



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년05월24일
 (11) 등록번호 10-1735122
 (24) 등록일자 2017년05월04일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01P 3/08 (2006.01) *H01P 7/08* (2006.01)
- (21) 출원번호 10-2011-7006525
- (22) 출원일자(국제) 2009년08월21일
 심사청구일자 2014년08월18일
- (85) 번역문제출일자 2011년03월21일
- (65) 공개번호 10-2011-0071065
- (43) 공개일자 2011년06월28일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2009/004772
- (87) 국제공개번호 WO 2010/021736
 국제공개일자 2010년02월25일
- (30) 우선권주장
 61/091,337 2008년08월22일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌
 JP2008507733 A
 JP2006245926 A
 JP2008028966 A
 US20010038325 A1

- (73) 특허권자
 듀크 유니버시티
 미국 노스캐롤라이나 27708 더럼 피.오.박스
 90083 오피스 오브 사이언스 앤드 테크놀로지
- (72) 발명자
 스미스, 데이비드, 알.
 미국, 노스캐롤라이나 27708-0083, 더럼, 피.오.
 박스 90083, 씨/오 듀크 유니버시티
 리우, 루오펑
 미국, 노스캐롤라이나 27708-0083, 더럼, 피.오.
 박스 90083, 씨/오 듀크 유니버시티
 (뒷면에 계속)
- (74) 대리인
 허용록

전체 청구항 수 : 총 42 항

심사관 : 김상철

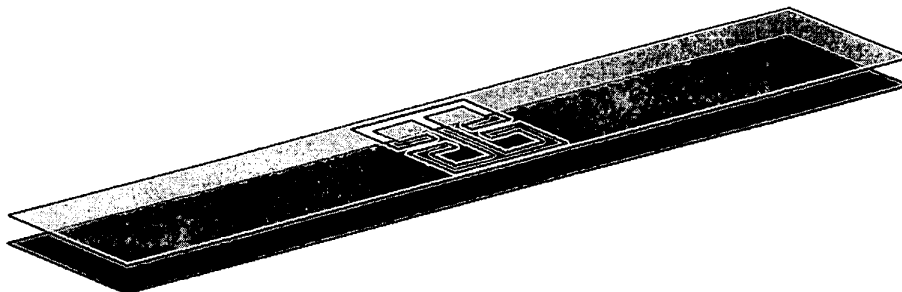
(54) 발명의 명칭 **표면과 도파관을 포함하는 장치 및 이를 사용하는 방법**

(57) 요약

상보적 메타머티리얼(metamaterial) 소자는 표면 구조 및/또는 도파관 구조물을 위한 유효 유전율 및/또는 투자율을 제공한다. 상보적 메타머티리얼 공진 소자는 "분할 링 공진기(split ring resonator)(SRR)"와 "전기 LC(electric LC)" 메타머티리얼 소자의 바비넷 보체(Babinet complements)를 포함한다. 일 실시예에서는, 상보적 메타머티리얼 소자는 예를 들면, 도파관을 기본으로한 빔 조향/포커싱 장치의 굴절률 분포형 렌즈, 안테나 어레이 피드 구조(antenna array feed structures) 등 평면 도파관의 경계면에 삽입된다.

대표도 - 도1

도파형 상보적 ELC (자기 응답)



(72) 발명자

쿠이, 티에 준

미국, 노스캐롤라이나 27708-0083, 더럼, 피.오.박
스 90083, 씨/오 듀크 유니버시티

첵, 귀앙

미국, 노스캐롤라이나 27708-0083, 더럼, 피.오.박
스 90083, 씨/오 듀크 유니버시티

콜럽, 요나

미국, 노스캐롤라이나 27708-0083, 더럼, 피.오.박
스 90083, 씨/오 듀크 유니버시티

명세서

청구범위

청구항 1

장치로서, 전도성 표면을 포함하고,

상기 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고,

상기 복수의 개별 전자기 응답들은, 상기 전도성 표면에 평행한 방향으로 유효 투자율(effective permeability)을 제공하며,

상기 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 경계 표면이고,

상기 유효 투자율은, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 유효 투자율이며,

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트 및 출력 전자기 에너지를 전달하기 위한 출력 포트를 정의하며,

상기 도파관 구조물은, 입력빔과는 실질적으로 다른 출력빔 방향을 정의하는 출력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔을 제공하도록, 입력빔 방향을 정의하는 입력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔에 응답하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 유효 투자율은 실질적으로 0인 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 유효 투자율은 실질적으로 0보다 작은 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 4

제 1항에 있어서,

상기 전도성 표면과 평행한 방향으로의 유효 투자율은, 상기 전도성 표면과 평행한 제1 방향으로의 제1 유효 투자율이고, 상기 복수의 개별 전자기 응답들 각각은 상기 전도성 표면에 평행하고 상기 제1 방향에 수직인 제2 방향으로의 제 2 유효 투자율을 더 제공하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 제 1 유효 투자율은 실질적으로 상기 제 2 유효 투자율과 동일한 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 6

제 4항에 있어서,

상기 제 1 유효 투자율은 실질적으로 상기 제 2 유효 투자율과는 다른 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 제 1 유효 투자율은 0보다 크고, 상기 제 2 유효 투자율은 0보다 작은 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 8

삭제

청구항 9

장치로서, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 상기 복수의 개별 전자기 응답은, 실질적으로 0 이하의 유효 굴절률을 제공하며,

상기 복수의 개별 전자기 응답들은, 상기 전도성 표면에 평행한 방향으로 유효 투자율(effective permeability)을 제공하며,

상기 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 경계 표면이고,

상기 유효 투자율은, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 유효 투자율이며,

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트 및 출력 전자기 에너지를 전달하기 위한 출력 포트를 정의하며,

상기 도파관 구조물은, 상기 출력 전자기 에너지의 실질적으로 수렴하는 빔(converging beam)을 제공하도록, 상기 입력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔에 응답하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 10

장치로서, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 상기 복수의 개별 전자기 응답은, 공간적으로 변화하는 유효 굴절률을 제공하며,

상기 복수의 개별 전자기 응답들은, 상기 전도성 표면에 평행한 방향으로 유효 투자율(effective permeability)을 제공하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 하나 이상의 경계 표면이고,

상기 유효 투자율(effective permeability)은, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 유효 투자율이며,

상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은 실질적으로 상기 도파관 구조물 내에서 전파되는 전자기파의 공간적으로 변화하는 유효 굴절률이며,

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트 및 출력 전자기 에너지를 전달하기 위한 출력 포트를 정의하며,

상기 도파관 구조물은, 입력빔과는 실질적으로 다른 출력빔 방향을 정의하는 출력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔을 제공하도록, 입력빔 방향을 정의하는 입력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔에 응답하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 11

삭제

청구항 12

제 10항에 있어서,

상기 도파관 구조물은 실질적으로 평면적인 2D 도파관 구조물인 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 13

삭제

청구항 14

제 10항에 있어서,

상기 입력 포트는 상기 입력 전자기 에너지의 비반사(nonreflection)를 위한 입력 포트 임피던스(input port impedance)를 정의하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 15

제 14항에 있어서,

상기 복수의 개별 전자기 응답들 각각은, 유효 웨이브 임피던스(effective wave impedance)를 더 제공하고, 상기 유효 웨이브 임피던스는, 상기 입력 포트에서의 상기 입력 포트 임피던스로 점진적으로 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 16

삭제

청구항 17

제10항에 있어서,

상기 출력 포트는 출력 전자기 에너지의 비반사를 위한 출력 포트 임피던스(output port impedance)를 정의하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 18

제 10항에 있어서,

상기 복수의 개별 전자기 응답 각각은, 유효 웨이브 임피던스를 더 제공하고, 상기 유효 웨이브 임피던스는 상기 출력 포트에서의 출력 포트 임피던스로 점진적으로 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 19

삭제

청구항 20

제 10항에 있어서,

상기 도파관 구조물은, 상기 입력 포트로부터 상기 출력 포트로 향하는 축방향을 정의하며, 상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은, 상기 입력 포트와 상기 출력 포트 사이에서, 축방향에 수직인 방향을 따라 실질적으로 선형 그래디언트를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 21

장치로서, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 상기 복수의 개별 전자기 응답은, 공간적으로 변화하는 유효 굴절률을 제공하며,

상기 복수의 개별 전자기 응답들은, 상기 전도성 표면에 평행한 방향으로 유효 투자율(effective permeability)을 제공하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 하나 이상의 경계 표면이고,

상기 유효 투자율(effective permeability)은, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 유효 투자율이며,

상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은 실질적으로 상기 도파관 구조물 내에서 전파되는 전자기파의 공간적으로 변화하는 유효 굴절률이며,

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트 및 출력 전자기 에너지를 전달하기 위한 출력 포트를 정의하며,

상기 도파관 구조물은, 상기 출력 전자기 에너지의 실질적으로 수렴하는 빔(converging beam)을 제공하도록, 상기 입력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔에 응답하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 22

제 21항에 있어서,

상기 도파관 구조물은, 상기 입력 포트로부터 상기 출력 포트로 향하는 축방향을 정의하며, 상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은, 상기 입력 포트와 상기 출력 포트 사이에서, 축방향에 수직인 방향을 따라 실질적으로 오목한 형상(concave)의 변동을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 23

장치로서, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 상기 복수의 개별 전자기 응답은, 공간적으로 변화하는 유효 굴절률을 제공하고,

상기 복수의 개별 전자기 응답들은, 상기 전도성 표면에 평행한 방향으로 유효 투자율(effective permeability)을 제공하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 하나 이상의 경계 표면이고,

상기 유효 투자율(effective permeability)은, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 유효 투자율이며,

상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은 실질적으로 상기 도파관 구조물 내에서 전파되는 전자기파의 공간적으로 변화하는 유효 굴절률이며,

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트 및 출력 전자기 에너지를 전달하기 위한 출력 포트를 정의하며,

상기 도파관 구조물은, 상기 출력 전자기 에너지의 실질적으로 분산되는 빔(diverging beam)을 제공하도록, 상기 입력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔에 응답하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 24

제 23항에 있어서,

상기 도파관 구조물은, 상기 입력 포트로부터 상기 출력 포트로 향하는 축방향을 정의하며, 상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은, 상기 입력 포트와 상기 출력 포트 사이에서, 축방향에 수직인 방향을 따라 실질적으로 볼록한 형상(convex)의 변동을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 25

장치로서, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는 복수

의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 상기 복수의 개별 전자기 응답은, 공간적으로 변화하는 유효 굴절률을 제공하며,

상기 복수의 개별 전자기 응답들은, 상기 전도성 표면에 평행한 방향으로 유효 투자율(effective permeability)을 제공하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 하나 이상의 경계 표면이고,

상기 유효 투자율(effective permeability)은, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 유효 투자율이며,

상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은 실질적으로 상기 도파관 구조물 내에서 전파되는 전자기파의 공간적으로 변화하는 유효 굴절률이며,

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트 및 출력 전자기 에너지를 전달하기 위한 출력 포트를 정의하며,

상기 출력 포트에 연결된 하나 이상의 패치 안테나(patch antennas)를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 26

장치로서, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 상기 복수의 개별 전자기 응답은, 공간적으로 변화하는 유효 굴절률을 제공하며,

상기 복수의 개별 전자기 응답들은, 상기 전도성 표면에 평행한 방향으로 유효 투자율(effective permeability)을 제공하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 하나 이상의 경계 표면이고,

상기 유효 투자율(effective permeability)은, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 유효 투자율이며,

상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은 실질적으로 상기 도파관 구조물 내에서 전파되는 전자기파의 공간적으로 변화하는 유효 굴절률이며,

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트를 정의하며,

상기 입력 포트에 연결된 하나 이상의 전자기 방사기를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 27

장치로서, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 상기 복수의 개별 전자기 응답은, 공간적으로 변화하는 유효 굴절률을 제공하며,

상기 복수의 개별 전자기 응답들은, 상기 전도성 표면에 평행한 방향으로 유효 투자율(effective permeability)을 제공하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 하나 이상의 경계 표면이고,

상기 유효 투자율(effective permeability)은, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 유효 투자율이며,

상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은 실질적으로 상기 도파관 구조물 내에서 전파되는 전자기파의 공간적으로 변화하는 유효 굴절률이며,

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트 및 출력 전자기 에너지를 전달하기 위한 출력 포트를 정의하며,

상기 출력 포트에 연결된 하나 이상의 전자기 수신기를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 28

장치로서, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 하나 이상의 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는 복수의 조절가능한 개별 전자기 응답들을 구비하고,

상기 복수의 조절가능한 개별 전자기 응답은, 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터를 제공하며,

상기 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 전도성 표면이고,

상기 조절 가능한 유효 매질 파라미터는, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 조절 가능한 유효 매질 파라미터이며,

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트 및 출력 전자기 에너지를 전달하기 위한 출력 포트를 정의하며,

상기 도파관 구조물은, 상기 출력 전자기 에너지의 실질적으로 분산되는 빔(diverging beam)을 제공하도록, 상기 입력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔에 응답하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 29

제 28항에 있어서,

상기 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터는 조절가능한 유효 유전율을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 30

제 28항에 있어서,

상기 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터는 조절가능한 유효 투자율을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 31

제 28항에 있어서,

상기 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터는 조절가능한 유효 굴절률을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 32

제 28항에 있어서,

상기 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터는 조절가능한 유효 웨이브 임피던스를 포함하는 것으로 하는 장치.

청구항 33

제 28항에 있어서,

상기 조절가능한 개별 전자기 응답들은 하나 이상의 외부 입력에 의해 조절가능한 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 34

제 33항에 있어서,

상기 하나 이상의 외부 입력은 하나 이상의 전압 입력을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 35

제 33항에 있어서,

상기 하나 이상의 외부 입력은 하나 이상의 광학 입력을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 36

제 33항에 있어서,

상기 하나 이상의 외부 입력은 외부 자기장을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 37

전자기 매질 파라미터의 패턴을 선택하는 단계; 및

선택된 전자기 매질 파라미터의 패턴에 실질적으로 대응하는 유효한 전자기 매질 파라미터의 패턴을 제공하도록, 하나 이상의 전도성 표면에 배치 가능한 복수의 개구들에 대한 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계를 포함하며,

상기 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계는, 회귀 분석과 룩업 테이블(lookup table) 중 어느 하나에 따라 결정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 38

제 37항에 있어서,

상기 하나 이상의 전도성 표면 내의 상기 복수의 개구들을 밀링(milling)하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 39

삭제

청구항 40

전자기 함수를 선택하는 단계; 및

유효한 매질 응답으로서 상기 전자기 함수를 제공하도록, 하나 이상의 전도성 표면에 배치 가능한 복수의 개구들에 대한 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계를 포함하며,

상기 전자기 함수는 도파관 빔 포커싱 함수인 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 41

삭제

청구항 42

삭제

청구항 43

삭제

청구항 44

제40항에 있어서,

상기 도파관 빔 포커싱 함수는 초점 거리를 정의하며, 상기 도파관 빔 포커싱 함수를 선택하는 단계는 상기 초점 거리를 선택하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 45

전자기 합수를 선택하는 단계; 및

유효한 매질 응답으로서 상기 전자기 합수를 제공하도록, 하나 이상의 전도성 표면에 배치 가능한 복수의 개구들에 대한 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계를 포함하며,

상기 전자기 합수는 안테나 어레이 위상 이동(antenna array phase-shifting) 함수인 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 46

전자기 합수를 선택하는 단계; 및

유효한 매질 응답으로서 상기 전자기 합수를 제공하도록, 하나 이상의 전도성 표면에 배치 가능한 복수의 개구들에 대한 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계를 포함하며,

상기 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계는, 회귀 분석과 룩업 테이블 중 어느 하나에 따라 결정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 47

전자기 매질 파라미터의 패턴을 선택하는 단계; 및

선택된 전자기 매질 파라미터의 패턴에 실질적으로 대응하는 유효한 전자기 매질 파라미터의 패턴을 제공하도록, 각각의 조절가능한 물리 파라미터를 갖는 복수의 개구들을 갖는 하나 이상의 전도성 표면에 대하여, 각각의 조절가능한 물리 파라미터의 각각의 값을 결정하는 단계를 포함하며,

상기 결정하는 단계는, 회귀 분석과 룩업 테이블 중 어느 하나에 따라 결정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 48

제 47항에 있어서,

상기 각각의 조절가능한 물리 파라미터는 하나 이상의 제어 입력의 함수이며, 상기 방법은,

상기 각각의 조절가능한 물리 파라미터의 결정된 각각의 값에 대응하는 하나 이상의 제어 입력을 제공하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 49

삭제

청구항 50

전자기 합수를 선택하는 단계; 및

유효한 매질 응답으로서 전자기 합수를 제공하도록, 각각의 조절가능한 물리 파라미터를 갖는 복수의 개구들을 갖는 하나 이상의 전도성 표면에 대하여, 각각의 조절가능한 물리 파라미터의 각각의 값을 결정하는 단계를 포함하며,

상기 결정하는 단계는, 회귀 분석과 룩업 테이블 중 어느 하나에 따라 결정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 51

제 50항에 있어서,

상기 각각의 조절가능한 물리 파라미터는 하나 이상의 제어 입력의 함수이며, 상기 방법은,

상기 각각의 조절가능한 물리 파라미터의 결정된 각각의 값에 대응하는 하나 이상의 제어 입력을 제공하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 52

삭제

청구항 53

제50항 또는 제51항에 있어서,

상기 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 경계 표면이고,

상기 도파관 구조물 내에 유효한 매질 응답을 제공하도록 상기 도파관 구조물의 입력 포트에 전자기 에너지를 전달하는 단계를 포함하며, 상기 유효한 매질 응답은 상기 도파관 구조물의 하나 이상의 경계 도체 내의 개구 패턴의 함수인 것을 특징으로 하는 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본원은 2008년 8월 22일에 출원된 가출원 번호 61/091,337로부터 우선권을 주장하며, 여기에서 참조로 도입된다.

[0002] 본 발명은 인위적 전자기 재료(artificial electromagnetic materials)로 기능하는 메타메타리얼(metamaterials)과 같은 인위적 구조 재료(artificially-structured materials)에 관한 것이다. 일 실시예에서는 무선주파수(RF) 마이크로웨이브 주파수에서의 전자기파 및/또는 적외선 또는 가시광 주파수와 같은 고주파수에 대응하여 표면 구조 및/또는 도파관 구조물(waveguide structure)이 제공된다. 일 실시예에서는 전자기 응답은 음의 굴절을 포함한다. 일 실시예에서는 전도성 표면에 패턴화된 메타메타리얼 소자를 포함하는 표면 구조물을 제공한다. 일 실시예에서는 도파 구조물(waveguiding structures)의 하나 이상의 경계 전도성 표면에 패턴화된 메타메타리얼 소자가 포함된 도파관 구조물을 제공한다.(예를 들면, 평면 도파관, 전송 라인(transmission line) 구조물 또는 단일 평면 유도 모드 구조물의 전도성 스트립(strips), 패치(patches), 평면의 경계)

배경 기술

[0003] 메타메타리얼과 같은 인위적 구조 재료는 종래의 재료의 전자기 성질을 확장할 수 있으며, 종래의 재료에서 달성하기 어려운 뛰어난 전자기 응답을 제공할 수 있다. 메타메타리얼은, 유전율, 투자율, 굴절률, 및 웨이브 임피던스(wave impedance) 등과 같은 전자기 파라미터의 그라디언트(gradient, 변화도) 또는 복합적인 이방성을 실현하여, 비가시성 클록(cloaks)(예를 들면, 여기서 참조로 포함되는, 미국 특허 출원번호 11/459728, J.Pendry 등의 "Electromagnetic cloaking method"를 참조) 및 GRIN 렌즈(예를 들면, 여기서 참조로 포함되는, 미국 특허 출원번호 11/658358, D.R Smith 등의 "Metamaterials"를 참조)와 같은 전자기 장치를 구현할 수 있다. 게다가 예를 들면 음성 굴절 매질(negatively refractive medium) 또는 부정 매질(indefinite medium)을 제공하는 음의 유전율 및/또는 음성 투자율을 갖도록 메타메타리얼을 제작하는 것이 가능하다.(즉, 텐서 부정 유전율(tensor-indefinite permittivity) 및/또는 투자율을 갖으며; 예를 들면, 여기서 참조로 포함되는, 미국 특허 출원번호 10/525191의 D.R Smith 등의 "Indefinite materials"를 참조함)

[0004] 인덕턴스(inductance)를 위한 션트 캐패시턴스(shunt capacitance)와 캐패시턴스를 위한 직렬 인덕턴스를 교환함으로써 형성되는 "음 인덱스(negative index)" 전송 라인의 기본 개념은 예를 들면, Pozar, Microwave Engineerin(Wiley 3d Ed.)에 나타나있다. 메타메타리얼에 접근하는 전송 라인은 Itoh와 Caloz(UCLA) 및 Eleftheriades and Balmain(Toronto)이 분석하였다. 예를 들면, Elek 등의 "A two-dimensional uniplanar transmission-line metamaterial with a negative index of refraction", New Journal of Physics(Vol.7, Issue 1pp.163(2005)) 및 미국 특허번호 6,859,114를 참고한다.

[0005] Caloz와 Itoh가 분석한 전송 라인(TLs)은 음 인덱스 매질의 TL 등가물(equivalent)을 얻기 위한 일반적인 TL의 직렬 인덕턴스 및 션트 캐패시턴스를 교환하는 것에 기반을 둔다. 션트 캐패시턴스 및 직렬 인덕턴스는 항상 존재하기 때문에, 항상 저주파수에서의 "후진파(backward wave)" 및 고주파수에서의 일반적 진행파(forward wave)를 생성하는 TL의 주파수 의존 이중 거동이 있다. 이러한 이유 때문에 Caloz와 Itoh는 메타메타리얼 TL을 "복합 우좌향(composite right/left handed)" TL, 또는 CRLH TL이라 칭하였다. CRLH TL은 일차원으로 기능하는 TL을 생산하기 위해 하나의 캐패시터 및 인덕터, 또는 등가회로 소자를 함께 사용하여 형성된다. CRLH TL의 개념

은 Caloz와 Itoh 및 Grbic와 Eleftheriades에 의해 이차원 구조로 확장되었다.

- [0006] 마이크로스트립 회로 소자로서의 상보적 분할 링 공진기(complementary split ring resonator, CSRR)는 F.Falcone 등의 "Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials", Phys.Rev.Lett.V93, Issue 19, 197401에서 제안되었다. CSRR은 동일 그룹의 마이크로스트립 구조의 필터로 설명되었다. 예를 들어 Marques 등의 "Ab initio analysis of frequency selective surfaces based on conventional and complementary split ring resonators", Journal of optics A: Pure and Applied Optics, Volume 7, Issue 2, pp. S38-S43(2005)와, Bonache 등의 "Microstrip Bandpass Filters With Wide Bandwidth and Compact Dimensions"(Microwave and Optical Tech. Letters (46:4, p,343 2005))를 참고한다. 마이크로스트립의 접지면에 패터닝된 소자로서의 CSRR에 사용에 대하여 조사되었다. 이 그룹들은 음 인덱스 매질의 마이크로스트립 등가물을 설명하며, 접지면에 패터닝된 CSRR 및 상층 도체의 용량성 브레이크(capacitive breaks)를 사용하여 형성된다. 이 작업은 코플래너(coplanar) 마이크로스트립 라인으로도 확장되었다.
- [0007] 분할 링 공진기(SRR)는 실질적으로 평면 외 자기장에 응답한다(즉, SRR 축을 따른 방향으로 응답함). 반면에 상보적 SRR(CSRR)은 실질적으로 평면 외 전기장에 응답한다(즉, CSRR 축을 따른 방향으로 응답함). CSRR은 SRR의 "Babinet" 이중으로 여겨지며, 여기에 개시된 실시예는 전도성 표면에 삽입된 CSRR 소자, 예를 들면, 금속 시트(sheets)에 형성된 개구, 에칭(etching), 천공(perforation)을 포함한다. 여기에 개시된 몇 가지 응용에서, CSRR 소자에 삽입된 전도성 표면은 평면 도파관, 마이크로스트립 라인 등과 같은 도파관 구조물을 위한 경계 도체이다.
- [0008] 분할 링 공진기(SRRs)가 실질적으로 평면 외 자기장과 연결되는 반면, 몇몇 메타머티리얼 응용에서는 실질적으로 평면 내 전기장과 연결한 소자로 사용된다. 이 대체 소자는 전기 LC(electric LC, ELC) 공진기를 나타내며, 예시되는 배열은 D.Schurig 등의 "Electric-field coupled resonators for negative permittivity metamaterials", Appl.Phys.Lett 88,041109 (2006)에 나타나있다. 전기 LC(ELC) 공진기가 실질적으로 평면 내 전기장과 연결하는 동안, 상보적 전기 LC(CELC) 공진기는 실질적으로 평면 내 자기장에 응답한다. CELC 공진기는 ELC 공진기의 "Babinet" 이중으로 여겨지며, 여기에 개시된 실시예는 전도성 표면에 삽입된 CELC 공진기 소자(CSRR 소자를 대체하거나 또는 그에 추가됨), 예를 들면, 금속 시트에 형성된 개구, 에칭, 천공을 포함한다. CSRR 및/또는 CELC 소자에 삽입된 전도성 표면은 평면 도파관, 마이크로스트립 라인 등과 같은 도파관 구조물을 위한 경계 도체이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0009] 본 발명은 표면과 도파관을 위한 메타머티리얼을 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

- [0010] 본원에 개시된 몇 가지 실시예는 도파관 구조물에 유효 투자율을 제공하도록 상보적 전기 LC(complementary electric LC, CELC) 메타머티리얼을 사용한다. 여러 실시예에서 유효(상대) 투자율은 1보다 크거나 작거나, 0보다 크거나 작다. 대체하거나 또는 추가적으로, 본원에 개시된 몇가지 실시예는 평면 도파관 구조물에 유효 유전율을 제공하도록 상보적 분할 링 공진기(CSRR) 메타머티리얼 소자를 사용한다. 여러 실시예에서 유효(상대) 유전율은 1보다 크거나 작거나, 0보다 크거나 작다.
- [0011] 예시적인 여러 실시예의 비제한적인 특징은 다음을 포함한다:
- [0012] 유효 유전율, 투자율 또는 굴절률은 0에 가까운 구조,
- [0013] 유효 유전율, 투자율, 굴절률은 0보다 작은 구조,
- [0014] 유효 유전율, 투자율은 부정 텐서인 구조(즉, 양 또는 음의 고유값을 모두 갖는다.),
- [0015] 예를 들면 빔 포커싱, 콜리메이팅(collimating). 조향과 같은 경사진 구조,
- [0016] 예를 들면 삽입손실(insertion loss)를 감소시키기 위한 임피던스 매칭 구조,
- [0017] 안테나 어레이(antenna array)를 위한 피드 구조(feed structure),
- [0018] 예를 들면 임피던스 매칭, 굴절 엔지니어링, 분산 제어를 목적으로 하는, 각각의 표면 또는 도파관의 자기적 및

전기적 응답을 실질적으로 독립적으로 배열하기 위한 CELC와 같은 상보적 메타머티리얼 소자 및 CSRR의 사용,

[0019] 대응하는 조절가능한 전자기 응답을 갖는 장치를 제공하도록 조절가능한 물리 파라미터를 갖는 상보적 메타머티리얼 소자의 사용(예를 들면 빔 조향 장치의 조향각 또는 빔 포커싱 장치의 초점 거리를 맞추는 것), 그리고

[0020] RF, 마이크로웨이브, 또는 보다 높은 주파수(예를 들면 밀리미터, 적외선, 및 가시광 파장)에서 작동되는 표면 구조 및 도파관 구조물.

실시예의 장치는 전도성 표면을 포함하고,

상기 전도성 표면은, 전도성 표면내에 개구들을 포함하여, 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 복수의 개별 전자기 응답은, 전도성 표면에 평행한 방향으로 유효 투자율(effective permeability)을 제공할 수 있다.

상기 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 경계 표면일 수 있다.

상기 유효 투자율은, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 유효 투자율일 수 있다.

상기 유효 투자율은 실질적으로 0일 수 있다.

상기 유효 투자율은 실질적으로 0보다 작을 수 있다.

상기 전도성 표면과 평행한 방향으로의 유효 투자율은, 상기 전도성 표면과 평행한 제 1 방향으로의 제 1 유효 투자율이고, 상기 복수의 개별 전자기 응답들 각각은 전도성 표면에 평행하고 상기 제 1 방향에 수직인 제 2 방향으로의 제 2 유효 투자율을 더 제공할 수 있다.

상기 제 1 유효 투자율은 실질적으로 제 2 유효 투자율과 동일할 수 있다.

상기 제 1 유효 투자율은 실질적으로 제 2 유효 투자율과는 다를 수 있다.

상기 제 1 유효 투자율은 0보다 크고, 상기 제 2 유효 투자율은 0보다 작을 수 있다.

실시예의 장치는, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 전도성 표면은, 전도성 표면내에 개구들을 포함하여, 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 복수의 개별 전자기 응답은, 실질적으로 0 이하의 유효 굴절률을 제공할 수 있다.

실시예의 장치는, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 전도성 표면은, 전도성 표면내에 개구들을 포함하여, 각 개구들에 대응하는 복수의 개별 전자기 응답들을 구비하고, 복수의 개별 전자기 응답은, 공간적으로 변화하는 유효 굴절률을 제공할 수 있다.

상기 하나 이상의 전도성 표면은 도파관 구조물의 하나 이상의 경계 표면이고, 상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은 실질적으로 상기 도파관 구조물 내에서 전파되는 전자기파의 공간적으로 변화하는 유효 굴절률일 수 있다.

상기 도파관 구조물은 실질적으로 평면적인 2D 도파관 구조물일 수 있다.

상기 도파관 구조물은 입력 전자기 에너지를 받기 위한 입력 포트를 정의할 수 있다.

상기 입력 포트는 입력 전자기 에너지의 비반사(nonreflection)를 위한 입력 포트 임피던스(input port impedance)를 정의할 수 있다.

상기 복수의 개별 전자기 응답들 각각은, 유효 웨이브 임피던스(effective wave impedance)를 더 제공하고, 상기 유효 웨이브 임피던스는, 입력 포트에서의 입력 포트 임피던스로 점진적으로 변화할(gradually change) 수 있다.

상기 도파관 구조물은 출력 전자기 에너지를 전달하기 위한 출력 포트를 정의할 수 있다.

상기 출력 포트는 출력 전자기 에너지의 비반사를 위한 출력 포트 임피던스(output port impedance)를 정의할 수 있다.

상기 복수의 개별 전자기 응답 각각은, 유효 웨이브 임피던스를 더 제공하고, 상기 유효 웨이브 임피던스는 출

력 포트에서의 출력 포트 임피던스로 점진적으로 변화할(gradually change) 수 있다.

상기 도파관 구조물은, 입력빔과는 실질적으로 다른 출력빔 방향을 정의하는 출력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔을 제공하도록, 입력빔 방향을 정의하는 입력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔에 응답할 수 있다.

상기 도파관 구조물은 입력 포트로부터 출력 포트로 향하는 축방향을 정의하며, 상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은, 입력 포트와 출력 포트 사이에서, 축방향에 수직인 방향을 따라 실질적으로 선형 그래디언트를 포함할 수 있다.

상기 도파관 구조물은, 출력 전자기 에너지의 실질적으로 수렴하는 빔(converging beam)을 제공하도록, 입력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔에 응답할 수 있다.

상기 도파관 구조물은 입력 포트로부터 출력 포트로 향하는 축방향을 정의하며, 상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은, 입력 포트와 출력 포트 사이에서, 축방향에 수직인 방향을 따라 실질적으로 오목한 형상(concave)의 변동을 포함할 수 있다.

상기 도파관 구조물은, 출력 전자기 에너지의 실질적으로 분산되는 빔(diverging beam)을 제공하도록, 입력 전자기 에너지의 실질적으로 평행한 빔에 응답할 수 있다.

상기 도파관 구조물은 입력 포트로부터 출력 포트로 향하는 축방향을 정의하며, 상기 공간적으로 변화하는 유효 굴절률은, 입력 포트와 출력 포트 사이에서, 축방향에 수직인 방향을 따라 실질적으로 볼록한 형상(convex)의 변동을 포함할 수 있다.

상기 출력 포트에 연결된 하나 이상의 패치 안테나(patch antennas)를 더 포함할 수 있다.

상기 입력 포트에 연결된 하나 이상의 전자기 방사기를 더 포함할 수 있다.

상기 출력 포트에 연결된 하나 이상의 전자기 수신기를 더 포함할 수 있다.

실시예의 장치는, 하나 이상의 전도성 표면을 포함하고,

상기 전도성 표면은, 전도성 표면내에 개구들을 포함하여, 각 개구들에 대응하는 복수의 조절가능한 개별 전자기 응답들을 구비하고, 복수의 조절가능한 개별 전자기 응답은, 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터를 제공할 수 있다.

상기 전도성 표면은 도파관 구조물(waveguide structure)의 전도성 표면일 수 있다.

상기 조절 가능한 유효 매질 파라미터는, 실질적으로 상기 도파관 구조물의 내부에서(within the waveguide structure) 상기 도파관 구조물과 평행하게 전파되는(parallel to the waveguide structure) 전자기파의 조절 가능한 유효 매질 파라미터일 수 있다.

상기 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터는 조절가능한 유효 유전율을 포함할 수 있다.

상기 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터는 조절가능한 유효 투자율을 포함할 수 있다.

상기 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터는 조절가능한 유효 굴절률을 포함할 수 있다.

상기 하나 이상의 조절가능한 유효 매질 파라미터는 조절가능한 유효 웨이브 임피던스를 포함할 수 있다.

상기 조절가능한 개별 전자기 응답들은 하나 이상의 외부 입력에 의해 조절가능할 수 있다.

상기 하나 이상의 외부 입력은 하나 이상의 전압 입력을 포함할 수 있다.

상기 하나 이상의 외부 입력은 하나 이상의 광학 입력을 포함할 수 있다.

상기 하나 이상의 외부 입력은 외부 자기장을 포함할 수 있다.

실시예의 방법은 전자기 매질 파라미터의 패턴을 선택하는 단계 및 선택된 전자기 매질 파라미터의 패턴에 실질적으로 대응하는 유효한 전자기 매질 파라미터의 패턴을 제공하도록, 하나 이상의 전도성 표면에 배치 가능한 복수의 개구들에 대한 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

실시예는 하나 이상의 전도성 표면 내의 복수의 개구들을 밀링(milling)하는 단계를 더 포함할 수 있다.

상기 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계는, 회귀 분석과 룩업 테이블(lookup table) 중 어느 하나에 따라

결정하는 단계를 더 포함할 수 있다.

실시예는 전자기 함수를 선택하는 단계; 및 유효한 매질 응답으로서 전자기 함수를 제공하도록, 하나 이상의 전도성 표면에 배치 가능한 복수의 개구들에 대한 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

상기 전자기 함수는 도파관 빔 조향 함수일 수 있다.

상기 도파관 빔 조향 함수는 빔 편향각을 정의하며, 도파관 빔 조향 함수를 선택하는 단계는 빔 편향각을 선택하는 단계를 포함할 수 있다.

상기 전자기 함수는 도파관 빔 포커싱 함수일 수 있다.

상기 도파관 빔 포커싱 함수는 초점 거리를 정의하며, 상기 도파관 빔 포커싱 함수를 선택하는 단계는 초점 거리를 선택하는 단계를 포함할 수 있다.

상기 전자기 함수는 안테나 어레이 위상 이동(antenna array phase-shifting) 함수일 수 있다.

상기 각각의 물리 파라미터를 결정하는 단계는, 회귀 분석과 룩업 테이블 중 어느 하나에 따라 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

실시예의 방법은 전자기 매질 파라미터의 패턴을 선택하는 단계; 및 선택된 전자기 매질 파라미터의 패턴에 실질적으로 대응하는 유효한 전자기 매질 파라미터의 패턴을 제공하도록, 각각의 조절가능한 물리 파라미터를 갖는 복수의 개구들을 갖는 하나 이상의 전도성 표면에 대하여, 각각의 조절가능한 물리 파라미터의 각각의 값을 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

상기 각각의 조절가능한 물리 파라미터는 하나 이상의 제어 입력의 함수이며, 상기 방법은 각각의 조절가능한 물리 파라미터의 결정된 각각의 값에 대응하는 하나 이상의 제어 입력을 제공하는 단계를 포함할 수 있다.

상기 결정하는 단계는, 회귀 분석과 룩업 테이블 중 어느 하나에 따라 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

실시예의 방법은 전자기 함수를 선택하는 단계; 및 유효한 매질 응답으로서 전자기 함수를 제공하도록, 각각의 조절가능한 물리 파라미터를 갖는 복수의 개구들을 갖는 하나 이상의 전도성 표면에 대하여, 각각의 조절가능한 물리 파라미터의 각각의 값을 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

상기 각각의 조절가능한 물리 파라미터는 하나 이상의 제어 입력의 함수이며, 상기 방법은, 각각의 조절가능한 물리 파라미터의 결정된 각각의 값에 대응하는 하나 이상의 제어 입력을 제공하는 단계를 포함할 수 있다.

상기 결정하는 단계는, 회귀 분석과 룩업 테이블 중 어느 하나에 따라 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

실시예의 방법은 도파관 구조물 내에 유효한 매질 응답을 제공하도록 도파관 구조물의 입력 포트에 전자기 에너지를 전달하는 단계를 포함하며, 상기 유효한 매질 응답은 상기 도파관 구조물의 하나 이상의 경계 도체 내의 개구 패턴의 함수일 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0021] 본 발명의 특징 및 이점들은 도면과 연관된 예시적이고 비제한적인 예로서 구현된 다음의 상세한 설명과 관련하여 더 완전하게 이해할 수 있다.

도 1 내지 도 1d는 도파형 상보적 ELC(자기 응답) 구조를 도시하고(도 1), 그에 관한 유효 유전율, 투자율, 웨이브 임피던스 및 굴절률의 그래프를 도시한다(도 1a 내지 도 1d).

도 2 내지 도 2d는 도파형 상보적 SRR(전기 응답) 구조를 도시하고(도 2), 그에 관한 유효 유전율, 투자율, 웨이브 임피던스 및 굴절률의 그래프를 도시한다(도 2a 내지 도 2d).

도 3 내지 도 3d는 CSRR 및 CELC 소자 둘 모두를 사용한 도파형 구조를 도시하고(예를 들면 유효 음 인덱스를 제공하기 위함)(도 3), 그에 관한 유효 유전율, 투자율, 웨이브 임피던스 및 굴절률의 그래프를 도시한다(도 3a 내지 도 3d).

도 4 내지 도 4d는 CSRR 및 CELC 소자 둘 모두를 사용한 도파형 구조를 도시하고(예를 들면 유효 음 인덱스를 제공하기 위함)(도 4), 그에 관한 유효 유전율, 투자율, 웨이브 임피던스 및 굴절률의 그래프를 도시한다(도 4a 내지 도 4d).

도 5 내지 도 5d는 마이크로스트립 상보적 ELC구조를 도시하고(도 5), 그에 관한 유효 유전율, 투자율, 웨이브

임피던스 및 굴절률의 그래프를 도시한다(도 5a 내지 도5d).

도 6 내지 도 6d는 CSRR 및 CELC 소자 둘 모두를 사용한 마이크로스트립 구조를 도시하고(예를 들면 유효 음인택스를 제공하기 위함)(도 6), 그에 관한 유효 유전율, 투자율, 웨이브 임피던스 및 굴절률의 그래프를 도시한다(도 6a 내지 도 6d).

도 7은 2D 평면 도파관 구조물의 예시적인 CSRR 어레이(array)를 도시한다.

도 8a는 CSRR 소자의 회복된 유전율 및 투자율을 도시하고, 도 8b는 CSRR 소자의 기하학적 파라미터에서 회복된 유전율 및 투자율의 의존성을 도시한다.

도 9a 및 도 9b는 빔 조향 및 빔 포커싱 적용한 각각의 평면 도파관의 2D 구현 필드 데이터(field data)를 도시한다.

도 10a 및 도 10b는 부정 매질을 제공하는 2D 평면 도파관 구조물로서 예시되는 CELC 어레이를 도시한다.

도 11a 및 도 11b는 패치 안테나의 어레이를 위한 피드 구조로 배치되는 도파관 기반 굴절률 렌즈를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0022] 본 발명에서 개시된 여러 실시예는 분할 링 공진기(SRRs) 및 전기 LC 공진기(ELCs)와 같은 본래 메타머티리얼 소자의 Babinet 보체로 여겨지는 "상보적(complementary)" 메타머티리얼 소자를 포함한다.

[0023] SRR 소자는 전자기파의 자기장으로 실질적 자기 응답을 생산하는 인위적 자기 쌍극 "원자"로서 기능한다. 그것의 Babinet "이중" 상보적 분할 링 공진기(CSRR)는, 도체 표면에 삽입되고 전자기파의 전기장으로 실질적 전기 응답을 생산하는 전기 쌍극 "원자"로서 기능한다. 특정 예시에서 여러 구조에 CSRR 소자를 배치한 것을 여기서 설명하는 반면, 다른 실시예는 대체적인 소자를 대신하여 사용한다. 예를 들면, 평면 외 자기장으로 실질적 자기 응답을 갖는 어떤 실질적 평면 전도성 구조(이하 SRR이 예가 되는 경우 "M-타입 소자"로 나타냄)는 전도성 표면 내에서 실질적 동등 형상 개구, 예칭, 보이드(void) 등의 보체 구조(이하 CSRR이 예가 되는 경우 "상보적 M-타입 소자"로 나타냄)로 정의할 수 있다. 이 때 개구는 밀링(milling)을 통해 형성될 수 있다. 상보적 M-타입 소자는 Babinet 이중 응답, 즉 평면 외 전기장으로 실질적 전기 응답을 갖는다. 여러 M-타입 소자(대응하는 상보적 M-타입 소자를 각각 정의함)는 다음을 포함한다 : 전술한 분할 링 공진기(단일 분할 링 공진기(SSRRs), 이중 분할 링 공진기(DSRRs), 다중 갭(gap)을 갖는 분할 링 공진기를 포함), 오메가형(omega-shaped) 소자(C.R.Simovski와 S.He, arXiv:physics/0210049와 비교), 컷-와이어-페어(cut-wire-pair) 소자(G.Dolling 등의 Opt.Lett. 30, 3198(2005)와 비교), 또는 인가된 자기장에 반응하여 실질적으로 자기 분극 된(예를 들면 패러데이 유도(faraday induction)) 다른 전도성 표면.

[0024] ELC 소자는 전자기파의 전기장으로 실질적 전기 응답을 생산하는 인위적 전기 쌍극 "원자"로서 기능한다. 그것의 Babinet "이중" 상보적 전기 LC(CELC)는 도체 표면에 삽입되고 전자기파의 자기장으로 실질적 자기 응답을 생산하는 자기 쌍극 "원자"로서 기능한다. 특정 예시에서 여러 구조에 CELC 소자를 배치한 것을 설명한 반면, 다른 실시예는 대체적인 소자를 대신하여 사용하였다. 예를 들면, 평면 내 전기장으로 실질적 전기 응답을 갖는 어떤 실질적 평면 전도성 구조(이하 ELC 소자가 예가 되는 경우 "E-타입 소자"로 나타냄)는 전도성 표면 내에 실질적 동등 형상 개구, 예칭, 보이드 등의 보체 구조(이하 CELC가 예가 되는 경우 "상보적 E-타입 소자"로 나타냄)로 정의할 수 있다. 상보적 E-타입 소자는 Babinet 이중 응답, 즉 평면 내 자기장으로 실질적 자기 응답을 갖는다. 여러 E-타입 소자(대응하는 상보적 E-타입 소자를 각각 정의함)는 다음을 포함한다 : 반대 방향의 루프와 연결된 캐패시터형 구조(D.Shurig 등의 "Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials", Appl.Phys.Lett. 88,041109(2006) 및 H.T. Cen 등의 "Complementary planar terahertz metamaterials", Opt.Exp. 15,1084(2007)에 나타난 여러 다른 예시와 함께, 도 1,3,4,5,6, 및 10a에서 처럼), 폐쇄링(closed-ring) 소자(R.Liu 등의 "Broadband gradient index optics based on non-resonant metamaterials" unpublished; 첨부된 부록을 참고), I-형 또는 "도그 본(dog-bone)" 구조(R.Liu 등의 "Broadband ground-plane cloak", 앞서 인용됨), 또는 인가된 전기장에 반응하여 실질적으로 전기 분극 된 다른 전도성 표면. 여러 실시예에서, 상보적 E-타입 소자는 평면 내 자기장으로 실질적인 등방성 자기 응답, 또는 평면 내 자기장으로 실질적인 이방성 자기 응답을 갖는다.

[0025] M-타입 소자가 실질적 (평면 외) 자기 응답을 가지는 반면, 일 실시예에서는 M-타입 소자는 실질적이지만 (예를 들면 더 작은 민감도를 가진) 자기 응답보다 작은 크기인 (평면 내) 전기 응답을 추가적으로 갖는다. 이러한 실시예에서, 대응하는 상보적 M-타입 소자는 실질적 (평면 외) 전기 응답과, 역시 실질적이지만 (예를 들면 더 작

은 민감도를 가진) 전기 응답보다 작은 크기인 (평균 내) 자기 응답을 추가적으로 갖는다. 유사하게, E-타입 소자가 실질적 (평균 내) 전기 응답을 가지는 반면, 일 실시예에서는 E-타입 소자는 실질적이지만 (예를 들면 더 작은 민감도를 가진) 전기 응답보다 작은 크기인 (평균 외) 자기 응답을 추가적으로 갖는다. 이러한 실시예에서, 대응하는 상보적 E-타입 소자는 실질적 (평균 내) 자기 응답과, 역시 실질적이지만 (예를 들면 더 작은 민감도를 가진) 자기 응답보다 작은 크기인 (평균 외) 전기 응답을 추가적으로 갖는다.

[0026] 일부 실시예는 앞에서 설명한 내용과 같이 상보적 소자가 삽입된 하나 이상의 경계 전도성 표면을 가진 도파관을 제공한다. 도파관에 대한 설명에서, 일반적으로 용적 측정 물질과 관련된 양의 정량적 할당 - 전기적 유전율, 자기적 투자율, 굴절률, 웨이브 임피던스 등 - 은 상보적 구조를 사용하여 패턴된 평면 도파관 및 마이크로스트립 라인으로 정의된다. 예를 들면, 도파관의 하나 이상의 경계 표면이 패턴된 CSRRs와 같은 하나 이상의 상보적 M-타입 소자는 유효 전기적 유전율을 갖는 것으로 특징지어진다. 그 중에서도, 유효 유전율은 0 내지 1 에 포함된 값뿐만 아니라 큰 양 또는 음의 값을 나타낼 수 있다. 장치는, 앞으로 설명될 것처럼, M-타입에 의해 나타나는 특징의 범위에서 적어도 부분적으로 발전될 수 있다. 이 할당을 정량적으로 만들기 위한 수치 및 실험적 기술이 잘 특징지어진다.

[0027] 몇 가지 실시예에서 대체하거나 또는 추가적으로, 위에서 설명한 것과 같이 동일한 방식으로 도파관 구조물에 패턴된 CELCs와 같은 상보적 E-타입 소자는 유효 자기 투자율로 특징지어지는 자기 응답을 갖는다. 상보적 E-타입 소자는 따라서 0 내지 1 에서 변화하는 유효 투자율뿐만 아니라 유효 투자율의 큰 양 또는 음의 값을 나타낼 수 있다. (이러한 사실에 따라, 실수부(real part)가 일반적으로 상보적 E-타입 및 상보적 M-타입 구조 둘 모두의 유전율 및 투자율의 기재로 설명되며, 본 명세서는 그 외 통상의 기술자에게 자명한 사항은 제외한다) 공진기의 두가지 타입은 도파관에 대한 설명에서 구현될 수 있기 때문에, (유전율 및 투자율 모두 0보다 작은) 음의 굴절률을 포함하고, 이 구조들을 통해 웨이브 전달에 있어 상당한 컨트롤을 하여, 사실상 어떤 유효한 물질 조건도 달성될 수 있다. 예를 들면, 몇 가지 실시예는 실질적으로 변형 광 물질에 대응하여 유효한 구조 파라미터를 제공한다.(예를 들면 J.Pendry 등의 "Elecromagnetic cloaking method" U.S.Patent App.No. 11/459728에 기술된 바와 같은 변환 광학 방식에 따라 제공됨)

[0028] 상보적 E- 및/또는 M-타입 소자의 다양한 결합을 사용함으로써, 더 다양한 장치를 형성할 수 있다. 예를 들어, 사실상 CRLH TLs를 사용한 Caloz와 Itoh가 입증한 모든 장치들은 여기에 설명되는 도파 메타머티리얼과 유사한 물건을 갖고 있다. 가장 최근에, Silvereinha와 Engheta는 유효 굴절률 (또는 전파상수(propagation constant))이 거의 0인(CITE) 영역을 형성하는 것을 기반으로 한 흥미있는 커플러(coupler)를 제안하였다. 이러한 매질의 등가물은 도파관 구조물의 경계 표면에 상보적 E- 및/또는 M-타입 소자의 패터닝함으로써 형성될 수 있다. 도면은 어떻게 예시적인 비제한 구조가 구현되는지에 대하여, 몇 가지 설명과 제로 인덱스 커플러와 패턴화된 도파관을 사용한 다른 장치들의 예시적이고 비제한적인 구현에 대하여 보여주고 설명하고 있다.

[0029] 도 1은 예시적이고 비제한적인 도파형 상보적 ELC(자기 응답)구조를 도시하며, 도 1a 내지 도 1d는 유효 인덱스, 웨이브 임피던스, 유전율 및 투자율과 관련된 대표적인 그래프를 도시하고 있다. 도시된 예가 오직 단일 CELC 소자에서만 도시되는 반면에 다른 실시예들은 도파관의 하나 이상의 표면에 배열된 복수의 CELC(또는 다른 상보적 E-타입) 소자를 제공한다.

[0030] 도 2는 예시적이고 비제한적인 도파형 상보적 SRR(전기응답)구조를 도시하며, 도 2a 내지 도 2d는 유효 인덱스, 웨이브 임피던스, 유전율 및 투자율과 관련된 대표적인 그래프를 도시하고 있다. 도시된 예가 오직 단일 CSRR 소자에서만 도시하는 반면에, 다른 실시예들은 도파관의 하나 이상의 표면에 배열된 복수의 CSRR 소자(또는 다른 상보적 M-타입) 소자를 제공한다.

[0031] 도 3은 평면 도파관의 반대 표면에 패턴된 CSRR 및 CELC 둘 모두를 사용한 (예를 들면 유효 음 인덱스를 제공하기 위해) 예시적이고 비제한적인 도파형 구조를 도시하며, 도 3a 내지 도 3d는 유효 인덱스, 웨이브 임피던스, 유전율 및 투자율과 관련된 대표적인 그래프를 도시하고 있다. 도시된 예가 오직 도파관의 첫번째 표면 경계에 단일 CELC 소자와 도파관의 두번째 표면 경계에 단일 CSRR 소자만 도시하는 반면에, 다른 실시예들은 도파관 구조물의 하나 이상의 표면에 배열된 복수의 상보적 E- 및/또는 M-타입 소자를 제공한다.

[0032] 도 4는 평면 도파관의 동일 표면에 패턴된 CSRR 및 CELC(예를 들면 유효 음 인덱스를 제공하는)소자 둘 모두를 사용한 예시적이고 비제한적인 도파형 구조를 도시하며, 도 4a 내지 도 4d는 유효 인덱스, 웨이브 임피던스, 유전율 및 투자율과 관련된 대표적인 그래프를 도시하고 있다. 도시된 예가 오직 도파관의 첫번째 표면 경계에 단일 CELC 소자 및 단일 CSRR 소자만 도시하는 반면에, 다른 실시예들은 도파관 구조물의 하나 이상의 표면에 배열된 복수의 상보적 E- 및/또는 M-타입 소자를 제공한다.

- [0033] 도 5는 예시적인 마이크로스트립 상보적 ELS 구조를 도시하며, 도 5a 내지 도 5d는 유효 인덱스, 웨이브 임피던스, 유전율 및 투자율과 관련된 대표적인 그래프를 도시하고 있다. 도시된 예가 오직 마이크로스트립 구조의 접지면에 단일 CELC 소자만 도시하는 반면에, 다른 실시예들은 마이크로스트립 구조 일부 또는 마이크로스트립 구조 접지면 일부의 하나 또는 둘 모두에 배열된 복수의 CELC(또는 상보적 E-타입) 소자를 제공한다.
- [0034] 도 6은 CSRR 및 CELC 소자(예를 들면 유효 음 인덱스를 제공함)를 사용한 예시적이고 비제한적인 마이크로스트립 라인을 도시하며, 도 6a 내지 도 6d는 유효 인덱스, 웨이브 임피던스, 유전율 및 투자율과 관련된 대표적인 그래프를 도시하고 있다. 도시된 예가 오직 마이크로스트립 구조의 접지면에 단일 CSRR 소자 및 두개의 CELC 소자만 도시하는 반면에, 다른 실시예들은 마이크로스트립 구조 일부 또는 마이크로스트립 구조 접지면 일부의 하나 또는 둘 모두에 배열된 복수의 상보적 E- 및/또는 M-타입 소자를 제공한다.
- [0035] 도 7은 2D 도파관 구조물의 CSRR 어레이의 사용을 도시하고 있다. 일 실시예에서 2D 도파관 구조물은 임피던스 매칭, 굴절 엔지니어링, 분산 제어와 같은 기능성을 구현하도록 상보적 E- 및/또는 M-타입 소자를 사용하여 패턴된 경계 표면(예를 들면 도 7에 도시된 상부 또는 하부 금속)을 갖는다.
- [0036] 굴절 엔지니어링의 예로서, 도 7의 CSRR 구조는 굴절률 분포 빔 조향 및 포커싱 구조 둘 모두를 형성하는데 이용된다. 도 8a는 대표적인 단일 CSRR과 (도파관 형상 내의) CSRR에 대응하는 회복된 유전율 및 투자율을 도시한다. CSRR 설계의 파라미터를 변경함으로써 인덱스 및/또는 임피던스는 도 8b에 도시된 것처럼 조정된다.
- [0037] 입사빔의 가로 방향을 따라 가해진 굴절률의 실질적인 선형 그래디언트를 이용한 CSRR 구조는 도 7에 도시된 것처럼 배치되어 있으며, 입사빔과 다른 각으로 조향된 방출빔을 생산한다. 도 9a는 2D에 구현된 평면 도파관 빔 조향 구조의 대표적인 필드 데이터를 도시한다. 필드 매핑(mapping) 장치는 문헌에 상당히 자세히 설명되어 있다.[B.J.Justice, J.J. Mock, L.Guo, A.Degiron, D.Schurig, D.R.Smith의 "Spatial mapping of the internal and external electromagnetic fields of negative index metamaterials", Optics Express, vol.14,p.8694(2006)]. 마찬가지로 CSRR 어레이에 입사빔의 가로방향에 따라 포물선의 굴절률 그래디언트를 구현하는 것은 예를 들어, 도 9b에서 도시된 것과 같이 포커싱 렌즈를 생산한다. 더 일반적으로 오목 함수(포물선 또는 다른 형태)의 가로 인덱스 프로파일은 도 9b에 도시된 것과 같이 (양의 초점 거리에 대응하여) 양의(positive) 포커싱 효과를 제공한다; 볼록 함수(포물선 또는 다른형태)의 가로 인덱스 프로파일은 (예를 들어, 평행빔을 받고 발산빔을 전달하는 음의 초점 거리에 대응하여) 음의(negative) 포커싱 효과를 제공한다. 메타머티리얼 소자에서의 실시예는 조절가능한 메타머티리얼 소자를 포함하고(아래에서 논의할 것임), 실시예는 대응하여 조절가능한 전자기적 기능(예를 들면 빔 조향, 빔 포커싱 등)을 갖는 장치를 제공한다. 따라서 예를 들면, 빔 조향 장치는 적어도 첫번째 또는 두번째 굴절각을 제공하기 위하여 조절될 것이다; 빔 포커싱 장치는 적어도 첫번째 또는 두번째 초점 거리 등을 제공하기 위해 맞춰질 것이다. CELCs로 형성된 2D 매질의 예는 도 10a, 10b에 도시되어 있다. 여기에서, CELCs의 평면 내 이방성은 다른 평면 내 요소가 양(positive)인 반면에 투자율의 첫번째 평면 내 요소가 음(negative)인 부정 매질을 형성하기 위해 사용된다. 이와 같은 매질은 실험적으로 얻어진 도 10b의 필드 맵에서 도시된 것과 같이 라인 소스(line source)로부터 파의 부분적 리포커싱(refocusing)을 생산한다. 벌크 부정 매질 포커싱 특성은 이미 알려져있다[D.R.Smith, D.schurin, J.J.Mock, P.Kolinko, P.Rye의 "Applied Physics Letters, vol.84 P2244(2004)]. 실험은 입증된 설계 조건 도면의 세트에 도시되며, 이방성 및 그래디언트를 포함하는 복잡한 상관관계를 만들어낼 수 있다.
- [0038] 도 11a 및 11b에서 도파관 기반 굴절률 분포 구조(예를 들면 도 7 및 10a에 따라, 상보적 E- 및/또는 M-타입 소자를 포함하는 도체 경계를 가짐)는 패치 안테나의 어레이를 위한 피드 구조로서 배치된다. 도 11a 및 11b의 예시적인 실시예에서 피드 구조는 단일 소스로부터의 웨이브와 평행하면 패치 안테나의 어레이를 구동한다. 이런 유형의 안테나 배열은 Rotman 렌즈 배열로 잘 알려져 있다. 이러한 예시적인 실시예에서, 도 11b에서 "피딩 포인트"로서 서술되었던 것과 같이 굴절률 분포형 렌즈의 초점 평면에 배치된 포인트 소스로부터 발생될 수 있는 평면파에 의해, 도파관 메타머티리얼은 평면 도파관에 유효 굴절률 분포형 렌즈를 제공한다. 잘 알려진 광학 이론으로부터, 각 안테나의 위상 차이는 소스의 피드 포지션에 의존하며, 그에 따라 위상 어레이 빔 포커싱이 구현될 수 있다. 도 11b는 평행빔으로 인한, 포커스에서 굴절률 분포형 평면 도파관 메타머티리얼을 구동하는 라인 소스로부터의 필드를 도시한 필드 맵이다. 도 11a 및 11b의 예시적인 피드 구조는 피딩 포인트의 위치로 인해 실질적으로 결정되는 안테나 위상 차이를 위한 Rotman-렌즈 유형 배열을 도시하고, 다른 실시예에서는 안테나 위상 차이는 피딩 포인트 조정 및 전자기장 특성과 굴절률 분포형 렌즈(의 위상 분포 특성)를 조절함으로써 결정되며(예를 들어 아래에서 논의될 것처럼, 조절가능한 메타머티리얼 소자를 배치함), 반면에 다른 실시예들은 두 가지 실시예를 결합한다(즉, 원하는 안테나 위상 차이를 누적적으로 달성하기 위한 렌즈 파라미터 및

피딩 포인트 위치 둘 모두를 조정함).

[0039]

일 실시예에서, 예를 들어 입력 포트 또는 입력 영역에서 반사를 감소시키거나 실질적으로 제거함으로써 입력 삽입 손실을 개선하기 위해, 전자기적 에너지를 받는 입력 포트 또는 입력 영역을 가진 도파관 구조물은 입력 포트 또는 입력 영역에 배치된 임피던스 매칭층(IML)을 포함한다. 이 때, 전자기 에너지가 도파관 구조로 공급 되도록 하나 이상의 전자기 방사기가 입력포트에 연결될 수 있다. 대체하거나 또는 추가적으로, 예를 들어 출력 포트 또는 출력 영역에서 반사를 감소시키거나 실질적으로 제거함으로써 출력 삽입 손실을 개선하기 위해, 일 실시예에서 전자기적 에너지의 전달하기 위한 출력 포트 또는 출력 영역을 가진 도파관 구조물은, 출력 포트 또는 출력 영역에 배치된 임피던스 매칭층(IML)을 포함한다. 이 때, 도파관 구조로부터 전자기 에너지를 수신하도록 출력 포트는 하나 이상의 전자기 수신기에 연결될 수 있다. 임피던스 매칭층은 도파관 구조물의 외면(external surface)(예를 들면 인접한 매질 또는 장치와 접한 곳)에서의 초기 웨이브 임피던스로부터 IML 및 굴절률 분포 지역 사이(예를 들면 빔 조향 또는 포커싱과 같은 기능의 장치를 제공함)의 내부에서의 최후 웨이브 임피던스까지, 웨이브 임피던스의 실질적인 연속적 변동을 제공하는 웨이브 임피던스 프로파일을 갖는다. 일 실시예에서 웨이브 임피던스의 실질적인 연속적 변동은 굴절률의 실질적인 연속적 변동에 대응하며(예를 들면 도 8b에 도시된 것처럼 한 종류의 소자 배열을 회전시킨 곳에서는 고정된 응답에 따른 유효 반사 및 유효 웨이브 임피던스 둘 모두를 조절함), 반면에 다른 실시예에서는 웨이브 임피던스는 굴절률에서 실질적으로 독립적으로 변화한다(예를 들면 상보적 E- 및 M-타입 소자 둘 모두를 배치하고, 유효 굴절률과 유효 웨이브 임피던스를 대응하도록 독립적으로 조정하기 위한 두 가지 종류의 소자의 배열을 독립적으로 회전함).

[0040]

예시적인 실시예는 다양한 기하학적 파라미터(길이, 두께, 곡률 반경, 또는 단위 셀 디멘션(unit cell dimension) 등) 및 (도 8b에 도시된 것과 같이) 대응하는 다양한 개별적인 전자기 응답을 갖는 상보적 메타머티리얼 소자의 공간적 배열을 제공하며, 다른 실시예에서는 (대체하거나 또는 추가적으로 변화하는 기하학적 파라미터에) 다양한 개별적인 전자기 응답을 제공하기 위해 상보적 메타머티리얼 소자의 물리 파라미터는 다양해진다. 예를 들면, 실시예는 정전 용량 방식의 겹을 포함하는 본래 메타머티리얼 소자의 보체인 상보적 메타머티리얼 소자(CSRRs 또는 CELCs 등)를 포함하며, 상보적 메타머티리얼 소자는 본래 메타머티리얼 소자의 정전용량적 겹의 다양한 캐패시턴스에 의해 파라미터화된다.

[0041]

동일하게, Babinet 정리로부터 (예를 들면 다양한 수의 디지털(digits) 및/또는 다양한 디지털 길이를 갖는 평면 맞물림식(interdigitated) 캐패시터의 형성) 소자의 캐패시턴스는 아무것도 보체 그것 내에서 인덕턴스가 되지 않으며(예를 들어 다양한 수의 회전 및/또는 다양한 회전 길이를 가진 미앤더 라인(meander line) 인덕터의 형성), 상보적 소자는 상보적 메타머티리얼 소자의 다양한 인덕턴스에 의해 파라미터화 된다. 대체하거나 또는 추가적으로, 실시예는 유도 회로를 포함한 본래 메타머티리얼 소자의 보체인 상보적 메타머티리얼 소자(CSRRs 또는 CELCs 등)를 포함하고, 상보적 메타머티리얼 소자는 본래 메타머티리얼 소자의 유도 회로의 다양한 인덕턴스에 의해 파라미터화 된다. 동일하게, Babinet 정리로부터 (예를 들면 다양한 수의 회전 및/또는 다양한 회전 길이를 가진 미앤더 라인의 형성) 소자의 인덕턴스는 아무것도 보체 그것 내에서 캐패시턴스가 되지 않으며(예를 들면 다양한 수의 디지털 및/또는 다양한 디지털 길이를 가진 평면 맞물림식 캐패시터의 형성), 상보적 소자는 상보적 메타머티리얼 소자의 다양한 캐패시턴스에 의해 파라미터화 된다. 게다가, 실질적 평면 메타머티리얼 소자는 집중 캐패시터 또는 인덕터의 연결로 인해 증가된 캐패시턴스 및/또는 인덕턴스를 갖는다. 일 실시예에서, 다양한 물리 파라미터(기하학적 파라미터, 캐패시턴스, 인덕턴스 등)는 다양한 물리 파라미터에 대한 전자기 응답과 관련한 회귀 분석에 따라 결정된다(도 8b의 회귀 곡선 비교). 또는 룩업 테이블에 따라 결정될 수도 있다.

[0042]

몇 가지 실시예에서는 상보적 메타머티리얼 소자는, 소자의 조절가능한 개별적인 전자기 응답에 대응한 조절가능한 물리 파라미터를 가진 조절가능한 소자이다. 예를 들면, 실시예는 조절가능한 캐패시턴스를 가진 상보적 소자(CSRRs 등)를 포함한다.(예를 들면, A.Velez와 J.Bonarche의 "Varactor-loaded complementary split ring resonators(VLCSRR) and their application tunable metamaterial transmission lines", IEEE Microw. Wireless Compon.Lett. 18,28(2008)에 따라, CSRRs의 내부 또는 외부의 메탈릭 영역 사이의 바랙터 다이오드(varactor diode)를 부가함). 다른 실시예는 개재된(intervening) 유전체 기판을 사용한 상부 또는 하부 도체(예를 들면 스트립 및 접지면)를 가진 도파관 실시예를 위해 상부 및/또는 하부 도체에 삽입되는 상보적 메타머티리얼 소자는 비선형 유전체 응답(예를 들면 강유전 물질)을 갖으며 두 도체 사이의 바이어스 전압을 인가하는 유전체 기판을 제공함으로써 조절가능하다. 다른 실시예에서는 감광성 물질(예를 들면 GaAs 또는 n-타입 실리콘과 같은 반도체 물질)은 상보적 메타머티리얼 소자에 인접하여 배치되며, 소자의 전자기 응답은 감광성 물질(예를 들면 광도핑을 일으킴)에 광학 에너지를 선택적으로 적용하여 조절가능하다. 다른 실시예에서는 자성층(예를

들면 반자성(ferrimagnetic) 또는 강자성 물질 등)은 상보적 메타머티리얼 소자에 인접하여 배치되며, 소자의 전자기 응답은 바이어스 자기장을 적용함으로써 조절가능하다.(예를 들면 J.Collub 등의 "Hybrid resonant phenomenon in a metamaterial structure with integrated resonant magnetic material" arXiv:0810.4871(2008)에 설명됨). 예시적인 실시예에서 기하학적 파라미터에 전자기 응답을 연관시킨 회귀 분석을 사용하는 반면(도 8b의 회귀 곡선과 비교), 조절가능한 소자를 이용한 실시예에서는 실질적으로 전자기 응답과 연관된 조절가능한 물리 파라미터에 전자기 응답을 연관시킨 회귀 분석을 사용한다.

[0043] 조절가능한 물리 파라미터를 가지는 조절가능한 소자를 이용한 몇 가지 실시예에서는, 조절가능한 물리 파라미터는 전압 입력(예를 들면 능동 소자를 위한 바이어스 전압), 전류 입력(예를 들면 능동 소자 내로 전하 캐리어의 직접 주입), 광학 입력(예를 들면, 광활성 물질의 조명), 또는 필드 입력(예를 들면 강유전/강자성을 포함한 접근을 위한 바이어스 전기/자기 필드)와 같은 하나 이상의 외부 입력에 대하여 응답하는 것이 조절가능해진다. 따라서, 몇 가지 실시예는 조절가능한 물리 파라미터의 각각의 값을 결정하고, 그러면 결정된 각각의 값에 대응한 하나 이상의 제어 입력을 제공하는 것을 포함한 방법을 제공한다. 다른 실시예는 조절가능한 물리 파라미터(예를 들면 회귀 분석) 각각의 값을 결정하기 위해 배열된 회로를 갖는 제어 유닛을 통합한 적응성 또는 조절가능한 시스템 및/또는 결정된 각각의 값에 대응하는 하나 이상의 제어 입력을 제공한다.

[0044] 몇 가지 실시예에서 전자기 응답을 기하학적 파라미터에 연관시킨 회귀 분석을 사용하는 반면(조절가능한 물리 파라미터를 포함), 실시예에서 각각의 조절가능한 물리 파라미터는 하나 이상의 제어 입력으로써 결정되며, 회귀 분석은 전자기 응답을 제어 입력에 직접적으로 연관시킨다. 예를 들면, 조절가능한 물리 파라미터는 인가된 바이어스 전압으로부터 결정되는 바랙터 다이오드의 조절가능한 캐패시턴스이며, 회귀 분석은 전자기 응답을 조절가능한 캐패시턴스에 연관시키거나, 또는 회귀 분석은 전자기 응답을 인가된 바이어스 전압에 연관시킨다.

[0045] 몇 가지 실시예가 실질적으로 협 응답 대역(narrow-band responses)에 전자기 방사선을 제공하는 반면에(예를 들어 상보적 메타머티리얼 소자의 하나 이상의 공진 주파수에 근접한 주파수를 위함), 다른 실시예는 실질적으로 광 응답 대역(broad-band responses)에 전자기 방사선을 제공한다(예를 들어 실질적으로 더 작거나, 실질적으로 더 크거나, 또는 그렇지 않다면 메타머티리얼 소자의 하나 이상의 공진 주파수와 실질적으로 다른 주파수를 위함). 예를 들면, 실시예는 광대역 메타머티리얼 소자의 Babinet 보체를 배치한다(R.Liu 등의 "Broadband gradient index optics based on non-resonant metamaterials", unpublished; see attached Appendix 및/ 또는 R.Liu 등의 "Broadband ground-plane cloak", Science 323,366(2009)에서 설명함).

[0046] 전술의 예시적 실시예는 실질적으로 2D 평면 실시예인 반면에, 다른 실시예는 실질적으로 비평면 배열 및/또는 실질적으로 3D 배열의 상보적 메타머티리얼 소자를 배치한다. 예를 들어 실시예는 각 층은 실질적으로 상보적 메타머티리얼 소자가 삽입된 전도성 표면을 가진 3D 적층을 제공한다. 대체하거나 또는 추가적으로, 상보적 메타머티리얼 소자는 실질적으로 비평면인 전도성 표면에 삽입된다(예를 들어 실린더, 구체 등). 예를 들면, 장치는 상보적 메타머티리얼 소자를 삽입한 전도성 곡면(또는 그 복수)을 포함하며, 곡면은 상보적 메타머티리얼 소자의 일반적 길이 보다 실질적으로 크지만 장치의 동작 주파수에 대응한 파장보다 실질적으로 작거나 동등한 곡률 반경을 갖는다.

[0047] 본 명세서에 설명된 기술은 예시적이고 비제한적인 구현과 관련하여 대해 설명되었지만, 본 발명은 기재된 내용으로 제한되지 않을 것이다. 본 발명은 청구항에 의해 정의되고, 여기에서 구체적으로 개시되었는지 여부에 관계없이, 모든 대응하고 균등한 장치를 포함하도록 의도된다.

[0048] 위에서 인용된 모든 문서 및 다른 정보 자료는 그 전체가 여기에 참조로 도입된다.

[0049] 이하에 기재된 내용은 본원에 [추록]으로 포함된다.

[0050] [추록]

[0051] 비공진형 메타머티리얼을 기반으로 하는 광대역 굴절률 분포형 광학소자

[0052] R. Liu¹, Q. Cheng², J. Y. Chin², J. J. Mock¹, T.J. Cui², D. R. Smith¹

- [0053] ¹Duke University(NC 27708, Durham, Box 90291)의 메타머티리얼 및 집적 플라즈몬 센터, 및 전기컴퓨터공학과
- [0054] ²Southeast University(P. R. China Nanjing 210096)의 라디오공학과의 밀리미터파 상태 키(State Key) 연구실
- [0055] (2008년 11월 27일)

[0056] **[요약]**

[0057] 비공진형 메타머티리얼 소자를 사용하여, 작은 물질 손실(material losses) 및 넓은 주파수 대역폭을 나타내기 위해 구성될 수 있는 복잡한 굴절률 분포형 광학소자를 제공할 수 있다. 비록 구조물의 범위는 항상 1과 동일하거나 더 큰 전기 유전율에 대하여 오직 전기적인 응답만을 갖도록 제한되지만, 여전히 비공진형 소자를 이용함으로써 많은 메타머티리얼을 설계할 수 있는 가능성이 있다. 예를 들면, 임피던스 분포형(gradient impedance) 매칭층은 광학 소자의 반사 손실을 과감하게 줄일 수 있으며, 근본적으로 반사가 없고 손실이 없도록 할 수 있다. 마이크로웨이브 실험에서, 굴절률 분포형 렌즈 및 빔 조향 소자를 이용한 광대역 설계 개념을 설명하며, 이들 둘 모두는 전체 X-밴드(대략 8 내지 12 GHz) 주파수 스펙트럼에 걸쳐 동작하는 것이 확인되었다.

[0058] 메타머티리얼 소자의 전자기 응답은 정확하게 조절될 수 있기 때문에, 넓은 범위의 복잡한 전자기 매질에 대한 기본적인 구조 블록들로 도시될 수 있다. 지금까지, 메타머티리얼은 흔히 면적과 간격이 동작의 파장보다 훨씬 작은 공진 전도성 회로로부터 형성되며, 상기 공진 전도성 회로의 치수 및 간격은 동작 파장보다 훨씬 작다. 이러한 공진 소자의 큰 쌍극 응답을 처리함으로써, 유효 유전율 및 투자율 텐서 소자의 인위적인 자성 및 큰 양극 또는 음극 값을 포함하는 유효 물질 응답의 전례 없는 영역을 실현시킬 수 있다.

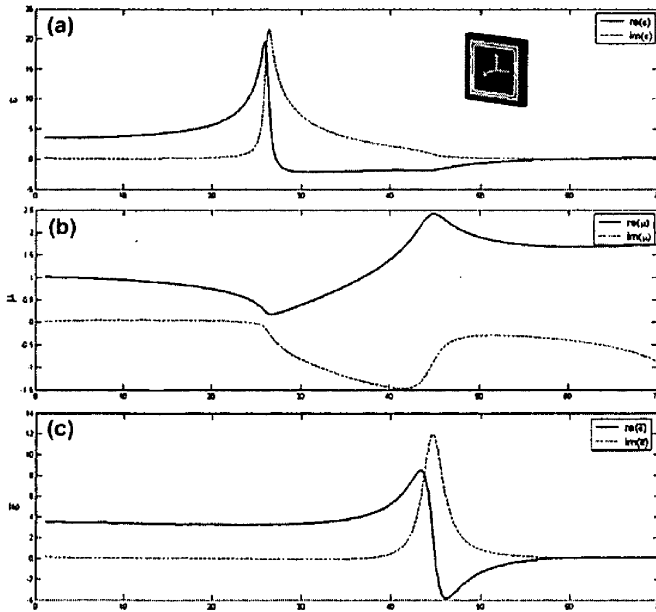
[0059] 이러한 공진 소자들 고유한 연성을 이용하여, 메타머티리얼은 종래의 물질을 사용하여 달성하기 어렵거나 불가능했던 결합 구조로 사용될 수 있다. 예를 들면, 음의 굴절률은 사실상 이용가능한 물질 특성이 아니기 때문에, 음 굴절률 물질은 메타머티리얼에 대한 흥미가 높아지게 할 수 있다. 여전히, 주목할만한 음 굴절률 매질은 인위적인 구조의 매질을 이용할 수 있는 가능성의 시작을 나타낸다. 공간 전체에 걸쳐 조절되는 방식으로 물질 특성이 변화하는 불균일 매질은, 또한 광학 구성 소자를 발전시킬 수 있으며, 메타머티리얼을 통한 수행에서 아주 잘 어울린다. 실제로, 굴절률 분포형 광학 소자는 이미 많은 실험에서 마이크로웨이브 주파수로 설명되었다. 게다가, 메타머티리얼은 구성 텐서 소자가 독립적으로 조절되는 것을 전례 없이 자유롭도록 하였기 때문에, 공간 영역 전체에 걸친 하나하나의 메타머티리얼은 변환 광학 방식에 따라 설계된 구조를 실현하기 위한 기술로서 사용될 수 있다[1]. 2006년에 마이크로웨이브 주파수에서 설명되었던 "비가시성(invisibility)" 클록은 메타머티리얼의 예가 된다[2].

[0060] 비록 메타머티리얼은 흔히 많은 전자기 응답의 실현을 제공하는데 성공적이지만, 여기에 설명되는 구조는 가장 일반적으로 사용되는 공진 소자 고유의 큰 손실 때문에, 보통 실용적인 이용에 있어서는 단지 미미한 유용성만이 있을 뿐이다. 이러한 상황은 그림 1에 도시되어 있는 곡선을 이용하여 설명할 수 있으며, 유효한 필수 구성 파라미터는 삽입된 메타머티리얼 단위 셀에 대한 그림 1(a) 및 그림 1(b)에 도시되어 있다. 참조문헌 [3]에서 설명된 유효 매질 이론에 따라, 회복된 곡선은 실질적으로 공간적인 분산 요인에 의해 영향을 받는다. 공간적인 분산 요인을 제거하기 위해, 정리 [3]에 나타난 공식을 적용할 수 있고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다:

[0061] **수학식 1**

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= \epsilon \sin(\theta) / \theta \\ \bar{\mu} &= \mu \tan(\theta / 2) / (\theta / 2) \end{aligned}$$

[0062] 여기에서 $\theta = \omega p \sqrt{\epsilon \mu}$ 및 p 는 단위 셀의 주기성이다. 그림 1(c)는 주파수의 $\bar{\epsilon}$ 및 공간적인 분산 요인을 제거한 후의 Drude-Lorentz 공진 형태를 도시하고 있다.



[0063]

[0064]

도1(a)는 반복되는 단위 셀로 구성된 메타물질에 대하여 획득된 유전율을 도시하고 있다. 도1(b)는 반복되는 단위 셀로 구성된 메타물질에 대하여 획득된 투자율을 도시하고 있다. 도1(c)는 획득된 파라미터에서의 왜곡 및 아티팩트(artifacts)가 공간적인 분포에 기인함을 도시하며, 이것은 하부에 도시된 공진과 같이 Drude-Lorentz를 찾음으로써 제거될 수 있다.

[0065]

단위 셀은 42 GHz 근처의 주파수의 유전율에서 공진을 하는 것에 주목해야한다. 또한, 유전율에서의 공진에 더하여, 자기적 투자율 내에도 구조가 존재한다. 이 아티팩트는 공간적인 분산과 관계된 현상이며 - 파장과 관련된 있는 단위 셀의 한정된 크기로 인한 효과이다. 앞서 지적했듯이, 공간적인 분산의 효과는 분석적으로 간단하게 설명되며, 따라서 오직 몇 개의 파라미터에 의해 특성화된 비교적 복잡하지 않은 Drude-Lorentz 유형의 진동자를 드러내기 위해 제거될 수 있다. 관찰된 공진은 다음과 같은 형태를 갖는다:

수학식 2

[0066]

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega} = \frac{\omega^2 - \omega_0^2 - \omega_p^2 - i\Gamma\omega}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega}$$

[0067]

여기에서 ω_p 는 플라즈마 주파수이고, ω_0 는 공진 주파수이며, Γ 는 감쇠 팩터이다. $\epsilon(\omega) = 0$ 에서의 주파수는 $\omega_t^2 = \omega_0^2 + \omega_p^2$ 에서 발생된다.

[0068]

수학식 2 또는 그림 1에서 확인할 수 있는 바와 같이, 유효 유전율은 양수 또는 음수인 매우 큰 값일 수 있다. 그러나, 이 값들은 본질적으로 분산 및 상대적으로 큰 손실이 수반되며, 특히 공진주파수에 매우 가까운 주파수에 대하여 수반된다. 따라서, 비록 매우 넓고 흥미로운 범위의 구성 파라미터가 공진에 가까운 메타물질 소자에 대한 연구에 의해 평가될 수 있을지라도, 이러한 값들의 장점은 본질적인 손실 및 분산에 의해 일부 완화된다. 이러한 체제에서 메타물질을 이용하는 전략은 단위 셀의 손실을 가급적 많이 줄이기 위함이다. 이는 금속의 표면 깊이(skin depth) 때문이다.

[0069]

그림 1에 도시된 전기적 메타물질의 응답을 매우 낮은 주파수에서 시험하는 경우, 영 주파수 한도에서 다음과 같은 사항을 발견할 수 있다:

수학식 3

$$\epsilon(\omega \rightarrow 0) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2} = \frac{\omega_c^2}{\omega_0^2}$$

[0070]

[0071]

수학식 3은 영 주파수 (문헌 [4] 참조)에서의 유전상수에 대한 플라리톤 공진의 기여도를 기술하는 Lyddane-Sachs-Teller 관계를 연상시킨다. 공진으로부터 멀어지는 주파수에서는, 공진주파수에 대한 플라즈마의 비율의 제공으로, 유전율이 1이 아닌 상수로 접근하는 것을 알 수 있다. 비록 유전을 값이 반드시 양수이고 1보다 더 클지라도, 유전율은 분산되지 않고 손실되지 않아 상당히 유리하게 된다. 이러한 성질은 자성 메타머티리얼 매질, 예컨대 일반적으로 저주파수 한계에서 1에 접근하는 형태의 유효 유전율을 갖는 분할 링 공진기(split ring resonators)로 확장되지 않음을 주목한다. 인공 자성 효과가 극성화(polarization)보다는 유도(induction)를 기반으로 하기 때문에, 인공 자성 응답은 영 주파수에서 사라져야 한다.

수학식 4

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega}$$

[0072]

[0073]

메타머티리얼의 유효 구성 파라미터가 공간적인 분산에 의해 복잡하게 되는 것뿐만 아니라, 발진기에 걸친 함으로 적절하게 표현되어야 하는 무한한 수의 높은 차수 공진을 갖는다. 따라서, 전술한 단순한 분석적인 공식은 단지 근사적인 것임이 예상된다. 여전히, 단위 셀의 고주파수 공진성의 함수로서 저주파수 유전율의 일반적인 경향을 조사할 수 있다. 단위 셀 내의 사각형 폐쇄형의 치수를 조절함으로써, 도출된 영 주파수 유전율과 수학식 2에 의해 예측되는 영 주파수 유전율을 비교할 수 있다. 임의적인 메타머티리얼 구조물에 대한 정확한 장분포 및 산란 (S-) 파라미터를 결정할 수 있는 상용화된 전자기 유한요소 해석기인 HFSS (Ansoft)를 사용하여 시뮬레이션이 수행된다. 유전율 및 투자율은 잘 구축된 알고리즘에 의해 S-파라미터로부터 얻어질 수 있다. 표 1은 이러한 시뮬레이팅된 추출값과 이론적인 예측값 간의 비교를 나타낸다. 단위 셀이 유전 기판과 결합함

$$\epsilon(\omega \rightarrow 0) = \epsilon_a \left(1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2}\right) = \epsilon_a \frac{\omega_c^2}{\omega_0^2}$$

에 따라, 수학식 3이 로 변형되는 것을 주목해야 하며, 여기서 $\epsilon_a = 1.9$ 이다. 추가적인 맞춤 파라미터는 기판 유전상수의 영향 및 고차 공진으로부터 DC 유전율에 대한 기여도의 실제 상황을 나타낼 수 있다. 비록 예측된 유전율 값과 도출된 유전율 값이 상당히 불일치해도, 상기 값들은 비슷한 차수를 가지며, 명백히 유사한 경향을 나타내며: 고주파수 공진 성질은 영 주파수 분극률과 상당한 상관관계를 갖는다. 소자의 고주파수 공진 성질을 변경함으로써, 영 주파수 및 저주파수 유전율은 임의의 값으로 조절될 수 있다.

표 1

[0074]

a	f ₀	f _L	ε predicted	ε actual
1.70	44.0	59.0	3.416	3.425
1.55	54.0	64.0	2.670	2.720
1.40	64.0	71.0	2.338	2.315
1.20	77.4	79.2	1.989	1.885

[0075]

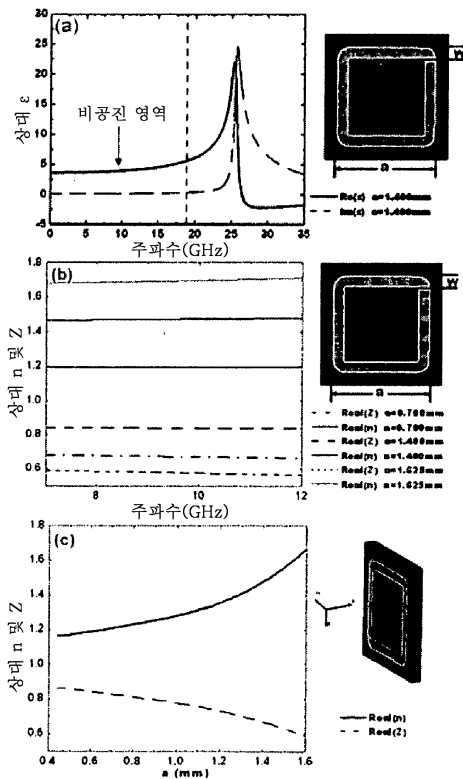
표 1은 예측된 영 주파수 유전율 값과 실제 영 주파수 유전율 값을 단위 셀의 치수 a의 함수로 나타낸 것이다.

[0076]

그림 2에 도시된 폐쇄형 링 설계가 유전값의 범위를 제공하도록 쉽게 조정될 수 있기 때문에, 상기 폐쇄형 링은 보다 복잡한 굴절률 분포형(gradient-index) 구조물을 설명하기 위한 기본 소자로 이용된다. 폐쇄형 링의 주된

응답은 전기적인 것이지만, 또한 폐쇄형 링은, 입사 자기장이 링 축을 따라 위치하는 경우 유도되는 약한 반자성 응답을 갖는다. 따라서, 폐쇄형 링 매질은 1이 아닌 자성 투자율을 특징으로 가지며, 물질의 성질에 대한 완전한 설명이 고려되어야 한다. 전기적 2극성 응답 및 자기적 2극성 응답 둘 모두의 존재는 일반적으로 복잡한 매질의 설계에 유용하며, 이는 메타머티리얼 클록(metamaterial cloak)에서 설명되었다. 링의 치수를 변경함으로써, 자성 응답의 기여도를 조절할 수 있다.

[0077] 유전율은 정확하게 폐쇄형 링의 기하학적인 구조를 변경함으로써 조절될 수 있다. 폐쇄형 링 구조물의 전기적 인 응답은 이전에 연구된 "컷-와이어(cut-wire)" 구조물과 동일하며, 플라즈마 및 공진주파수는 $\omega_p \approx \frac{1}{L}$ 및 $\omega_c^2 \approx \frac{1}{LC}$ 에 따라 간단하게 회로 파라미터와 관련됨이 보여졌다. 여기서, L은 폐쇄형 링의 암과 관련된 인덕턴스이고, C는 인접한 폐쇄형 링 간의 간격에 관련된 커패시턴스이다. 고정된 단위 셀 사이즈의 경우, 인덕턴스는 전도성 링의 두께 w 또는 길이 a를 변경함으로써 조절될 수 있다. 커패시턴스는 주로 링의 전체적인 사이즈를 변경함으로써 조절될 수 있다.



[0078] 그림 2는 폐쇄형 링 매질에 대한 도출된 결과를 도시한다. 모든 경우 코너의 곡률반경은 0.6 mm이고 w는 0.2 mm이다. (a)는 a가 1.4 mm인 경우 얻어진 유전율이고, (b)는 다수의 a 값에 대하여 얻어진 인텍스 및 임피던스이다. (c)는 치수 a와 도출된 굴절률 및 웨이브 임피던스 간의 관계이다.

[0079] 그림 2에 제시된 시뮬레이션 결과와 같이, 공진 성질을 변경하는 것은 결과적으로 저주파수 유전율 값을 변경시킨다. 그림 2(a)에 도시된 폐쇄형 링 구조물은 FR4 기판에 증착된 것으로 가정되며, FR4 기판의 유전율은 3.85+i0.22이며, 두께는 0.2026 mm이다. 단위 셀의 치수는 2 mm이고, 증착된 금속층(구리로 가정됨)의 두께는 0.018 mm이다. 이러한 구조물의 경우, 공진은 넓은 주파수 영역(대략적으로 0에서 15 GHz)에 걸쳐 거의 일정한 유전율을 가지면서 약 25 GHz에서 발생한다. 또한, 링 치수 a가 0.7 mm, 1.4 mm 및 1.624 mm인 세 개의 서로 다른 단위 셀에 대한 시뮬레이션이 물질 파라미터에 대한 영향을 설명하기 위해 시뮬레이팅되었다. 그림 2(b)에서, 링 치수가 증가함에 따라 인텍스 값이 증가하는 것이 관찰되며, 이는 보다 큰 링의 보다 큰 분극률을 반영하는 것이다.

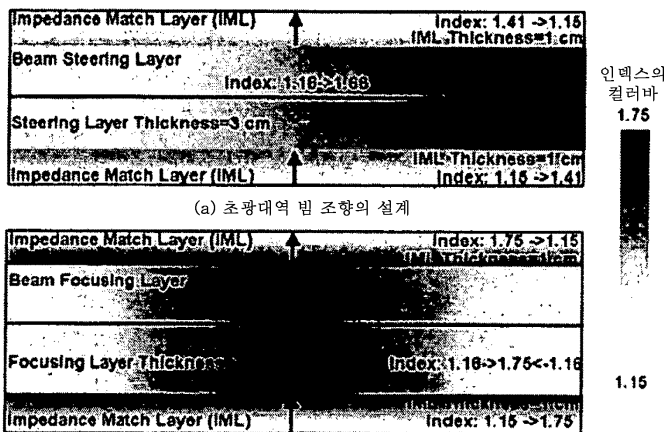
[0080] 대부분의 경우, 굴절률은 공진점 미만의 주파수에서 주파수의 함수에 따라 상대적으로 평평하게 유지된다. 인텍스는 주파수의 함수에 따라 약간 단조로운 증가를 보이지만, 이는 보다 높은 주파수의 공진에 기인하는 것이다. 또한, 임피던스 변화는 어느 정도의 주파수 분산을 나타내며, 이는 유전율 및 투자율에 대한 공간적인 분산의 영향에 기인하는 것이다. 이러한 구조물에서의 손실은 무시할 수 있는 정도이며, 이는 공진주파수에서 멀

[0081] 대부분의 경우, 굴절률은 공진점 미만의 주파수에서 주파수의 함수에 따라 상대적으로 평평하게 유지된다. 인텍스는 주파수의 함수에 따라 약간 단조로운 증가를 보이지만, 이는 보다 높은 주파수의 공진에 기인하는 것이다. 또한, 임피던스 변화는 어느 정도의 주파수 분산을 나타내며, 이는 유전율 및 투자율에 대한 공간적인 분산의 영향에 기인하는 것이다. 이러한 구조물에서의 손실은 무시할 수 있는 정도이며, 이는 공진주파수에서 멀

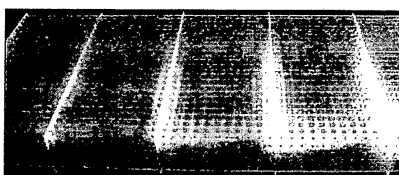
리 떨어져 있는 결과이다. 이러한 결과는 특히 충격에 관한 것이며, 이는 기관이 RF 회로에 최적화된 것이 아니기 때문이며, 실제로, 여기에 가정된 FR4 회로 보드 기관은 일반적으로 매우 손실이 큰 것으로 간주된다.

[0082] 그림 2의 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있는 바와 같이, 폐쇄형 링 소자를 기반으로 하는 메타머티리얼 구조물은 거의 분산성을 갖지 않으며 저역 통과 성질을 가져야 하며, 제공되는 소자의 공진은 충분히 원하는 범위의 동작 주파수 위에서 발생한다. 요점을 설명하기 위해, 폐쇄형 링 소자를 사용하여 다음과 같은 두 개의 굴절률 분포형 장치를 구현한다: 굴절률 분포형 렌즈 및 빔 조향 렌즈. 양의 값 및 음의 값의 굴절률 분포형 구조물을 구현하기 위해 공진 메타머티리얼을 사용하는 것은 문헌 [5]에 소개되었으며, 이어서 다양한 문헌에 적용되었다. 이러한 설계적 접근은 우선, 원하는 기능(예컨대, 포커싱 또는 조향)을 달성하기 위하여 원하는 연속적인 인덱스 프로파일을 결정하기 위한 것이며, 그리고 나서 이산적인 개수의 메타머티리얼 소자를 사용하여 인덱스 프로파일을 단계적으로 근사화하기 위한 것이다. 소자는 단위 셀의 많은 다양한 기하학적인 파라미터(즉, a , w 등)에 대한 수치적인 시뮬레이션을 수행함으로써 설계될 수 있으며; 합리적인 보간이 기하학적인 파라미터의 함수로서 투자율을 형성할 수 있도록 충분한 시뮬레이션이 수행되면, 수학적 굴절률 분포형 구조물이 배치되고 제조될 수 있다. 이러한 기본적인 접근방법은 문헌 [6]에 설명되어 있다.

[0083] 2 개의 굴절률 분포형 샘플들이 비공진형 메타머티리얼의 대역폭을 검사하기 위해 설계된다. 그림 3의 컬러 맵은 빔 조향 층(그림 3(a)) 및 빔 초점 렌즈(그림 3(b))에 대응하는 인덱스 분포를 보여준다. 굴절률 분포형 분산이 빔을 초점화시키거나 또는 조향하는 필요 기능을 제공하지만, 현저하게 높은 인덱스 구조 및 자유 공간 사이에서는 실질적인 불일치가 여전히 남아있게 된다. 이 불일치는 각각의 메타머티리얼 소자의 속성을 조정함으로써, 증명하기 전에 관리되어, 유전율 및 투자율이 본질적으로 동일할 수 있다. 설계의 이러한 유연성은 공진 메타머티리얼의 고유 이점이고, 상기 투자율 응답은 전기 응답과 거의 같게 유지되도록 고안될 수 있다. 이와 달리, 그 유연성은 비-공진형 소자들을 포함하는 설계에 대해 이용될 수 없기 때문에, 렌즈의 출구(exit)에서 자유 공간으로 다시 되돌아가는 매칭 뿐만 아니라, 자유 공간에서 렌즈로 가는 매칭을 제공하기 위해, 굴절률 분포형 임피던스 매칭 층(IML)을 사용한다.



[0084] 그림 3은 설계된 굴절률 분포형 구조물에 대한 굴절률 분포를 나타낸다. 그림 3(a)는 선형적인 굴절률 분포를 기반으로 하는 빔-조향 소자에 관한 것이다. 그림 3(b) 높은 차수의 다항식 굴절률 분포를 기반으로 하는 빔 초점 렌즈에 관한 것이다. 상기 구조물의 삽입 손실을 개선하기 위해 제공된 임피던스 매칭 층(IML)의 양쪽 설계들을 주목한다.



[0086] 그림 4는 메타머티리얼 구조가 공간 좌표에 따라 변화되는 제조 샘플이다.

[0087] 빔 조향 층은 웨이브 전파 방향을 가로지르는 방향으로 선형적인 굴절률 분포를 가진 슬랩(slab)이다. 인덱스 값들의 범위는 폐쇄형 링 메타머티리얼 소자들의 설계된 세트로부터 이용가능한 범위와 일치되는 $n = 1.16$ 내지

$n = 1.66$ 이다. 삽입 손실을 개선시키고, 반사를 줄이기 위해, IML은 샘플의 양 측들(입력 및 출력) 상에 위치된다. IML의 인덱스값들은 1(공기)에서 $n = 1.41$ 로 점차적으로 변화되고, 상기 인덱스 값은 빔 조향 슬랩의 중심에 있게 된다. 이 인덱스 값은, 시준 빔의 에너지 대부분이 샘플의 중심을 통해 나가기 때문에 선택된다. 실질적인 빔 조향 샘플을 실행하기 위해, 그림 2에서 도시된 폐쇄형 링 유닛 셀을 사용하고, 그림 3(a)에 도시된 분포를 가진 유닛 셀들의 어레이를 설계한다.

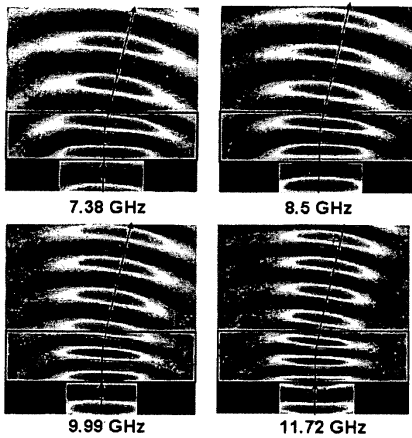
[0089] 빔 초점 렌즈는 그림 3(b)에 도시된 바와 같이, 인덱스 분포를 가진 평면형 슬랩이다. 인덱스 분포는 다음과 같은 함수 형태를 갖는다:

수학식 5

[0090]
$$\text{Re}(n) = 4 \times 10^{-4} |x|^3 - 5 \times 10^{-7} |x|^2 - 6 \times 10^{-4} |x| - 1.75.$$

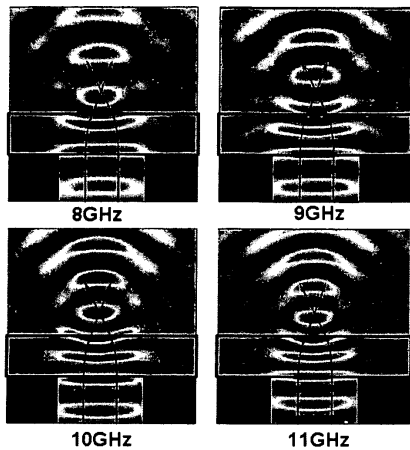
[0091] 여기서, x 는 렌즈의 중심으로부터 이격된 거리이다. 다시 한번, IML은 자유 공간과 샘플을 매칭시키기 위해 사용된다. 이 경우에서, IML의 인덱스 프로파일은 $n = 1.15$ 에서 $n = 1.75$ 로 선형적으로 분포되어 있으며, 이때 후자 값은 렌즈의 중심에서 인덱스를 매칭시키기 위해 선택된다. 동일한 유닛 셀 설계는 빔 초점 렌즈에 대해 사용되고, 이는 빔 조향 렌즈도 마찬가지이다.

[0092] 굴절률 분포형 구조물의 속성을 확실하게 하기 위해, 그림 4에 도시된 바와 같이, 회로 보드 기판에 인쇄된 동박(copper clad)(FR4)을 사용하여 2 개의 설계 샘플들을 제조한다. 이전에 기술된 절차에 이어, 샘플들의 시트들(sheets)은 표준 광학 리소그래피(optical lithography)에 의해 제조되고, 그 후에, 굴절률 분포형 슬랩들을 형성하기 위해 함께 조립될 수 있는, 1 cm의 높이를 가진 스트립들(tall strips)로 절단된다. 샘플들을 계측하기 위해, 이들을 2D 맵핑 장치(mapping apparatus)로 위치시키고, 상기 2D 맵핑 장치는 상세하게 기술되었으며, 근접장 분포(near field distribution)[7]에 맵핑된다.



[0093]

[0094] 그림 5는 빔 조향 렌즈의 장 맵핑 계측을 도시한다. 렌즈는 입사 빔이 16.2 도의 각도로 검출되도록 선형 기울기를 가진다. 그 효과는, 실험 장치의 X-대역 범위에 걸친 4 개의 서로 다른 주파수에서 취해지는 동일한 맵들로부터 볼 수 있는 바와 같이, 광대역에 걸쳐 일어난다.



[0095]

[0096]

그림 6은 빔 초점 렌즈의 장 맵핑 계측을 도시한다. 렌즈는 입사 빔이 일 지점에 초점화되도록 중심(본 명세서에서 주어진) 주위에서 대칭 프로필을 가진다. 다시 한번, 그 기능은, 실험 장치의 X-대역 범위에 걸친 4 개의 서로 다른 주파수에서 취해지는 동일한 맵들로부터 볼 수 있는 바와 같이, 광대역에 걸쳐 일어난다.

[0097]

그림 5는 큰 광대역을 포함할 수 있는 초-광대역 메타머티리얼 설계의 빔 조향을 보여준다. 실제 대역폭은 DC로부터 시작하여, 약 14 GHz 까지 간다. 그림 3으로부터, 빔 조향이 16.2 도의 동일한 조향 각도로 7.38 GHz에서 11.72 GHz로 4 개의 서로 다른 주파수들 모두에서 발생하는 것은 명백하다. 전파를 통한 에너지의 손실은 극히 낮을 수 있고, 거의 관측되지 않을 수 있다. 그림 6은 빔 초점 샘플의 맵핑 결과를 보여준다. 광대역 속성은 35 mm의 정확한 동일 초점 거리를 가지고 손실이 낮은 4 개의 서로 다른 주파수에서 다시 증명된다.

[0098]

요약하면, 제안된 초-광대역 메타머티리얼에 기반한 복합 비균질 물질이 실현되고 정확하게 제어될 수 있다. 초-광대역 메타머티리얼 구성물 및 설계 접근법은 실험에 의해 확인된다. 그의 낮은 손실, 설계가능한 속성, 및 비균질 물질 변수에 접근할 수 있는 용이함으로 인해, 초-광대역 물질은 많은 적용에 있어 조만간 사용될 것이다.

[0099]

[감사의 글]

[0100]

이 연구는 Multiple University Research Initiative, Contract 제FA9550-06-1-0279호를 통하여 Scientific Research의 Air Force Office에 지원받았다. TJC, QC 및 JYC는 승인 번호 제2004CB719802호 하의 중국의 National Basic Research Program(973), InnovateHan Technology Ltd, 승인 번호 제111-2-05호 하의 111 프로젝트, 및 승인 번호 제60671015호 및 제60496317호 하의 중국의 National Science Foundation으로부터의 지원에 감사한다.

[0101]

[참조문헌]

[0102]

[1] J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith *Science* 312, 1780 (2006)

[0103]

[2] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr and D. R. Smith, *Science* 314, 977-980 (2006)

[0104]

[3] R. Liu, T. J. Cui, D. Huang, B. Zhao, D. R. Smith, *Physical Review E* 76, 026606 (2007)

[0105]

[4] C. Kittel, *Solid State Physics* (John Wiley & Sons, New York, 1986), 6th ed., p275

[0106]

[5] D. R. Smith, P. M. Rye, J. J. Mock, D. C. Vier, A. F. Starr *Physical Review Letters*, 93, 137405 (2004)

[0107]

[6] T. Driscoll. et. al. *Applied Physics Letters* 88, 081101 (2006)

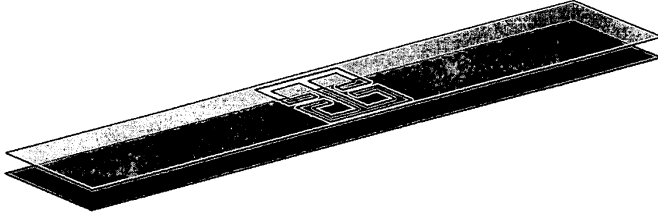
[0108]

[7] B. J. Justice, J. J. Mock, L. Guo, A. Degiron, D. Schurig, D. R. Smith, *Optics Express* 14, 8694 (2006)

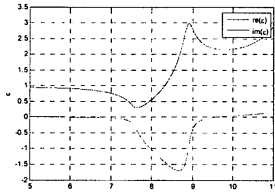
도면

도면1

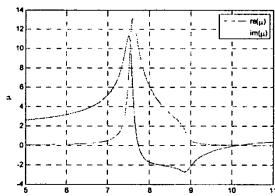
도파형 상보적 ELC (자기 응답)



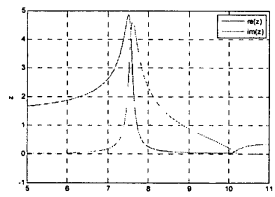
도면1a



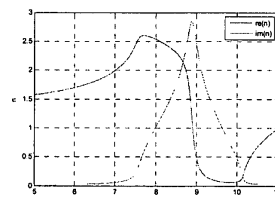
도면1b



도면1c

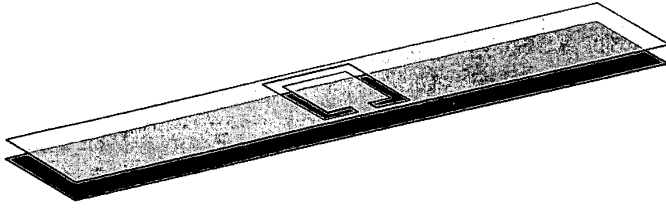


도면1d

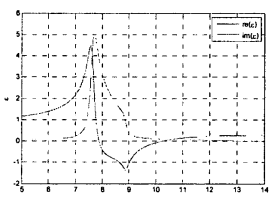


도면2

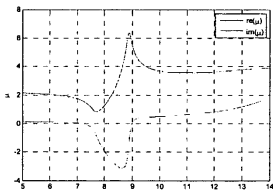
도파형 상보적 SRR (전기 응답)



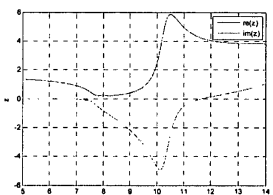
도면2a



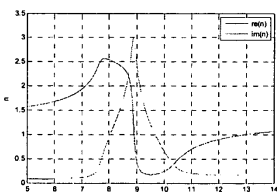
도면2b



도면2c

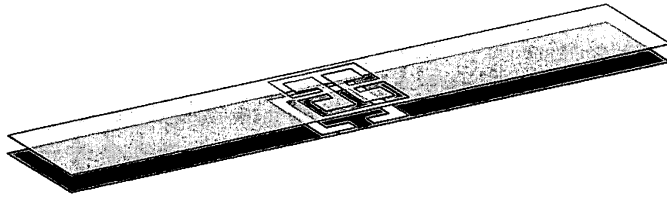


도면2d

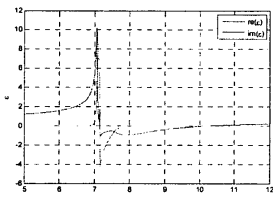


도면3

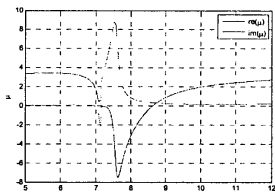
도파형 상보적 음 인덱스 메타머티리얼



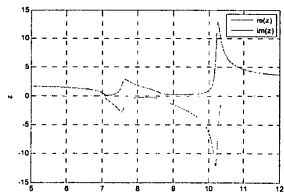
도면3a



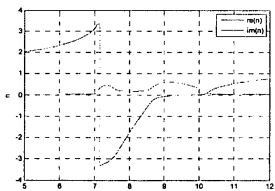
도면3b



도면3c

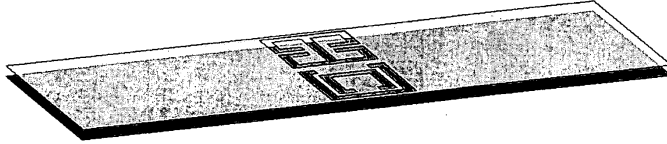


도면3d

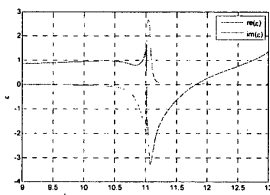


도면4

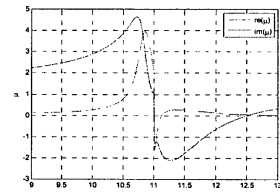
도파형 상보적 음 인덱스 메타머티리얼



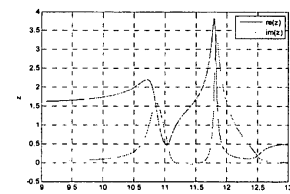
도면4a



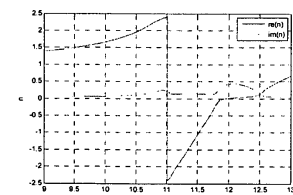
도면4b



도면4c

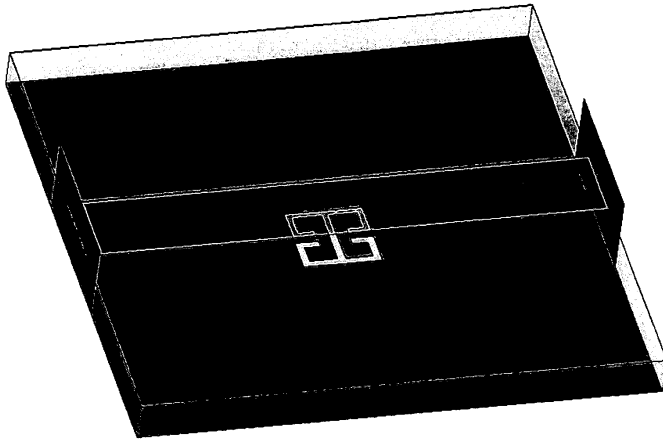


도면4d

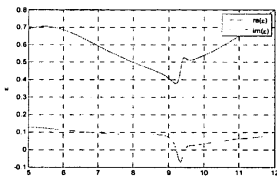


도면5

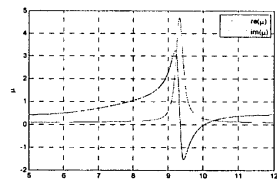
마이크로스트립 라인 상보적 ELC



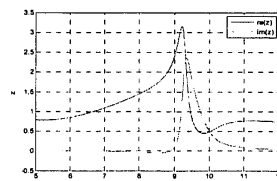
도면5a



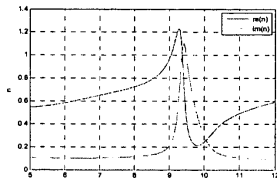
도면5b



도면5c

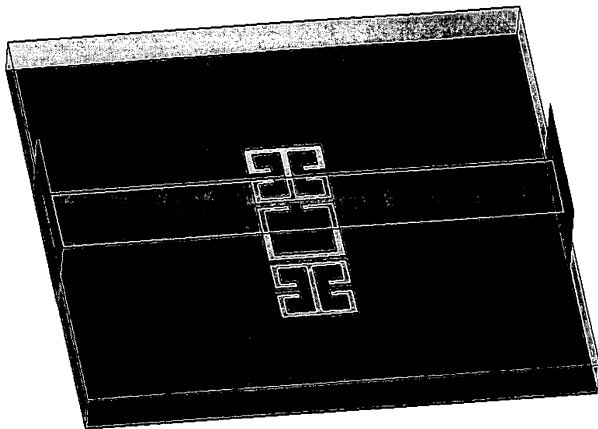


도면5d

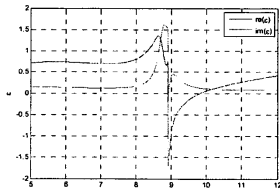


도면6

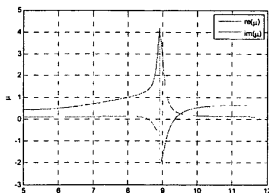
마이크로스트립 라인 음 인덱스 메타머티리얼



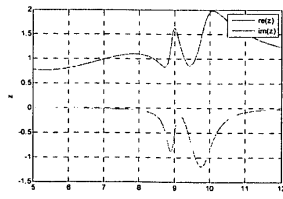
도면6a



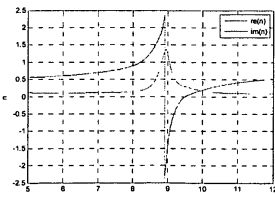
도면6b



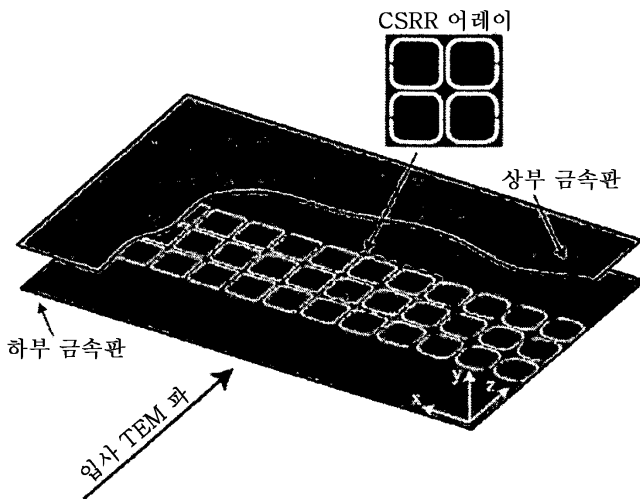
도면6c



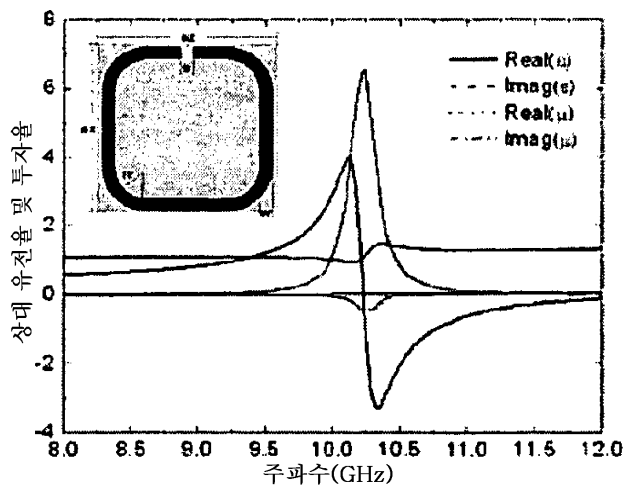
도면6d



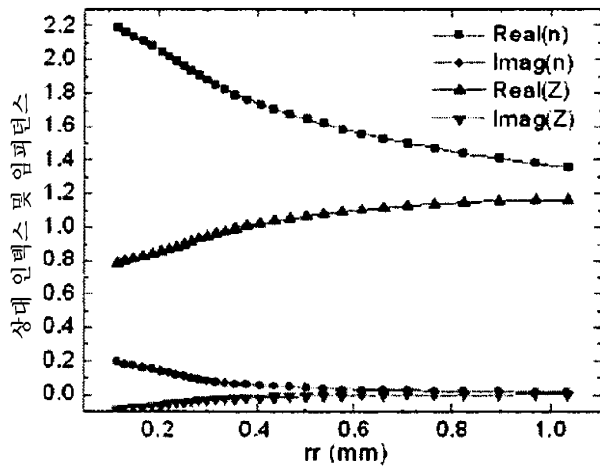
도면7



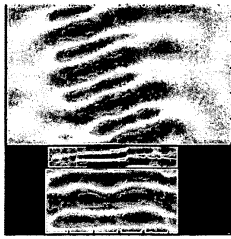
도면8a



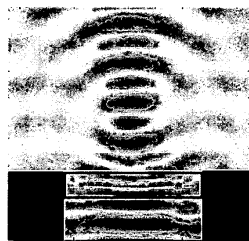
도면8b



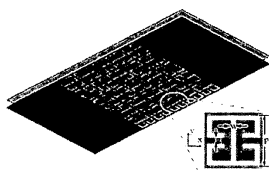
도면9a



도면9b



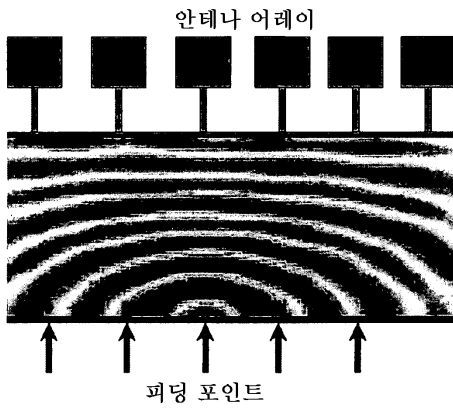
도면10a



도면10b



도면11a



도면11b



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 제28항

【변경전】

상기 전도성 표면은, 상기 각 개구들에 대응하는

【변경후】

상기 하나 이상의 전도성 표면은, 상기 전도성 표면 내에 개구들을 포함하여, 상기 각 개구들에 대응하는