 $TE_{10}$ 모드를 나타낼 수 있으며, 제2 도파관 전파 모드는 $TE_{01}$ 모드를 나타낼 수 있다.

[0040] 모드 컨버터(300)는 입력 포트(320), 전력 분할 섹션(power-dividing section)(330), 모드 변환 섹션(mode-converting section)(340), 및 출력 포트(360)를 포함할 수 있다. 입력 포트(320)로 전자파가 주입될 수 있다. 전력 분할 섹션(330)은 구형 도파관 내의 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 동일한 진폭(amplitude)을 가지는 4개의 신호들로 분할할 수 있다. 모드 변환 섹션(340)은 분할된 4개의 신호들을 원형 도파관으로 유도하여 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 형성할 수 있다. 출력 포트(360)는 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 방출할 수 있다.

[0041] 전력 분할 섹션(330)은 Y형 전력 분할기들(Y-shaped power dividers)을 포함할 수 있다. 제1 Y형 전력 분할기(351)는 모드 컨버터의 입력 포트(320)로 주입되는 전자파를 동일한 진폭을 가지는 2개의 신호로 분할할 수 있다. 제2 Y형 전력 분할기(352) 및 제3 Y형 전력 분할기(353)는 제1 Y형 전력 분할기(351)에 의하여 분할된 2개의 신호를 각각 동일한 진폭을 가지는 2개의 신호로 분할할 수 있다. 결국, 모드 컨버터의 전력 분할 섹션(330)은 구형 도파관 내의 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 동일한 진폭을 가지는 4개의 신호들로 분할할 수 있다. 모드 컨버터의 전력 분할 섹션(330)에 의하여 분할된 4개의 전자파 신호들은 전계 강도(field strength)는 동일하나, 전기장의 방향은 서로 인접한 전자파 신호들 사이에서 90도만큼 차이가 발생할 수 있다.

[0042] 모드 변환 섹션(340)은 모드 컨버터의 전력 분할 섹션(330)에 의하여 분할된 4개의 전자파 신호들을 모드 컨버터의 원형 도파관으로 유도하여 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 형성할 수 있다. 즉, 모드 컨버터의 모드 변환 섹션(340)은 전력 분할 섹션(330)에 의해 분할된 4개의 전자파 신호를 원형 도파관의 둘레를 따라 측벽 결합(sidewall coupling)을 형성함으로써, 원형 도파관 내의 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 발생시킬 수 있다. 모드 변환 섹션(340)은 분할된 4개의 전자파의 신호들을 병합하여 제2 도파관 모드의 전자파를 형성할 수 있다. 예시적으로, 4개의 전자파 신호로 분할되어 재결합이 형성되는 모드 컨버터 내부의 원형 도파관의 직경은 4.5㎜로 구현될 수 있다.

[0043] 모드 변환 섹션(340)은 변환된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 모드 컨버터의 출력 포트(360)로 전송할 수 있고, 모드 컨버터는 출력 포트(360)에서 전자파를 방출할 수 있다. 도 2에 도시된 제2 모드 컨버터(242)는 도 3에 상술된 동작을 역순으로 수행할 수 있다.

[0044] 도 4는 일 실시예에 따른 원형 도파관 조립체 내부에 유전체 샘플이 삽입된 유전율 측정 장치의 일부를 도시한다.

[0045] 제1 모드 컨버터(441)의 입력 포트(421)는 벡터 네트워크 분석기의 제1 포트와 연결될 수 있고, 제1 모드 컨버터의 출력 포트(461)는 원형 도파관 조립체의 제1 원형 도파관(451)과 연결될 수 있다. 제2 모드 컨버터(442)의 입력 포트(422)는 벡터 네트워크 분석기의 제2 포트와 연결될 수 있고, 제2 모드 컨버터의 출력 포트(462)는 원형 도파관 조립체의 제2 원형 도파관(452)과 연결될 수 있다. 제1 모드 컨버터(441)는 제1 모드 컨버터의 입력 포트(421)로 입력되는 전자파를 제2 도파관 전파 모드로 변환하고, 제2 모드 컨버터(442)는 수신된 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 제1 도파관 전파 모드의 전자파로 변환할 수 있다. 제2 모드 컨버터(422)는 제2 모드 컨버터(422)의 출력 포트(422)로 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 출력할 수 있다.

[0046] 유전체 샘플(490)은 제1 원형 도파관(451) 및 제2 원형 도파관(452) 사이의 샘플 홀더(453) 내에 삽입될(inserted) 수 있다. 샘플 홀더에 유전체 샘플을 삽입함에 따라 유전체 샘플을 원형 도파관 조립체 내부에 고정시킬 수 있으며, 유전체 샘플(490)이 원형 도파관 조립체(450) 내부에서 이동하거나 비틀어지는 것을 방지할 수 있다. 이때, 캡톤 테이프(kapton tape)가 샘플 홀더(453)에 유전체 샘플(490)을 고정하는데 사용될 수 있으며, 캡톤 테이프는 전자파에 대한 투과율이 매우 높을 수 있다. 예를 들어, 캡톤 테이프는 W 밴드 대역(예를 들어, 75GHz 내지 110GHz)에서 투과율이 0.2dB로서, 유전체 샘플을 투과하는 전자파에 거의 영향을 주지 않을 수 있다. 캡톤 테이프를 사용하여 유전체 샘플(490)을 샘플 홀더(453) 내부에 배치시킬 수 있으며, 샘플 홀더(453)와 제1 원형 도파관(451) 및 제2 원형 도파관(452)이 각각 맞닿는 지점에서 TRL(thru-refl-line) 교정이 이루어질 수 있다.

[0047] 유전체 샘플(490)은 샘플 홀더(453)의 내부 홀(hole)에 삽입될 수 있다. 샘플 홀더의 내부 홀(hole)은 원기둥의 형태를 가질 수 있으며, 홀의 직경은 원형 도파관들(451, 452)의 직경과 임계 이하의 직경 차이를 가지거나 동일할 수 있다. 유전체 샘플(490)의 직경은 샘플 홀더(453)의 내부 홀의 직경보다 작은 직경을 가질 수 있다.

따라서, 유전체 샘플은 샘플 홀더(490)의 내부 홀에 완전히 피팅되지 않을 수 있다. 유전체 샘플의 외면은 샘플 홀더의 내부 홀의 표면과 일치하지 않을 수 있다. 다시 말해, 샘플 홀더(490)에 삽입된 유전체 샘플의 외면의 일부는 샘플 홀더의 내면으로부터 이격될 수 있다. 즉, 샘플 홀더의 내면 및 유전체 샘플의 외면 사이에 에어 갭(air gap)이 발생할 수 있다. 에어 갭(air gap)과 관련하여서는 도 5a 내지 도 5c에서 후술한다.

[0048] 도 5a 내지 도 5c는 일 실시예에 따른 샘플 홀더의 형태를 도시한다.

[0049] 도 5a는 유전체가 삽입되지 않은 샘플 홀더의 형태를 도시한다. 샘플 홀더(553)의 내부에 홀(554)이 형성될 수 있다. 샘플 홀더(553) 내부에 형성된 홀(554)에 있어서, 원형 도파관의 길이 방향 축에 대해 수직하는 단면은 원형일 수 있다. 샘플 홀더(553)의 내부 홀(554)의 직경은 원형 도파관의 직경과 동일하거나 원형 도파관의 직경에 대해 임계 차이 미만의 직경 차이를 가질 수 있다.

[0050] 도 5b는 유전체 샘플이 삽입된 샘플 홀더(553)의 형태를 도시한다. 도 5b는 유전체가 삽입된 샘플 홀더의 정면도(front view)를 나타낼 수 있다. 샘플 홀더(553) 내부에 유전체 샘플(591)이 삽입될 수 있다. 도 5b에 도시된 바와 같이, 유전체 샘플(591)의 직경은, 가공 및 공정 상의 오차로 인하여, 샘플 홀더(553)의 내부 홀의 직경과 완전히 일치하지 않을 수 있다. 유전체 샘플(591) 및 샘플 홀더(553)의 내면 사이에 에어 갭(air gap)(571)이 형성될 수 있다. 다시 말해, 유전체 샘플(591)의 외면의 일부 및 샘플 홀더(553)의 내면의 일부가 서로 이격된 채로, 유전체 샘플(591)이 샘플 홀더(553)의 내부 홀에 삽입될 수 있다. 예시적으로, 에어 갭(571)은 유전체 샘플과 샘플 홀더(553)의 내면 사이의 공간을 나타낼 수 있다. 에어 갭(571)의 형태는 도 5b에서 도시된 것에 한정하지 않으며, 임의의 형태를 가질 수 있다.

[0051] 도 5c는 다른 예시적인 형태의 유전체 샘플(592)이 삽입된 샘플 홀더(553)의 형태를 도시한다. 도 5c는 유전체 샘플(592)이 삽입된 샘플 홀더(553)의 사시도(perspective view)를 나타낼 수 있다. 샘플 홀더(553) 내부에 유전체 샘플(592)이 삽입될 수 있다. 예를 들어, 유전체 샘플(592)은 원기둥의 일부가 절단된 형태를 가질 수 있으나, 이에 한정하지 않는다. 유전체 샘플(592)의 외면의 일부는 샘플 홀더(553)의 내면의 일부로부터 이격되어, 유전체 샘플(592)이 샘플 홀더(553)의 내부 홀에 삽입될 수 있다.

[0052] 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치는, 다양한 요인으로 인한 에어 갭에도 불구하고, $TE_{01}$ 모드를 이용함으로써 유전체 샘플(591, 592)에 대해 정확한 유전율을 측정할 수 있다.

[0053] 도 6은 일 실시예에 따른 모드 컨버터의 입력 포트 및 모드 컨버터의 출력 포트 주위에서의 전기장 패턴(electric field pattern)을 도시한다.

[0054] 도 6에서는 모드 컨버터의 2차원적 형상 및 모드 컨버터 내부의 전기장 패턴을 도시한다. 제1 전기장 패턴(610)은 전자파가 입력되는 모드 컨버터의 입력 포트에서의 전기장 패턴을 나타낼 수 있다. 예를 들어, 제1 전기장 패턴(610)은 제1 도파관 전파 모드의 전자파에 의하여 구형 도파관 내부에서 생성되는 전기장 패턴을 나타낼 수 있다. 또한, 제2 전기장 패턴(620)은 전자파가 출력되는 모드 컨버터의 출력 포트에서의 전기장 패턴을 나타낼 수 있다. 제2 전기장 패턴(620)은 제2 도파관 전파 모드의 전자파에 의하여 원형 도파관 내부에서 생성되는 전기장 패턴을 나타낼 수 있다. 전기장의 세기(intensity)에 대하여는 도 7에서 후술한다.

[0055] 도 7은 일 실시예에 따른 제1 도파관 전파 모드의 전자파 및 제2 도파관 전파 모드의 전자파에 의한 전기장 패턴을 도시한다.

[0056] 제1 전기장 패턴(710)은 구형 도파관(711)에서 전송되는 제1 도파관 전파 모드의 전자파에 의하여 형성되는 전기장 패턴을 나타낼 수 있다. 구형 도파관(711)에서 전송되는 제1 도파관 전파 모드의 전자파는 구형 도파관(711)의 중심에서 임계 값 이상의 전기장의 세기를 나타낼 수 있고, 구형 도파관(711)의 우측 표면 및 좌측 표면에서는 0에 가까운 전기장의 세기를 나타낼 수 있다. 구형 도파관(711)의 우측 표면 및 좌측 표면에서 전기장의 세기는 임계 값 미만으로 나타날 수 있다. 다시 말해, 구형 도파관에서 전송되는 제1 도파관 전파 모드의 전자파에 의하여 생성되는 전기장의 세기는 중심에서 좌측 또는 우측을 향하여 점진적으로 감소할 수 있다.

[0057] 한편, 구형 도파관(711)의 상부측 표면 및 하부측 표면의 일부에서는 전기장의 세기가 임계 값 이상을 나타낼 수 있다. 구형 도파관(711)의 상부측 표면의 중심 및 하부측 표면의 중심에서 강한 세기의 전기장이 형성될 수 있다. 따라서, 구형 도파관(711)에서 전송되는 제1 도파관 전파 모드의 전자파는 구형 도파관의 모든 방향의 표면에 대하여 전기장의 세기를 임계 값 미만으로 형성할 수 없다.

[0058] 제2 전기장 패턴(720)은 원형 도파관(721)에서 전송되는 제2 도파관 전파 모드의 전자파에 의하여 형성되는 전기장 패턴을 나타낼 수 있다. 원형 도파관(721)에서 전송되는 제2 도파관 전파 모드의 전자파는 원형 도파관

(721)의 모든 방향의 표면에 대하여 전기장의 세기를 임계 값 미만으로 형성할 수 있다. 막대 그래프(630)는 밝기에 따른 전기장의 세기를 나타내며, 단위는 dB이다.

[0059] 만약, 구형 도파관 내에서 제1 도파관 전파 모드의 전자파가 전송된다면, 구형 도파관 표면에서 전기장의 세기는 임계 값 이상을 나타낼 수 있다. 구형 도파관 표면에서 임계 값 이상의 세기를 갖는 전기장이 형성되는 경우, 유전체 샘플과 샘플 홀더의 내부 홀 사이의 에어 갭(air gap)에 의하여 고주파 대역에서 공진 신호가 방해될 수 있다. 미리 정한 주파수 대역에서 제1 도파관 전파 모드의 전자파를 유전체 샘플에 투과시키는 경우, 공진 신호가 방해되어 공진 주파수에 대한 정확한 측정이 불가능하며, 유전체 샘플의 유전율이 측정될 수 없다.

[0060] 구형 도파관에서 제1 도파관 전파 모드를 사용하는 전송 방법은 저주파수 대역에서는 에어 갭에 의한 영향이 적어 유전율을 측정하는 데에 어려움이 없을 수 있다. 그러나, 제1 도파관 전파 모드를 사용하는 전송 방법은 고주파수의 W 밴드 대역(예를 들어, 75GHz 내지 110GHz)에서는 에어 갭의 영향이 크게 나타나 전송에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 주파수 대역이 증가함에 따라 측정 장비의 크기가 감소하므로 유전체 샘플과 샘플 홀더의 내면 사이의 에어 갭에 의하여 공진 신호가 방해되며, 유전체 샘플의 유전율이 정확히 측정되기 어려울 수 있다.

[0061] 반면 원형 도파관 내에서 제2 도파관 전파 모드의 전자파가 전송될 경우, 원형 도파관의 모든 방향의 표면에서 전기장의 세기는 임계 값 미만을 나타낼 수 있다. 즉, 원형 도파관 조립체는, 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 전송하는 동안, 원형 도파관 조립체의 표면에서 임계 값 미만의 세기를 갖는 전기장을 형성할 수 있다. 원형 도파관 조립체의 원형 도파관들의 표면에서 임계 값 미만의 세기를 갖는 전기장이 형성되는 경우, 유전체 샘플과 샘플 홀더의 내부 홀 사이에 에어 갭을 가지더라도 공진 신호가 방해되지 않을 수 있다. 미리 정한 주파수 대역에서 제2 도파관 전파 모드의 전자파가 유전체 샘플에 투과되는 경우, 유전체 샘플과 도파관 사이에 에어 갭이 존재하더라도 공진 신호가 방해되지 않을 수 있다. 따라서, 유전율 측정 장치는 미리 정한 주파수 대역에서 제2 도파관 전파 모드의 전자파를 이용하여 공진 신호를 측정하고, 공진 신호를 이용하여 유전체 샘플의 유전율을 측정할 수 있다. 미리 정한 주파수 대역은 10GHz 이상의 주파수 대역을 나타낼 수 있으나 이로 한정하지는 않는다. 특히, 미리 정한 주파수 대역은 75GHz 이상의 고주파수 대역 또는 W 밴드 대역(예를 들어, 75GHz 내지 110GHz)을 나타낼 수도 있다.

[0062] 더 나아가, 일 실시예에 따른 $TE_{01}$ 모드의 전자파를 사용하는 유전율 측정 장치는, 모드 컨버터의 원형 도파관에 대응하는 출력 포트의 크기를 기본 모드의 $TE_{10}$ 모드의 전자파를 사용하는 구형 도파관의 크기보다 크게 조정할 수 있다. 테이퍼(taper) 부품을 이용하여 샘플 홀더에 삽입되는 유전체 샘플의 크기를 조정할 수 있다. 예를 들어, 그러나 한정되지 않게, W 밴드 대역(예를 들어, 75GHz 내지 110GHz)에서 $TE_{10}$ 모드를 사용하는 구형 도파관의 크기는 1.27mm * 2.54mm일수 있으나, 모드 변환기를 통하여 변환된 $TE_{01}$ 모드를 사용하는 원형 도파관의 크기는 지름이 4.5mm로서 원형 도파관 조립체 내부로 삽입되는 유전체 샘플의 크기를 조정할 수 있다.

[0063] 도 8은 원형 도파관 사이에 삽입되는 유전체 샘플의 형태를 도시한다.

[0064] 유전체 샘플은 사각기둥형, 원통형 또는 구형의 형태를 가질 수 있다. 도 8에서는 유전체 샘플의 정면도를 도시한다. 미리 정한 높이 또는 직경을 가지는 유전체 샘플이 원형 도파관들 사이의 샘플 홀더 내부에 삽입될 수 있다. 유전체 샘플과 샘플 홀더의 내면 사이에 에어 갭(air gap)이 형성될 수 있다.

[0065] 예시적으로 유전체 샘플(801)은 도 1에 도시된 구형 도파관 내부에 삽입되는 유전체 샘플의 형상을 나타낼 수 있다. 유전체 샘플(801)은 사각기둥의 형태를 가질 수 있다. 예를 들어, 유전체 샘플(801)은 기존에 b의 높이(height)를 가지는 유전체 샘플을 $\Delta b$의 높이만큼 y축 방향에 대하여 횡단면으로 절개된 유전체 샘플을 나타낼 수 있다.

[0066] 다른 예로, 유전체 샘플(802)는 원형 도파관들 사이의 샘플 홀더 내부에 삽입되는 유전체 샘플의 형상을 나타낼 수 있다. 유전체 샘플(802)은 원기둥의 형태를 가질 수 있다. 예를 들어, 유전체 샘플(802)은, R의 반지름을 가지는 유전체 샘플에서 y축 방향에 대하여 $\Delta R$의 길이만큼에 대응하는 부분이 횡단면으로 절개된 유전체 샘플을 나타낼 수 있다.

[0067] 또 다른 예로, 유전체 샘플(803)은 원형 도파관들 사이의 샘플 홀더의 내부 홀에 삽입되는 유전체 샘플을 나타낼 수 있다. 유전체 샘플(803)은, R의 반지름을 가지는 유전체 샘플에서 모든 방향에 대하여 $\Delta R$의 길이만큼에 대응하는 부분이 절개된, 유전체 샘플을 나타낼 수 있다.

[0068] 도 8에서 설명한 유전체 샘플(802, 803)이 샘플 홀더 내에 삽입될 경우, 샘플 홀더 및 유전체 샘플(802, 803) 간에는 $\Delta R$의 길이에 대응하는 부분만큼 이격이 발생할 수 있다. 다만, 앞서 설명한 바와 같이, 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치는 $TE_{01}$ 모드의 전자파를 이용하므로, 이격에 의해 발생하는 에어 갭에도 불구하고 공진 주파수 및 그에 따른 유전율을 정확하게 측정할 수 있다.

[0069] 도 9 내지 도 12은 유전체 샘플의 변형(deformation) 정도에 따른 전자파에 대한 주파수 응답 특성을 도시한다.

[0070] 도 9는 알루미나($Al_2O_3$) 샘플의 변형 정도에 따른 전자파에 대한 주파수 응답 특성을 도시한다. 일 실시예에 따른 유전율 측정 장치의 벡터 네트워크 분석기(VNA)는 유전체 샘플에 대하여 주파수를 스윕하면서 파라미터를 측정함으로써, 산란된 전자파에 대한 주파수 응답 특성을 획득할 수 있다. 주파수 응답 특성은 도 9에 도시된 바와 같이 산란 파라미터 중 투과 계수 $S_{21}$ 일 수 있다. 주파수 응답 특성(901)은 제1 도파관 모드의 전자파에 대한 알루미나 샘플의 변형 정도에 따른 주파수 응답 특성을 나타낼 수 있다. 주파수 응답 특성(901)는 구형 도파관 내부에 알루미나 샘플이 배치됨에 따라 측정되는 S 파라미터에 대한 그래프를 나타낼 수 있으며, 예를 들어, 알루미나 샘플은 사각기둥의 형태를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(911)은 알루미나 샘플이 구형 도파관의 높이(height)와 임계 미만의 차이를 갖는 높이를 가지는 경우, 제1 도파관 모드의 전자파를 알루미나 샘플에 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 또한, 알루미나 샘플들은 각각 95%, 90%의 높이를 가지도록 y축 방향에 대하여 횡단면으로 절개되며, 각각의 알루미나 샘플에 전자파를 투과시켜 주파수 응답 특성을 측정할 수 있다. 예를 들어, 투과 곡선(912)는 투과 곡선(911)에 사용된 알루미나 샘플에 대하여 5%의 높이만큼 y축으로 절개하고, 제1 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(913)은 투과 곡선(911)에 사용된 알루미나 샘플에 대하여 10%의 높이만큼 y축으로 절개하고, 제1 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 예시적으로, 알루미나 샘플의 두께(thickness)는 1.46㎜를 나타낼 수 있으나, 이로 한정하지 않는다. 투과 곡선들(911, 912, 913)은 복수의 공명 주파수를 가질 수 있으며, 구형 도파관의 높이와 임계 미만의 차이를 갖는 높이를 가지는 알루미나 샘플에 대한 투과 곡선(911)도 변형된 알루미나 샘플에 대한 투과 곡선과 같이 매끄럽게 나타나지 않을 수 있다. 제1 도파관 모드의 전자파를 이용하여 알루미나 샘플의 유전율을 측정하는 경우, 유전율에 대한 측정이 불확실하게 나타날 수 있다.

[0071] 주파수 응답 특성(902)는 도 2의 원형 도파관들 사이의 샘플 홀더 내부에 알루미나 샘플이 삽입됨에 따라 측정되는 S 파라미터에 대한 그래프를 나타낼 수 있으며, 알루미나 샘플은 원기둥의 형태를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(921)은 알루미나 샘플이 원형 도파관의 직경(diameter)과 임계 미만의 차이를 갖는 직경을 가지는 경우, 제2 도파관 모드의 전자파를 알루미나 샘플에 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 또한, 알루미나 샘플들이 각각 y축 방향에 대하여 반지름의 5%, 10%에 대응하는 부분만큼 횡단면으로 절개될 수 있으며, 각각의 절개된 알루미나 샘플들에 전자파를 투과시켜 주파수 응답 특성을 측정할 수 있다. 예를 들어, 투과 곡선(922)는 투과 곡선(921)에 사용된 알루미나 샘플에 대하여 y축 방향으로 반지름의 5%에 대응하는 부분을 횡단면으로 절개하고, 제2 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(923)은 투과 곡선(921)에 사용된 알루미나 샘플에 대하여 y축 방향으로 반지름의 10%에 대응하는 부분을 횡단면으로 절개하고, 제2 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 즉, 투과 곡선(921, 923)에 사용되는 알루미나 샘플은 도 8의 유전체 샘플(802)와 같은 형태를 가질 수 있다.

[0072] 예시적으로, 알루미나 샘플의 두께(thickness)는 1.49㎜를 나타낼 수 있으나, 이로 한정하지는 않는다. 제2 도파관 모드의 전자파를 유전체에 투과시키는 경우, 측정 불확실성이 매우 작게 나타날 수 있다. 또한, 제2 도파관 모드의 전자파를 유전체 샘플에 투과시키는 경우, 유전체 샘플이 샘플 홀더 내부에 배치되는 위치가 변화하더라도 전송 곡선의 변화폭은 매우 작게 나타날 수 있다.

[0073] 예를 들어, 제1 도파관 모드의 전자파 및 제2 도파관 모드의 전자파를 이용하여 측정된 알루미나의 유전율은 표 1과 같은 값을 가질 수 있다.

표 1

[0074]

| 산화 알루미나의 유전율(Dielectric permittivity of Alumina) | | | |
|---|---|---|---|
| 모드(Mode) | 비유전율 | 준 광학(Quasi-Optical) 실험에 의한 유전율과 차이 | 손실 탄젠트 |
| $TE_{10}$ | 9.01 또는 9.20 | 7.26% ~ 9.17% | 52 |
| $TE_{01}$ | 10.18 | 2.62% | 2.4 |

[0075] 준 광학 실험(Quasi-Optical experiment)은 자유 공간(free-space)에서 알루미나 판(plate)를 이용하여 전달되는 가우스 빔(Gaussian beam)을 이용하여 유전체 샘플의 유전율을 비교적 정확하게 측정하는 실험을 나타낼 수 있다.예시적으로, 제1 도파관 모드의 전자파를 이용하여 측정된 S 파라미터의 주파수 응답 특성(901)은 복수개의 공진 피크를 나타낼 수 있다. 예를 들어, 주파수 응답 특성(901) 내의 제1 공진 피크 및 제2 공진 피크에 의하여 측정된 알루미나 샘플의 유전율은 각각 9.01 및 9.20로 나타날 수 있으며, 준 광학 실험에 의하여 측정된 유전율과 비교하여 7.26% 내지 9.17%의 차이를 나타낼 수 있다. 또한, 주파수 응답 특성(902) 내의 공진 피크에 의하여 측정된 알루미나 샘플의 유전율은 10.18로 나타날 수 있으며, 준 광학 실험에 의하여 측정된 유전율과 2.62%의 차이만을 나타낼 수 있다. 참고로, 손실 탄젠트(loss tangent)는 결정된 유전체의 비유전율을 이용하여 계산할 수 있으며, 손실 탄젠트는 아래 수학식과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 4

[0076]
$$\tan\delta = \frac{2\beta\alpha_d}{k^2}$$

[0077] k는 파수(wavenumber), $\beta$는 유전체의 전파 상수, 및 $\alpha_d$는 유전 손실(dielectric loss)에 의한 감쇠를 나타낼 수 있다.

[0078] 도 10은 알루미나 샘플의 변형 정도에 따른 전자파에 대한 주파수 응답 특성을 도시한다.

[0079] 주파수 응답 특성(1001)은 제1 도파관 모드의 전자파에 대한 알루미나 샘플의 변형 정도에 따른 주파수 응답 특성을 나타낼 수 있다. 주파수 응답 특성(1001)은 구형 도파관 내부에 알루미나 샘플이 배치됨에 따라 측정되는 S 파라미터에 대한 그래프를 나타낼 수 있으며, 예를 들어, 알루미나 샘플은 사각기둥의 형태를 나타낼 수 있다. 투과 곡선들(1011, 1012)은 각각 알루미나 샘플을 각각 90%, 80%의 높이를 가지도록 y축 방향에 대하여 횡단면으로 절개하기 전의 기존 알루미나 샘플에 대하여, 제1 도파관 모드의 전자파를 알루미나 샘플에 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(1013)은 투과 곡선(1011)에 사용된 알루미나 샘플에 대하여 10%의 높이 만큼 y축으로 절개하고, 제1 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 곡선(1014)은 투과 곡선(1012)에 사용된 알루미나 샘플에 대하여 20%의 높이 만큼 y축으로 절개하고, 제1 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다.

[0080] 주파수 응답 특성(1002)은 도 2의 원형 도파관들 사이의 샘플 홀더 내부에 알루미나 샘플이 배치됨에 따라 측정되는 S 파라미터에 대한 그래프를 나타낼 수 있으며, 알루미나 샘플은 원기둥의 형태를 나타낼 수 있다. 투과 곡선들(1021, 1022)은 각각 알루미나 샘플을 각각 90%, 80%의 직경을 가지도록 모든 방향에 대하여 절개하기 전의 기존 알루미나 샘플에 대하여, 제2 도파관 모드의 전자파를 알루미나 샘플에 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(1023)은 투과 곡선(1021)에 사용된 알루미나 샘플에 대하여 반지름의 10%에 대응하는 부분을 모든 방향으로 절개하고, 제2 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(1024)은 투과 곡선(1022)에 사용된 알루미나 샘플에

대하여 반지름의 20%에 대응하는 부분을 모든 방향으로 절개하고, 제2 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다.

[0081] 예시적으로, 투과 곡선(1023)에 의하여 결정된 10% 변형된 알루미나 샘플의 유전율은 10.14로 나타날 수 있으며, 투과 곡선(1021)에 의하여 결정된 변형되기 전의 알루미나 샘플의 유전율과 비교하여 1.26% 차이가 나타날 수 있다. 또한, 투과 곡선(1024)에 의하여 결정된 20% 변형된 알루미나 샘플의 유전율은 9.82로 나타날 수 있으며, 투과 곡선(1022)에 의하여 결정된 변형되기 전의 알루미나 샘플의 유전율과 비교하여 3% 차이가 나타날 수 있다.

[0082] 도 11은 티타나이트 칼슘 마그네슘(magnesium calcium titanate, MCT) 샘플의 변형 정도에 따른 전자파에 대한 주파수 응답 특성을 도시한다. 주파수 응답 특성(1101)은 제1 도파관 모드의 전자파에 대한 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플의 변형 정도에 따른 주파수 응답 특성을 나타낼 수 있다. 주파수 응답 특성(1101)는 구형 도파관 내부에 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플이 배치됨에 따라 측정되는 S 파라미터에 대한 그래프를 나타낼 수 있으며, 예를 들어, 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플은 사각기둥의 형태를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(1111)은 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플이 구형 도파관의 높이(height)와 임계 미만의 차이를 갖는 높이를 가지는 경우, 제1 도파관 모드의 전자파를 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플에 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 또한, 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플들은 각각 95%, 90%의 높이를 가지도록 y축 방향에 대하여 횡단면으로 절개되며, 각각의 알루미나 샘플에 전자파를 투과시켜 주파수 응답 특성을 측정할 수 있다. 예를 들어, 투과 곡선(1112)는 투과 곡선(1111)에 사용된 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플에 대하여 5%의 높이만큼 y축으로 절개하고, 제1 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(1113)은 투과 곡선(1111)에 사용된 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플에 대하여 10%의 높이만큼 y축으로 절개하고, 제1 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다.

[0083] 주파수 응답 특성(1102)는 도 2의 원형 도파관들 사이의 샘플 홀더 내부에 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플이 삽입됨에 따라 측정되는 S 파라미터에 대한 그래프를 나타낼 수 있으며, 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플은 원기둥의 형태를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(1121)은 알루미나 샘플이 원형 도파관의 직경(diameter)과 임계 미만의 차이를 갖는 직경을 가지는 경우, 제2 도파관 모드의 전자파를 알루미나 샘플에 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 또한, 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플들이 각각 y축 방향에 대하여 반지름의 5%, 10%에 대응하는 부분만큼 횡단면으로 절개될 수 있으며, 각각의 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플에 전자파를 투과시켜 주파수 응답 특성을 측정할 수 있다. 예를 들어, 투과 곡선(1122)는 투과 곡선(1121)에 사용된 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플에 대하여 y축 방향으로 반지름의 5%에 대응하는 부분을 횡단면으로 절개하고, 제2 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(1123)는 투과 곡선(1121)에 사용된 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플에 대하여 y축 방향으로 반지름의 10%에 대응하는 부분을 횡단면으로 절개하고, 제2 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 즉, 투과 곡선(1122, 1123)에 사용되는 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플은 도 8의 유전체 샘플(802)와 같은 형상을 나타낼 수 있다.

[0084] 예를 들어, 제1 도파관 모드의 전자파 및 제2 도파관 모드의 전자파를 이용하여 측정된 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플의 유전율은 표 2 와 같은 값을 나타낼 수 있다.

표 2

[0085]

| MCT 세라믹의 유전율(Dielectric permittivity of Alumina) | | | |
|---|---|---|---|
| 모드(Mode) | 비유전율 | 준 광학(Quasi-Optical) 실험에 의한 유전율과 차이 | 손실 탄젠트 |
| $TE_{10}$ | 17.73 또는 18.49 | 7.55% ~ 11.4% | 18 |
| $TE_{01}$ | 20.58 | 2.90% | 4.2 |

[0086] 예시적으로, 제1 도파관 모드의 전자파를 이용하여 측정된 S 파라미터의 주파수 응답 특성(1101)은 복수개의 공진 피크를 나타낼 수 있다. 예를 들어, 주파수 응답 특성(1101) 내의 제1 공진 피크 및 제2 공진 피크에 의하여 측정된 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플의 유전율은 각각 17.73 및 18.49로 나타날 수 있으며, 준 광학 실험에 의하여 측정된 유전율과 비교하여 7.55% 내지 11.4%의 차이를 나타낼 수 있다. 예를 들어, 주파수 응답 특성(1102) 내의 공진 피크에 의하여 측정된 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플의 유전율은 20.58로 나타날 수 있으며, 준 광학 실험에 의하여 측정된 유전율과 2.90%의 차이만을 나타낼 수 있다.도 12는 테플론(Teflon) 샘플의 변형 정도에 따른 전자파에 대한 주파수 응답 특성을 도시한다.

[0087] 주파수 응답 특성(1200)은 도 2의 원형 도파관들 사이의 샘플 홀더 내부에 테플론 샘플이 배치됨에 따라 측정되는 S 파라미터에 대한 그래프를 나타낼 수 있으며, 테플론 샘플은 원기둥의 형태를 나타낼 수 있다. 투과 곡선들(1201, 1202)은 각각 테플론 샘플을 각각 90%, 80%의 직경을 가지도록 모든 방향에 대하여 절개하기 전의 기존 테플론 샘플에 대하여, 제2 도파관 모드의 전자파를 테플론 샘플에 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(1203)은 투과 곡선(1201)에 사용된 테플론 샘플에 대하여 반지름의 10%에 대응하는 부분을 모든 방향으로 절개하고, 제2 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 투과 곡선(1204)은 투과 곡선(1202)에 사용된 테플론 샘플에 대하여 반지름의 20%에 대응하는 부분을 모든 방향으로 절개하고, 제2 도파관 모드의 전자파를 투과시켜 주파수를 스윕하면서 측정한 S 파라미터를 나타낼 수 있다. 즉, 투과 곡선(1203, 1204)에 사용되는 테플론 샘플은 도 8의 유전체 샘플(803)와 같은 형상을 나타낼 수 있다.

[0088] 예를 들어, 2 도파관 모드의 전자파를 이용하여 측정된 테플론 샘플의 유전율은 표 3 와 같은 값을 가질 수 있다.

표 3

[0089]

| 테플론 샘플에 의한 유전율(Dielectric permittivity of Teflon) | | | |
|---|---|---|---|
| 모드(Mode) | 비유전율 | 준 광학(Quasi-Optical) 실험에 의한 유전율과 차이 | 손실 탄젠트 |
| $TE_{01}$ | 2.020 | 0.58% | 5.7 |

[0090] 예시적으로, 유전체 샘플의 변형된 정도가 증가함에 따라 주파수 응답 특성(1200) 상에서 주파수 편이(frequency shift)가 나타날 수 있다. 변형되지 않은 테플론 샘플의 투과 곡선(1201, 1202) 및 변형된 테플론 샘플의 투과 곡선(1203, 1204)는 모두 매끄러운 곡선이 나타날 수 있다. 변형된 테플론 샘플의 투과 곡선들(1203, 1204) 상에서는 에어 갭(air gap)에 의하여 비정상적인 피크가 나타날 수 있다. 테플론 샘플이 변형된 정도가 커짐에 따라, 피크가 크게 나타날 수 있다. TE01 모드로 측정한 W 대역 영역에서의 테플론 샘플의 비유전율 및 손실 탄젠트는 허용 가능한 범위 내로 나타날 수 있다. 예를 들어, 투과 곡선(1203)에서의 공진 피크에 의하여 측정된 10% 변형된 테플론 샘플의 유전율은 1.98로 나타날 수 있으며, 투과 곡선(1201)에서의 공진 피크에 의하여 측정된 변형 전의 테플론 샘플의 유전율과 1.98% 차이가 나타날 수 있다. 투과 곡선(1204)에서의 공진 피크에 의하여 측정된 20% 변형된 테플론 샘플의 유전율은 1.99로 나타날 수 있으며, 투과 곡선(1202)에서의 공진 피크에 의하여 측정된 테플론 샘플의 유전율과 2.12% 차이가 나타날 수 있다.이하, 표 4에서는 원형 도파관에 대한 TE01 모드를 이용하여 유전체 샘플의 유전율을 측정하는 경우, 유전체 샘플의 변형률에 따른 유전율의 오류를 나타낸다.

표 4

| 유전율의 계산 오류(Errors in computation of Dielectric Permittivity) | | | |
|---|---|---|---|
| 유전체 | 유전율($\epsilon$) | 변형 정도 | $\Delta_{\epsilon 01}$ |
| 알루미나 | 10 | 10% | 1.26% |
| | | 20% | 3.06% |
| 티타나이트 칼슘 마그네슘 | 20 | 5% | 0.04% |
| | | 10% | 0.14% |
| 테플론 | 2 | 10% | 1.98% |
| | | 20% | 2.12% |

[0091]

[0092] 제1 도파관 모드의 전자파를 이용하여 주파수 응답 특성을 측정하는 경우, 유전체 샘플의 작은 변형에 대한 주파수 응답 특성조차 분석하기 어려운 투과 곡선이 나타날 수 있다. 반면, 제2 도파관 모드의 전자파를 이용하여 주파수 응답 특성을 측정하는 경우, 유전체 샘플의 변형률이 20%에 가까운 경우에도 합리적인 전송 곡선과 가까운 전송 곡선이 측정될 수 있다. 표 4에서, 알루미나 및 테플론 샘플은 원기둥의 유전체 샘플을 모든 방향에 대하여 절개한 경우에 대하여 직경의 변형 정도에 대한 유전율의 오류를 나타낸다. 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플은 원기둥의 유전체 샘플을 y축 방향에 대하여 횡단면으로 절개한 경우에 대한 유전율의 오류를 나타낸다. 따라서, 알루미나와 테플론의 유전체 샘플의 변형으로 인한 치수(dimension) 감소가 티타나이트 칼슘 마그네슘 샘플보다 크기 때문에 알루미나와 테플론에 대한 유전율의 오류가 비교적 크게 나타날 수 있다.더 나아가, 원형 도파관내에서의 $TE_{0n}$ 모드는 동일한 원리로 제안된 측정 방법에 사용될 수 있다. 이때, n은 1이상의 자연수를 나타낼 수 있다. 높은 차수 모드는 고주파수 영역대에서 수용할 수 있는 유전체 샘플의 크기를 증가시킬 수 있다. 원형 도파관의 $TE_{0n}$ 모드를 사용하여 더 높은 주파수 범위로 치수를 더 늘려 적용할 수 있다.

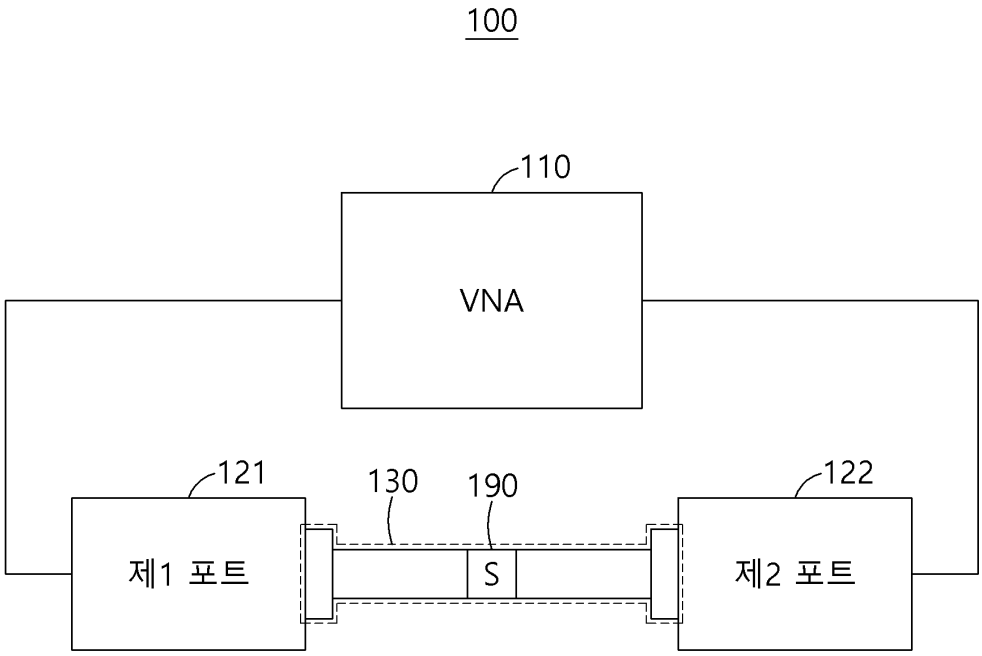
[0093] 결국, 구형 도파관에서의 제1 도파관 모드를 사용하여 유전체 샘플의 유전율을 측정하는 방법은 저주파수 영역에서 사용하기 쉽지만, 유전체 샘플의 제조 결함으로 형성되는 에어 갭이 전송에 영향을 미치기 때문에 W 밴드 대역(예를 들어, 75GHz 내지 110GHz)에서 구현하기 어렵다. 따라서, 제2 도파관 전파 모드를 사용하여 유전체 샘플의 유전율을 측정하는 방법으로 고주파수 영역에서 유전체 샘플의 유전율을 측정할 수 있으며, 500GHz대의 고주파수에서도 유전체의 유전율을 측정할 수 있다.

[0094] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기를 기초로 다양한 기술적 수정 및 변형을 적용할 수 있다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

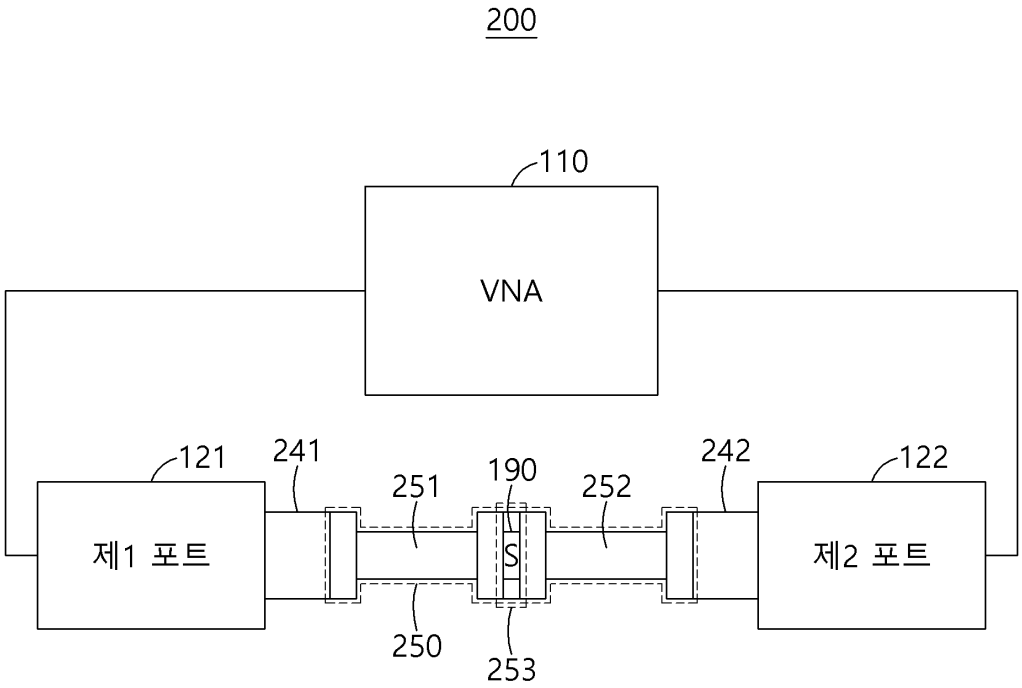
[0095] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 청구범위의 범위에 속한다.

도면

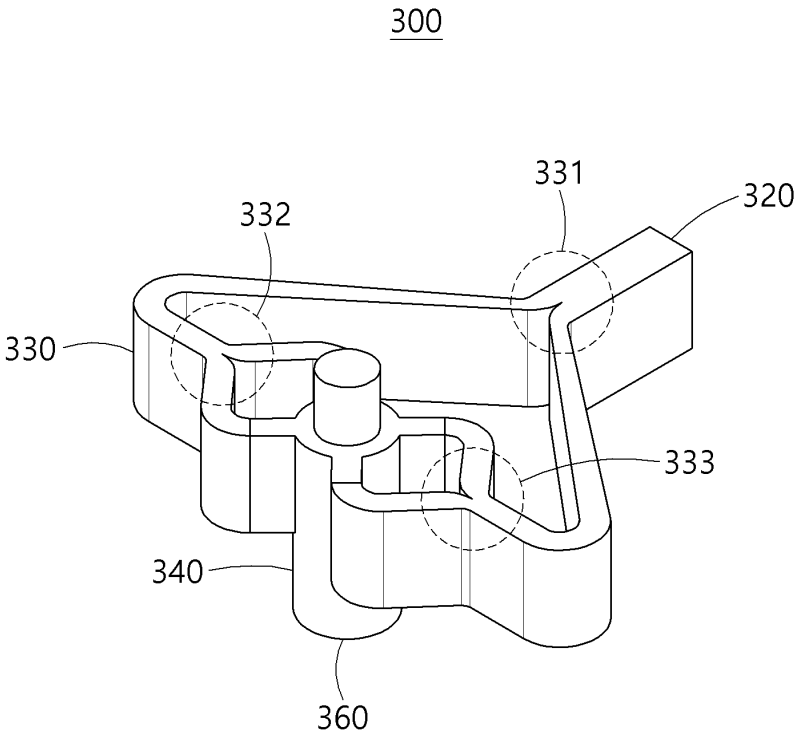
도면1


100
110
VNA
121
130
190
122
제1 포트
S
제2 포트

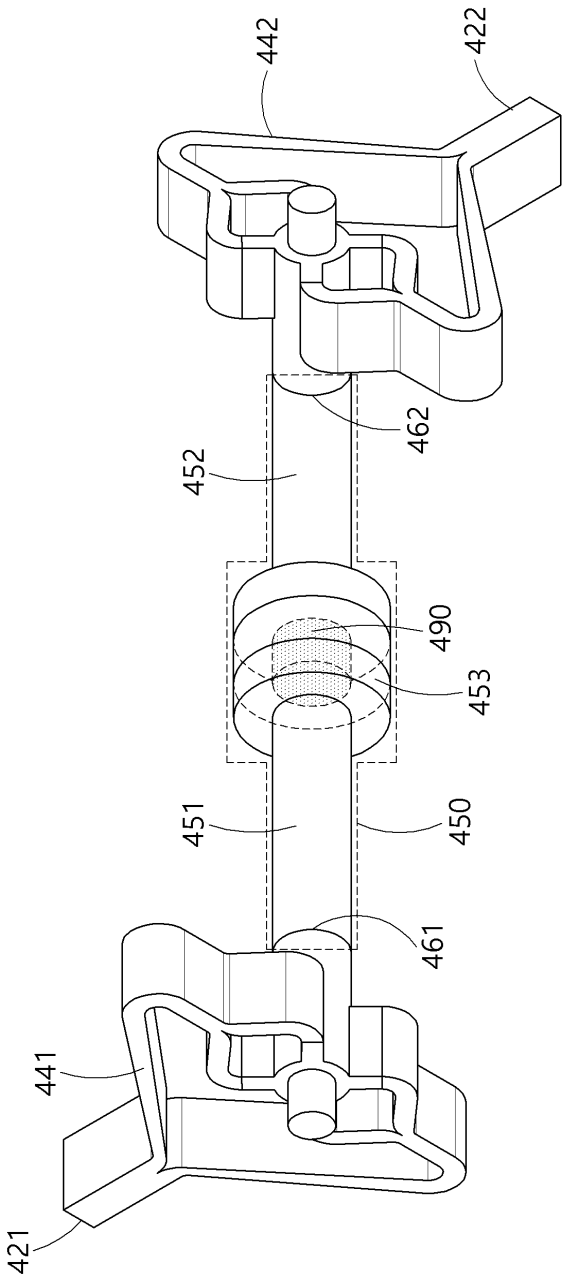
도면2


200
110
VNA
121
241
251
190
252
242
122
제1 포트
S
제2 포트
250
253

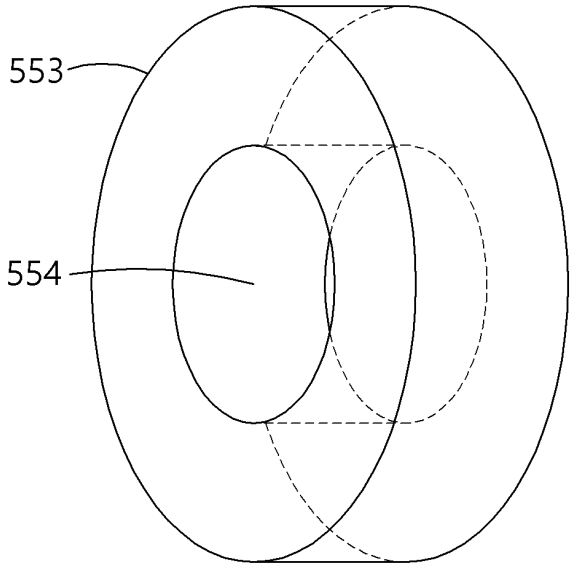
도면3



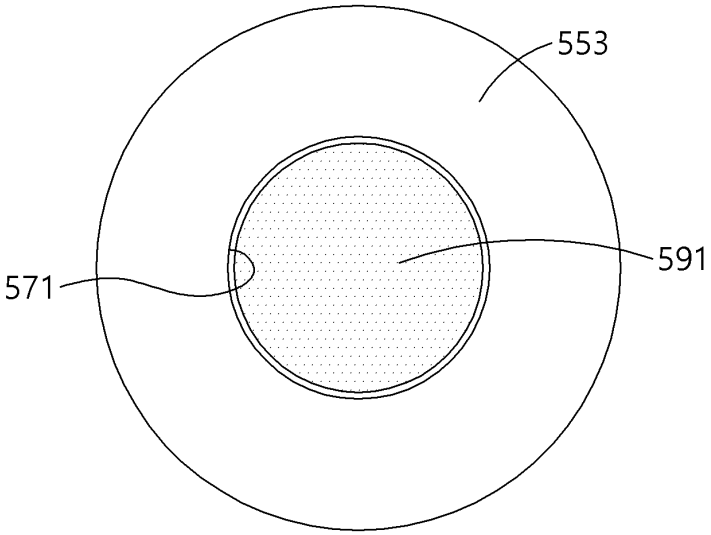
도면4



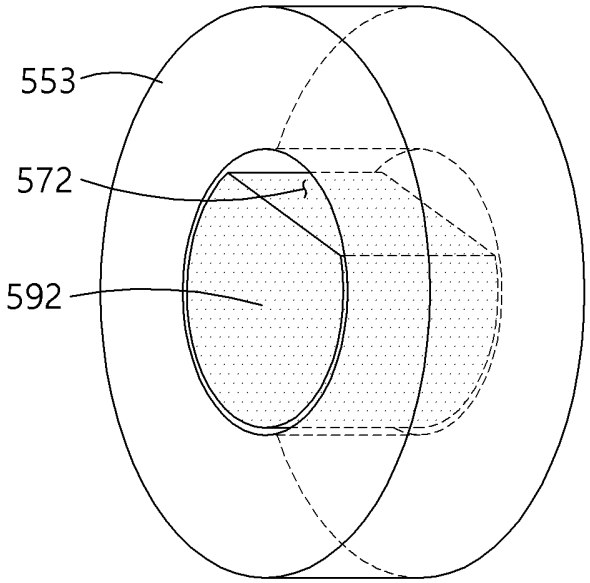
도면5a



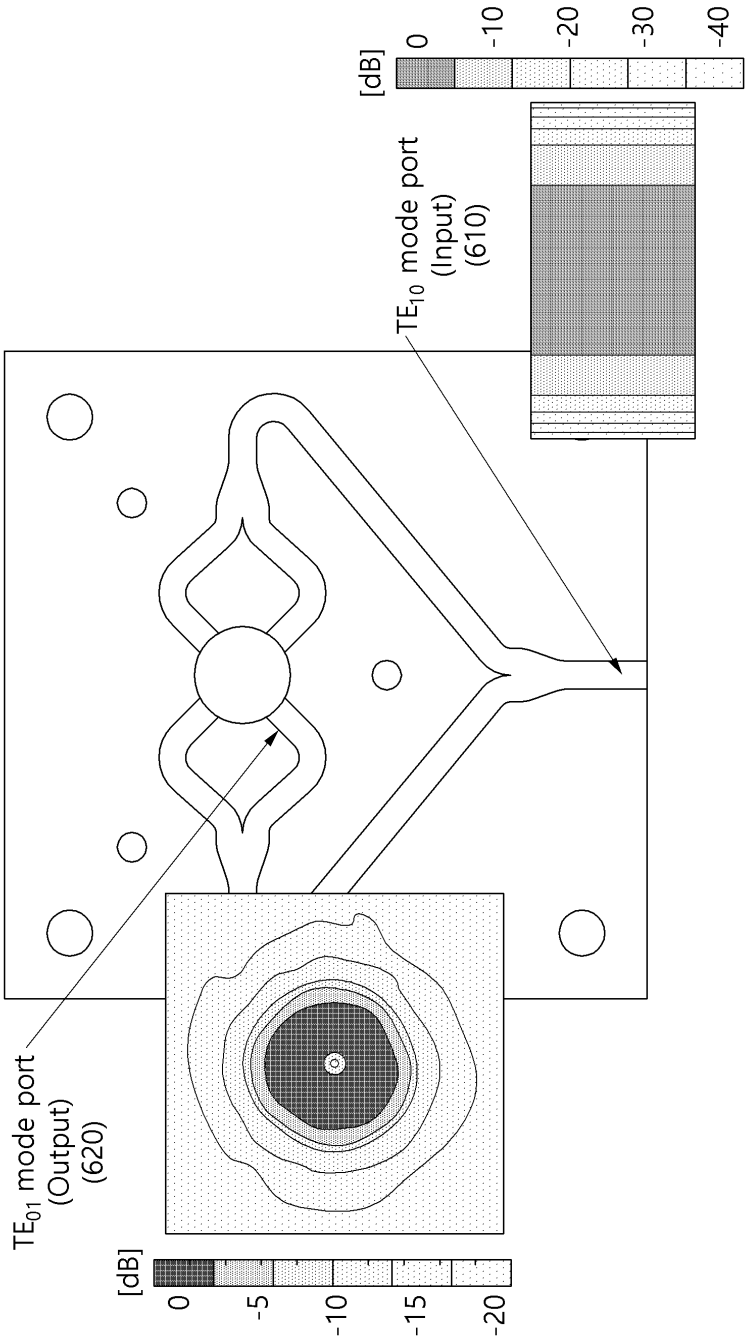

도면5b



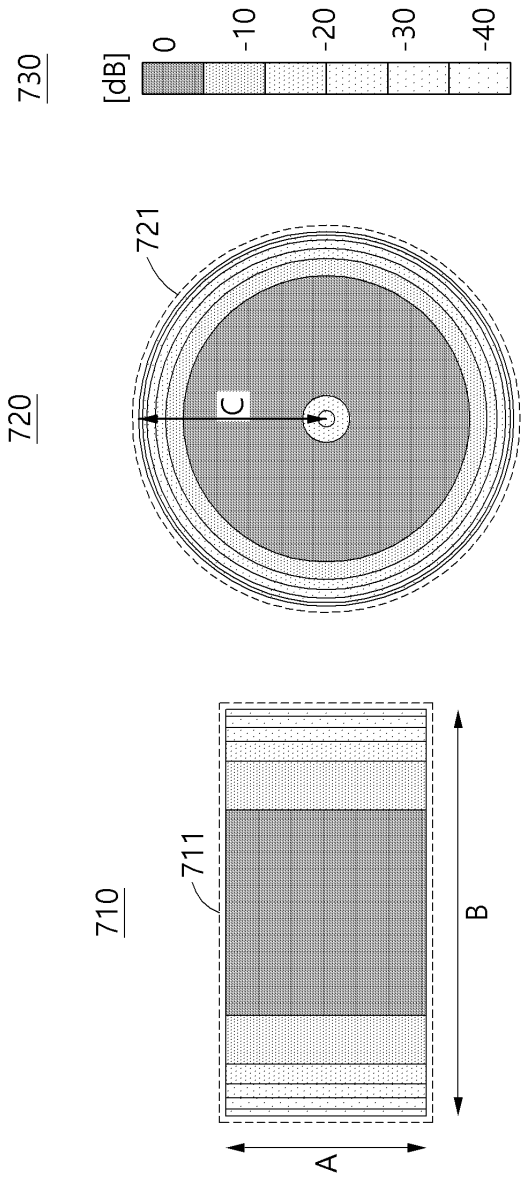
도면5c



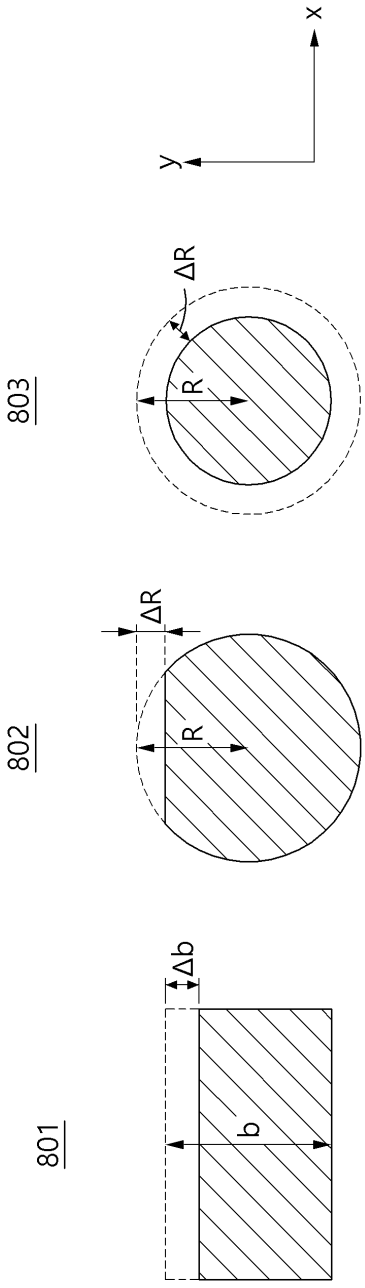
도면6


[dB]
0
-10
-20
-30
-40
$TE_{10}$ mode port
(Input)
(610)
$TE_{01}$ mode port
(Output)
(620)
[dB]
0
-5
-10
-15
-20

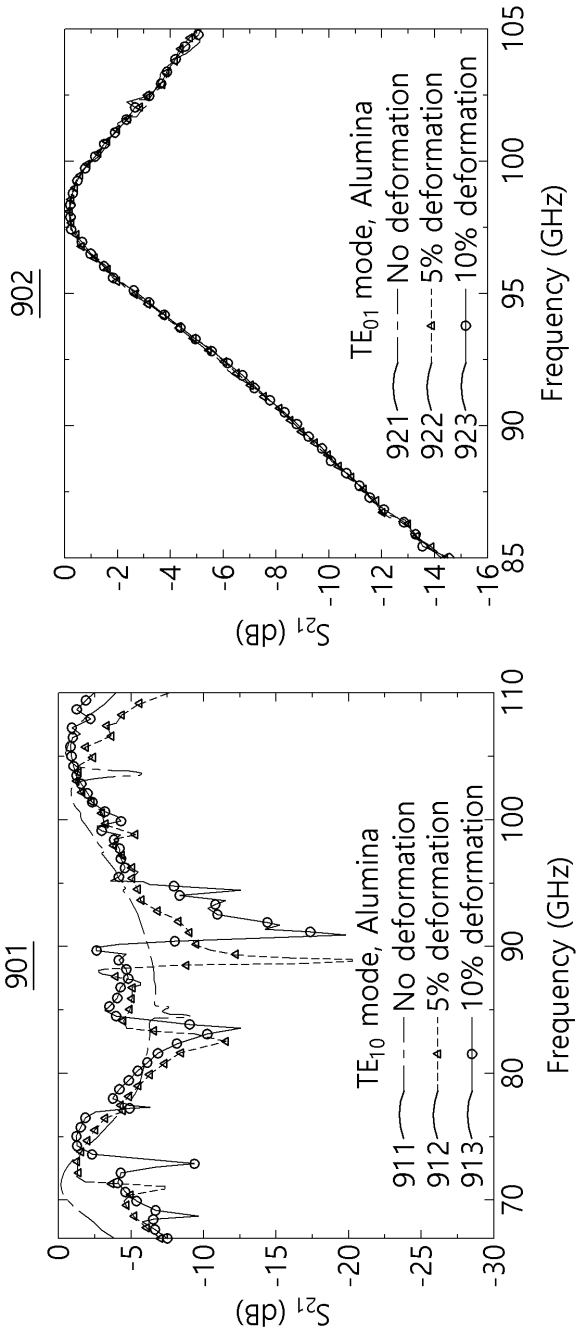
도면7



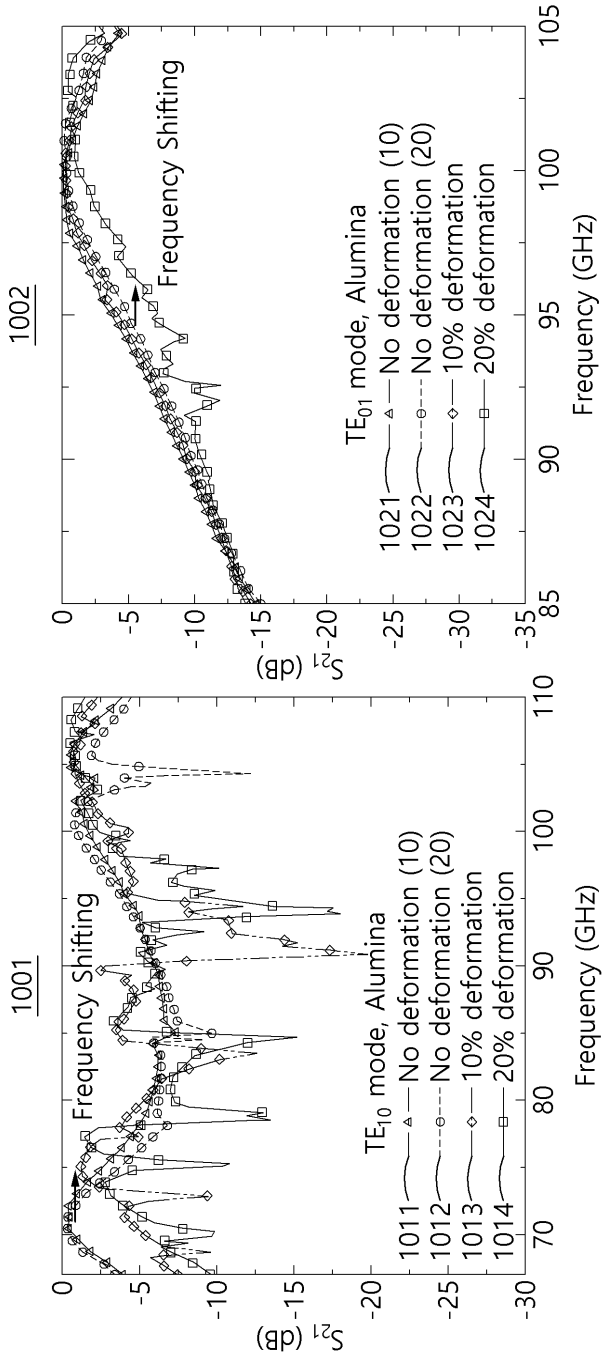
도면8



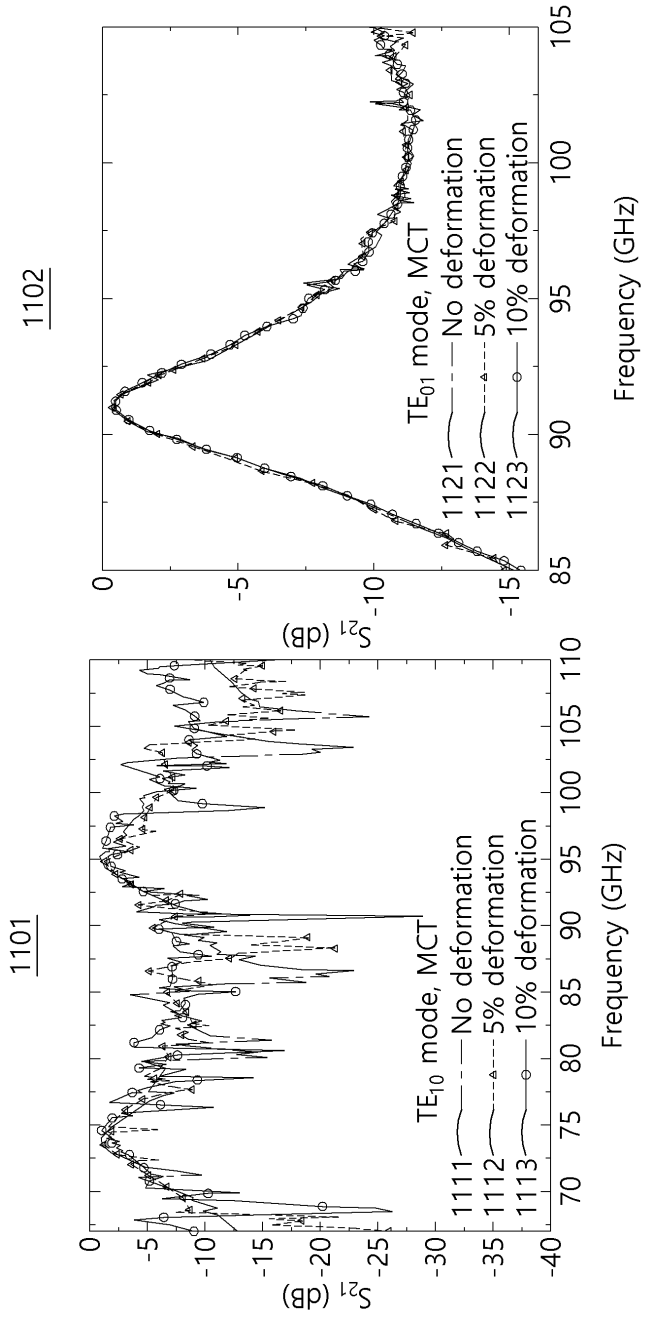
도면9


902
$S_{21}$ (dB)
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14
-16
85
90
95
100
105
Frequency (GHz)
$TE_{01}$ mode, Alumina
921 No deformation
922 5% deformation
923 10% deformation
901
$S_{21}$ (dB)
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
70
80
90
100
110
Frequency (GHz)
$TE_{10}$ mode, Alumina
911 No deformation
912 5% deformation
913 10% deformation

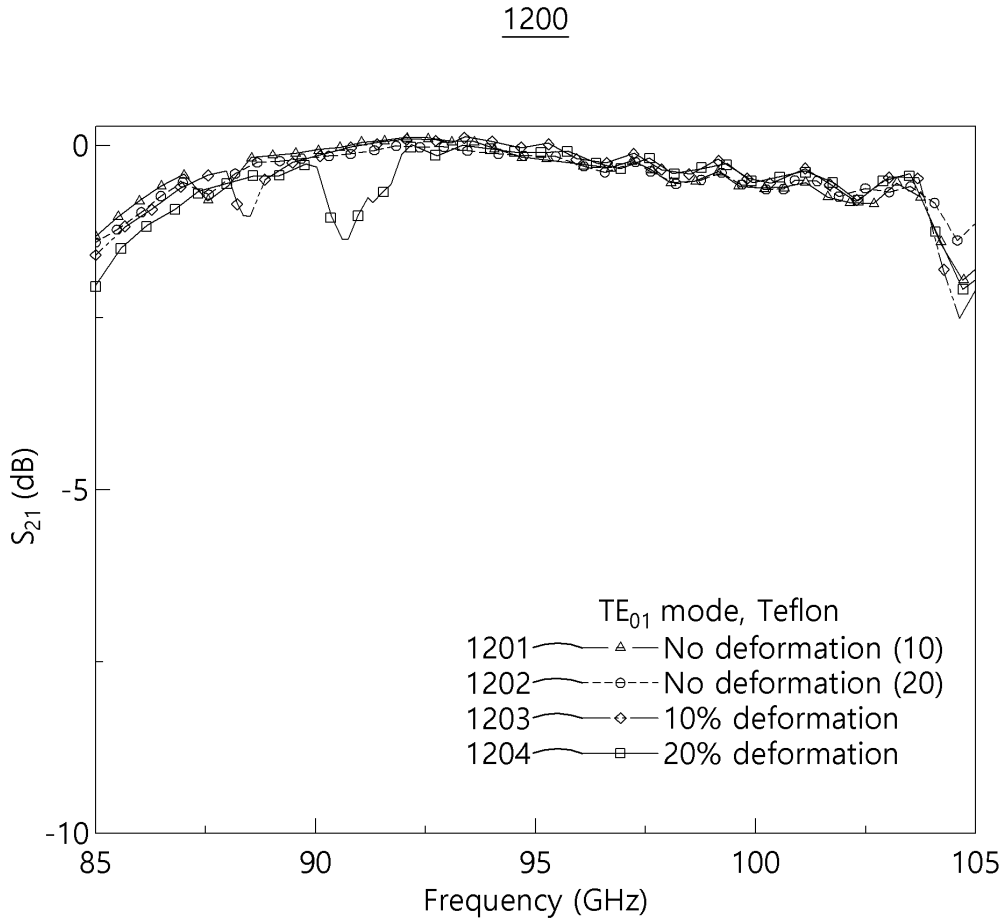
도면10


1001
Frequency Shifting
$S_{21}$ (dB)
Frequency (GHz)
$TE_{10}$ mode, Alumina
1011 No deformation (10)
1012 No deformation (20)
1013 10% deformation
1014 20% deformation
1002
Frequency Shifting
$S_{21}$ (dB)
Frequency (GHz)
$TE_{01}$ mode, Alumina
1021 No deformation (10)
1022 No deformation (20)
1023 10% deformation
1024 20% deformation

도면11


1101
1102
$S_{21}$ (dB)
Frequency (GHz)
$TE_{10}$ mode, MCT
1111 No deformation
1112 5% deformation
1113 10% deformation
$TE_{01}$ mode, MCT
1121 No deformation
1122 5% deformation
1123 10% deformation

도면12


1200
0
-5
-10
$S_{21}$ (dB)
85
90
95
100
105
Frequency (GHz)
$TE_{01}$ mode, Teflon
1201 No deformation (10)
1202 No deformation (20)
1203 10% deformation
1204 20% deformation