



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2012년03월13일
(11) 등록번호 10-1118710
(24) 등록일자 2012년02월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01P 7/00 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2011-7023735(분할)
(22) 출원일자(국제) 2006년07월05일
심사청구일자 2011년10월10일
(85) 번역문제출일자 2011년10월10일
(65) 공개번호 10-2011-0115625
(43) 공개일자 2011년10월21일
(62) 원출원 특허 10-2011-7013029
원출원일자(국제) 2006년07월05일
심사청구일자 2011년06월07일
(86) 국제출원번호 PCT/US2006/026480
(87) 국제공개번호 WO 2007/008646
국제공개일자 2007년01월18일
(30) 우선권주장
60/698,442 2005년07월12일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
US20040000974 A1
US20040183622 A1
EP1335477 A2

(73) 특허권자
메사추세츠 인스티튜트 오브 테크놀로지
미국 02139 메사추세츠 캠프리지 메사추세츠 애브뉴 77
(72) 발명자
조안노폴로스 존 디.
미국 02478 메사추세츠주 벨몬트 더글라스 로드 64
카라리스 아리스테이디스
미국 02111 메사추세츠주 보스턴 아파트먼트 21에프 트레몬트 스트리트 151
솔라시치 마린
미국 02744 메사추세츠주 섬머빌 페어팩스 스트리트 67
(74) 대리인
유미특허법인

전체 청구항 수 : 총 28 항

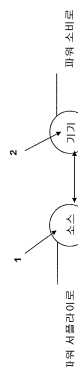
심사관 : 김홍섭

(54) 발명의 명칭 무선 비-방사성 에너지 전달

(57) 요약

전자기 에너지 전달 기기는 외부의 파워 서플라이로부터 에너지를 수용하는 제1 공진기 구조체를 포함한다. 제1 공진기 구조체는 제1 Q-인자를 가진다. 제2 공진기 구조체는 제1 공진기 구조체로부터 멀리(distal)에 위치하며, 유용한 워킹 파워를 외부 로드(external load)에 공급한다. 제2 공진기 구조체는 제2 Q-인자를 가진다. 이 두 공진기들 사이의 거리는 각각의 공진기의 특성 크기보다 클 수 있다. 제1 공진기 구조체와 제2 공진기 구조체 사이의 비-방사성 에너지 전달은 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체의 공진-필드 소산 테일(resonant-field evanescent tail)들의 커플링을 통해 전달된다.

대표도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

무선 전자기 에너지 전달 방법으로서,

외부의 파워 서플라이로부터 에너지를 받고, 제1 Q-인자 Q_1 를 가지는 제1 공진기 구조체를 제공하는 단계;

상기 제1 공진기 구조체로부터 떨어져(distal) 위치하며, 유용한 워킹 파워(working power)를 외부 로드(external load)에 공급하고, 제2 Q-인자 Q_2 를 가지는 제2 공진기 구조체를 제공하는 단계; 및

상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체의 공진-필드 소산 테일들(resonant-field evanescent tails)의 커플링을 통해 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체 사이에 비-방사적으로 에너지를 전달하는 단계

를 포함하고,

상기 제1 및 제2 공진기 구조체들은, 비-방사적 에너지 전달을 위해, 진성 손실률(intrinsic-loss rate) $\Gamma_{1,2}$ 에 대한 $Q = \omega / (2\Gamma)$ 의 공진 모드를 사용하며,

가변 거리 $D/L_2 > 1$ 이면서 $\kappa / \sqrt{(\Gamma_1 * \Gamma_2)} > 1$ 을 만족하고, 여기서 κ 는 상기 공진기 구조체 간의 에너지 전달의 레이트이고, D 는 공진기 구조체 간의 거리이며, L_2 는 상기 제2 공진기 구조체의 크기인,

무선 전자기 에너지 전달 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

$Q_1 > 100$ 및 $Q_2 > 100$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

가변 거리 $D/L_2 > 2$ 이면서 $\kappa / \sqrt{(\Gamma_1 * \Gamma_2)} > 1$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

가변 거리 $D/L_2 > 3$ 이면서 $\kappa / \sqrt{(\Gamma_1 * \Gamma_2)} > 1$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

가변 거리 $D/L_2 > 5$ 이면서 $\kappa / \sqrt{(\Gamma_1 * \Gamma_2)} > 1$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 방법.

청구항 6

무선 전자기 에너지 전달 장치에 있어서,

외부의 파워 서플라이로부터 에너지를 받고, 제1 Q-인자 Q_1 를 가지는 제1 공진기 구조체

를 포함하고,

상기 제1 공진기 구조체는 제2 공진기 구조체와 함께 사용되며, 상기 제2 공진기 구조체는 상기 제1 공진기 구조체로부터 떨어져 위치하며, 유용한 워킹 파워를 외부 로드(external load)에 공급하고, 제2 Q-인자 Q_2 를 가지며,

상기 제1 공진기 구조체 및 상기 제2 공진기 구조체 간의 비-방사적 에너지 전달은 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체의 공진-필드 소산 테일들의 커플링을 통해 중계되고,

상기 제1 및 제2 공진기 구조체들은, 비-방사적 에너지 전달을 위해, 진성 손실률(intrinsic-loss rate) $\Gamma_{1,2}$ 에 대한 $Q=\omega/(2\Gamma)$ 의 공진 모드를 사용하며,

가변 거리 $D/L_2>1$ 이면서 $\kappa/\sqrt{\Gamma_1*\Gamma_2}>1$ 을 만족하고, 여기서 κ 는 상기 공진기 구조체 간의 에너지 전달의 레이트이고, D 는 공진기 구조체 간의 거리이며, L_2 는 상기 제2 공진기 구조체의 크기인,

무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 7

제6항에 있어서,

$Q_1>100$ 및 $Q_2>100$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 8

제6항에 있어서,

가변 거리 $D/L_2>2$ 이면서 $\kappa/\sqrt{\Gamma_1*\Gamma_2}>1$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 9

제6항에 있어서,

가변 거리 $D/L_2>3$ 이면서 $\kappa/\sqrt{\Gamma_1*\Gamma_2}>1$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 10

제6항에 있어서,

가변 거리 $D/L_2>5$ 이면서 $\kappa/\sqrt{\Gamma_1*\Gamma_2}>1$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 11

제6항에 있어서,

상기 제1 공진기 구조체는 용량적으로-로딩된 전도성-와이어 루프(capacitively-loaded conducting-wire loop)를 포함하고 상기 제1 공진기 구조체의 크기 L_1 은 상기 루프의 반경인, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 제2 공진기 구조체는 이동 무선 수신기의 일부인, 무선 전자기 에너지 전달 방법.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 이동 무선 수신기는 로봇(robot), 자동차, 또는 컴퓨터 중 어느 하나인, 무선 전자기 에너지 전달 방법.

청구항 14

제6항에 있어서,

상기 제2 공진기 구조체는 이동 무선 수신기의 일부인, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 이동 무선 수신기는 로봇(robot), 자동차, 또는 컴퓨터 중 어느 하나인, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 16

제1항에 있어서,

상기 제1 및 제2 공진기 구조체의 공진을 매치(match)시키기 위해, 피드백 메커니즘을 적용하는 단계를 더 포함하는, 무선 전자기 에너지 전달 방법.

청구항 17

제6항에 있어서,

상기 제1 및 제2 공진기 구조체의 공진을 매치(match)시키기 위해, 피드백 메커니즘을 더 포함하는 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 18

제6항에 있어서,

상기 제1 공진기 구조체가 에너지를 받는 상기 외부의 파워 서플라이를 더 포함하는 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 19

외부의 파워 서플라이로부터 에너지를 받으며 제1 Q-인자 Q_1 를 가지는 제1 공진기 구조체와 사용되는 무선 전자기 에너지 전달 장치에 있어서,

상기 제1 공진기 구조체로부터 떨어져 위치하며, 유용한 위킹 파워를 외부 로드에게 공급하고, 제2 Q-인자 Q_2 를 가지는 제2 공진기 구조체

를 포함하고,

상기 제1 공진기 구조체 및 상기 제2 공진기 구조체 간의 비-방사적 에너지 전달은 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체의 공진-필드 소산 테일들의 커플링을 통해 중계되고,

상기 제1 및 제2 공진기 구조체들은, 비-방사적 에너지 전달을 위해, 진성 손실률(intrinsic-loss rate) $\Gamma_{1,2}$ 에 대한 $Q=\omega/(2\Gamma)$ 의 공진 모드를 사용하며,

가변 거리 $D/L_2 > 1$ 이면서 $\kappa/\sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2} > 1$ 을 만족하고, 여기서 κ 는 상기 공진기 구조체 간의 에너지 전달의 레이트이고, D 는 공진기 구조체 간의 거리이며, L_2 는 상기 제2 공진기 구조체의 크기인,

무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 20

제19항에 있어서,

상기 제2 공진기 구조체는 용량적으로-로딩된 전도성-와이어 루프를 포함하며, 상기 크기 L_2 는 상기 루프의 반경인, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 21

제19항에 있어서,

$Q_1 > 100$ 및 $Q_2 > 100$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 22

제19항에 있어서,

가변 거리 $D/L_2 > 2$ 이면서 $\kappa / \sqrt{\Gamma_1 * \Gamma_2} > 1$ 을 만족하는, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 23

제19항에 있어서,

상기 제2 공진기 구조체는 이동 무선 수신기의 일부인, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 24

제23항에 있어서,

상기 이동 무선 수신기는 로봇(robot), 자동차, 또는 컴퓨터 중 어느 하나인, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 25

제19항에 있어서,

상기 제1 및 제2 공진기 구조체의 공진을 매치(match)시키기 위한 피드백 메커니즘을 더 포함하는, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 26

제1항에 있어서,

상기 제1 및 제2 공진기 구조체들은 최소 5MHz의 공진 주파수에서 구동되는, 무선 전자기 에너지 전달 방법.

청구항 27

제6항에 있어서,

상기 제1 및 제2 공진기 구조체들은 최소 5MHz의 공진 주파수에서 구동되도록 구성되어 있는, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

청구항 28

제19항에 있어서,

상기 제1 및 제2 공진기 구조체들은 최소 5MHz의 공진 주파수에서 구동되도록 구성되어 있는, 무선 전자기 에너지 전달 장치.

명세서

기술 분야

[0001] 본 발명은 진동 공진 전자기 모드의 분야에 관한 것이며, 특히 무선 비-방사성 에너지 전달에 있어서 국부화된 느린 소산장(消散場; evanescent field) 패턴을 이용하는, 진동 공진 전자기 모드에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 전자기학의 초창기에, 전력망(electrical-grid wire)이 활용되기 전에는, 어떠한 전송 매체(carrier medium)의 사용 없이 무선으로 먼거리에 에너지를 전달하는 방식의 개발에 진지한 관심과 노력이 집중되었다. 이러한 노력은 설혹 성공적이었다하더라도 별 성과를 내지 못하였다. 정보 전달에 매우 유용한 전방향 안테나(omni-directional antenna)의 방사 모드는, 막대한 양의 에너지를 자유 공간에서 허비하기 때문에, 이러한 에너지 전달에는 적절하지 않다. 레이저 또는 고 지향성 안테나(highly-directional antenna)를 사용하는, 지향성 방사 모드(directed radiation mode)는 먼거리에 대해서도(전달 거리 $L_{\text{TRANS}} \gg L_{\text{DEV}}$, 여기서 L_{DEV} 는 기기의 특성 크기(characteristic size)임), 에너지 전달에 효율적으로 사용될 수 있지만, 이동 객체(mobile object)의 경우에는 서는, 끊김 없는 가시거리(line-of-sight) 및 복잡한 추적 시스템의 존재를 필요로 한다.

[0003] 최근 독자적 전자 기기(랩탑, 셀폰, 가정용 로봇은 모두 통상적으로 화학 에너지 저장부(storage)에 의존함)의 급속한 개발은 이러한 문제점을 다시 연구하는 것을 정당화한다. 오늘날, 기존의 전력망은 에너지를 거의 모든

곳에 전달하는 데, 중거리 무선 비-방사성 에너지 전달조차 아주 유용할 것이다. 몇몇 중요한 응용에 현재 사용되고 있는 한 가지 방식은 유도(induction)에 의존하고 있으나, 매우 근거리($L_{\text{TRANS}} \ll L_{\text{DEV}}$) 에너지 전달에 제한된다.

발명의 내용

- [0004] 본 발명의 한 측면에 따르면, 전자기 에너지 전달 기기가 제공된다. 이 전자기 에너지 전달 기기는 외부의 파워 서플라이로부터 에너지를 수송하는 제1 공진기 구조체를 포함한다. 제1 공진기 구조체는 제1 Q-인자를 가진다. 제2 공진기 구조체는 제1 공진기 구조체로부터 떨어져(distal) 위치하며, 유용한 워킹 파워를 외부 로드에게 공급한다. 제2 공진기 구조체는 제2 Q-인자를 가진다. 이 두 공진기들 사이의 거리는 각각의 공진기의 특성 크기보다 클 수 있다. 제1 공진기 구조체와 제2 공진기 구조체 사이의 비-방사성 에너지 전달은 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체의 공진-필드 소산 테일(resonant-field evanescent tail)들의 커플링을 통해 전달된다.
- [0005] 본 발명의 한 측면에 따르면, 전자기 에너지 전달 기기가 제공된다. 이 전자기 에너지 전달 기기는 외부의 파워 서플라이로부터 에너지를 수송하며, 제1 공진 주파수 ω_1 , 제1 Q-인자 Q_1 , 및 특성 크기 L_1 를 가지는 제1 공진기 구조체; 및
- [0006] 상기 제1 공진기 구조체로부터 떨어져 위치하며, 가장 가까운 거리 D에서, 제2 공진 주파수 ω_2 , 제2 Q-인자 Q_2 , 및 특성 크기 L_2 를 가지는 제2 공진기 구조체
- [0007] 를 포함하며,
- [0008] 두 개의 상기 주파수 ω_1 및 ω_2 는 두 개의 공진 폭 Γ_1 및 Γ_2 , 중 더 좁은 폭 내에서 근접하며,
- [0009] 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체 사이의 비-방사성 에너지 전달은 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체의 공진-필드 소산 테일들의 커플링을 통해 전달되며, 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체 사이의 에너지 전달의 속도는 κ 에 의해 표시되며,
- [0010] 비-방사성 수단 D는 상기 공진기들 각각의 파장 λ_1 및 λ_2 보다 작으며, c는 주위의 매질에서 방사의 전파 속도이다.
- [0011] 특히, 상기 제1 공진기 구조체 및 상기 제2 공진기 구조체는, $Q_1 > 200$ 및 $Q_2 > 200$, $\kappa / \sqrt{(\Gamma_1 * \Gamma_2)} > 0.2, 0.5, 1, 2, 5$, 및 $D/L_2 > 1, 2, 3, 5$ 의 특성을 가지는 경우일 수 있다.
- [0012] 또한, 상기 에너지 전달 기기 내의 상기 공진 필드는 전자기 공진 필드 또는 상기 에너지 전달 기기 내의 상기 공진 필드는 음향 공진 필드일 수 있다.
- [0013] 또한, 상기 제1 공진기 구조체 및 상기 제2 공진기 구조체는, 유전체 구(dielectric sphere), 금속 구(metallic sphere), 금속유전체 구(metallodielectric sphere), 플라스몬 구(plasmonic sphere), 폴라리토닉 구(polaritonic sphere), 또는 용량적으로-로딩된 전도성-와이어 루프(capacitively-loaded conducting-wire loop)를 포함할 수 있다.
- [0014] 또한, 상기 특성 크기(characteristic size) L_1 및 L_2 는, 상기 유전체 구의 반경, 상기 금속 구의 반경, 상기 금속유전체 구의 반경, 상기 플라스몬 구의 반경, 상기 폴라리토닉 구의 반경, 또는 상기 루프의 반경일 수 있다.
- [0015] 본 발명의 한 측면에 따르면, 전자기 에너지 전달 방법이 제공된다. 이 전자기 에너지 전달 방법은 외부의 파워 서플라이로부터 에너지를 수송하는 제1 공진기 구조체를 제공하는 단계를 포함한다. 제1 공진기 구조체는 제1 Q-인자를 가진다. 또한, 이 전자기 에너지 전달 방법은 제1 공진기 구조체로부터 떨어져 위치하며, 유용한 워킹 파워를 외부 로드에게 공급하는 제2 공진기 구조체를 제공하는 단계를 포함한다. 제2 공진기 구조체는 제2 Q-인자를 가진다. 이 두 공진기들 사이의 거리는 각각의 공진기의 특성 크기보다 클 수 있다. 또한, 전자기 에너지 전달 방법은 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체의 공진-필드 소산 테일(resonant-field evanescent tail)들의 커플링을 통해 제1 공진기 구조체와 제2 공진기 구조체 사이에 비-방사성 에너지를 전달하는 단계를 포함한다.

- [0016] 본 발명의 한 측면에 따르면, 전자기 에너지 전달 방법이 제공된다. 이 에너지 전달 방법은 외부의 파워 서플라이로부터 에너지를 수송하며, 제1 공진 주파수 ω_1 , 제1 Q-인자 Q_1 , 및 특성 크기(characteristic size) L_1 를 가지는 제1 공진기 구조체를 제공하는 단계;
- [0017] 상기 제1 공진기 구조체로부터 떨어져(distal) 위치하며, 가장 가까운 거리 D에서, 제2 공진 주파수 ω_2 , 제2 Q-인자 Q_2 , 및 특성 크기 L_2 를 가지는 제2 공진기 구조체를 제공하는 단계; 및
- [0018] 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체 사이에 비-방사적으로 에너지를 전달하는 단계로서, 상기 에너지 전달은 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체의 공진-필드 소산 테일들(resonant-field evanescent tails)의 커플링을 통해 전달되며, 상기 제1 공진기 구조체와 상기 제2 공진기 구조체 사이의 에너지 전달의 레이트(rate)는 κ 에 의해 표시되는, 상기 에너지를 전달하는 단계
- [0019] 를 포함하며,
- [0020] 두 개의 상기 주파수 ω_1 및 ω_2 는 두 개의 공진 폭 Γ_1 및 Γ_2 , 중 더 좁은 폭 내에서 근접하고,
- [0021] 비-방사성 수단 D는 상기 공진기들 각각의 파장 λ_1 및 λ_2 보다 작으며, c는 주변 매질(surrounding medium)에서의 방사의 전파 속도(propagation speed)이다.
- [0022] 특히, 상기 제1 공진기 구조체 및 상기 제2 공진기 구조체는, $Q_1 > 100$ 및 $Q_2 > 100$, $\kappa / \sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2} > 0.2, 0.5, 1, 2, 5$, 및 $D/L_2 > 1, 2, 3, 5$ 를 만족하는 경우,
- [0023] 상기 제1 공진기 구조체 및 상기 제2 공진기 구조체는, $Q_1 > 200$ 및 $Q_2 > 200$, $\kappa / \sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2} > 0.2, 0.5, 1, 2, 5$, 및 $D/L_2 > 1, 2, 3, 5$ 를 만족하는 경우,
- [0024] 상기 제1 공진기 구조체 및 상기 제2 공진기 구조체는, $Q_1 > 500$ 및 $Q_2 > 500$, $\kappa / \sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2} > 0.2, 0.5, 1, 2, 5$, 및 $D/L_2 > 1, 2, 3, 5$ 를 만족하는 경우, 및
- [0025] 상기 제1 공진기 구조체 및 상기 제2 공진기 구조체는, $Q_1 > 1000$ 및 $Q_2 > 1000$, $\kappa / \sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2} > 0.2, 0.5, 1, 2, 5$, 및 $D/L_2 > 1, 2, 3, 5$ 를 만족하는 경우가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0026] 도 1은 본 발명의 예시적 실시예를 도시하는 개략도이다.
- 도 2a는 전계와 함께 반경 r의 고-굴절률 디스크 캐비티(high-index disk cavity)에 대한 수치적 FDTD 결과를 나타내는 도면이고; 도 2b는 두 개의 공진 디스크 캐비티들 사이의 중거리 커플링에 대한 수치적 FDTD 결과를 나타내는 도면으로서, 초기에, 모든 에너지는 하나의 캐비티 내에 있고(좌측 패널), 약간의 시간이 흐른 후 양 캐비티가 동일하게 여기된다(우측 패널).
- 도 3은 두 개의 용량적으로-로딩된 전도성 와이어 루프(capacitively-loaded conducting-wire loop)를 나타내는 개략도이다.
- 도 4a 및 도 4b는 외래 객체(extraneous object)로부터의 산란(scattering)에 기인한 공진 디스크 캐비티의 방사-Q의 감소에 대한 수치적 FDTD 결과를 나타내는 도면이다.
- 도 5는 외래 객체의 존재 시에 두 개의 공진 디스크 캐비티들 사이의 중거리 커플링에 대한 수치적 FDTD 결과를 나타내는 도면이다.
- 도 6a 및 도 6b는 공급된 파워가 유용한 일(η_w), 기기에서의 방사 및 저항 손실(ohmic loss)(η_d), 소스(η_s), 및 인체 내에서의 소산(dissipation)(η_h)으로의 변환 효율성을 커플링-대- κ / Γ_d 의 함수로서 나타내는 그래프들로서, 패널 (a)에서 Γ_w 는 기기 내에 저장되는 에너지를 최소화하도록 선택되는 반면, 패널 (b)에서 Γ_w 는 각각의 κ / Γ_d 에 대한 효율성 η_w 를 최소화하도록 선택된다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0027] 현재의 존재하는 방식과는 대조적으로, 본 발명은 무선 비-방사성 에너지 전달에 있어서, 국부화된 느린 소산장(消散場; evanescent field) 패턴을 이용하는, 장수의(long-lived) 진동 공진 전자기 모드를 사용하는 가능성(feasibility)을 제공한다. 이 기술의 기본은, 두 개의 동일한 진동수의 공진 객체가 다른 이탈-공진의 환경 객체(off-resonant environmental object)와 약하게 상호작용하면서 커플링하기 쉽다는 것이다. 본 발명의 목적은 특정한 예들을 이용하여 이 메커니즘(mechanism)을 정량화하는 것으로서, 즉 다음의 문제들: 이러한 방식이 어느 거리까지 효과적일 수 있으며 외부의 섭동(external perturbation)에 대해 얼마나 민감한지를 양적으로 다룬다. 상세한 이론적 및 수치적 분석은, 다른 이탈-공진 객체로의 에너지의 단지 적당한 전달 및 소산을 겪으면서, 중거리($L_{\text{TRANS}} \approx \text{few} * L_{\text{DEV}}$) 무선 에너지-교환이 실질적으로 달성될 수 있다는 것을 보여주고 있다.

[0028] 근거리장(near field)의 전방향(omnidirectional)이면서 고정된(비손실) 속성(nature)은 이 메커니즘을 이동 무선 수신기(mobile wireless receiver)에 적절하게 한다. 그러므로 예를 들어, 로봇, 차량, 컴퓨터 등과 같은 기기는 실내에서 자유롭게 로밍되는 반면, 공장 실내의 천장에 유선 전기회로망에 접속된 소스를 설치하는 것을 포함하는 다양한 응용이 가능하다. 다른 가능성 있는 응용은 전기-엔진 버스(electric-engine buses), RFID 및 심지어 나노-로봇조차도 가능하다.

[0029] 본 발명의 무선 에너지-전달 방식의 범위 및 레이트는, 작업에 사용하기 위한 시스템으로부터의 에너지 배출(energy drainage)을 여전히 고려하지 않는, 시험의 1차적 과제이다. 공진 객체들 사이의 에너지 교환을 모델링하는 데 적절한 분석적 구조(analytical framework)는 "커플링-모드 이론(coupled-mode theory)"이라 칭하는 약한-커플링 접근(weak-coupling approach) 방식이다. 도 1은 본 발명의 일반적인 설명을 나타내는 개략도이다. 본 발명은 에너지 전달을 수행하기 위해 소스 및 기기를 사용한다. 소스(1) 및 기기(2)는 모두 공진기 구조체이고, 서로 거리 D만큼 분리되어 있다. 이러한 배열에서, 소스(1) 및 기기(2)의 시스템의 전자기

장은 $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \approx \mathbf{a}_1(t)\mathbf{F}_1(\mathbf{r}) + \mathbf{a}_2(t)\mathbf{F}_2(\mathbf{r})$ 에 의해 근사되고, 여기서 $\mathbf{F}_{1,2}(\mathbf{r}) = [\mathbf{E}_{1,2}(\mathbf{r}) \ \mathbf{H}_{1,2}(\mathbf{r})]$ 는 소스(1) 및 기기(2)만의 고유모드(eigenmode)이며, 필드 진폭 $a_1(t)$ 및 $a_2(t)$ 는 "커플링-모드 이론"을 만족하도록 보여질 수 있다:

수학식 1

$$\begin{aligned} \frac{da_1}{dt} &= -i(\omega_1 - i\Gamma_1)a_1 + iK_{11}a_1 + iK_{12}a_2 \\ \frac{da_2}{dt} &= -i(\omega_2 - i\Gamma_2)a_2 + iK_{22}a_2 + iK_{21}a_1 \end{aligned},$$

[0030]

[0031] 여기서 $\omega_{1,2}$ 는 개별적인 고유진동수(eigenfrequency)이고, $\Gamma_{1,2}$ 는 객체의 진성(intrinsic)(흡수, 방사 등) 손실에 기인한 공진 폭이며, $K_{12,21}$ 는 커플링 계수이며, $K_{11,22}$ 는 다른 것의 존재에 기인한 각각의 객체의 복소 주파수(complex frequency)에서의 시프트를 모델링한다.

[0032] 수학식 1의 방식은, 여러 가지 경우에 대해, 유사한 복소 고유진동수들(complex eigenfrequency)(즉, $|\omega_1 - \omega_2| \ll |K_{12,21}|$ 및 $\Gamma_1 \approx \Gamma_2$)의 객체들에 대한 공진 현상의 우수한 설명을 제공하도록 제시되었으며, 이 공진은 합리적으로 잘 정의되고(즉, $\Gamma_{1,2} \& \text{Im}\{K_{11,22}\} \ll |K_{12,21}|$), 약한 커플링 한계(weak coupling limit)(즉, $|K_{12,21}| \ll \omega_{1,2}$) 내에 있다. 동시에, 이러한 요건들도 또한 에너지 전달을 위한 최적의 동작을 가능하게 한다. 또한, 수학식 1은, 에너지 교환이 정확한 공진에서($\omega_1 = \omega_2$ 및 $\Gamma_1 = \Gamma_2$) 거의 완벽할 수 있으며, "커플링-시간(coupling-time)"이 전체 "손실-시간(loss-time)"보다 훨씬 짧을 때 최소화된다는 것을 보여준다. 그러므로, 본 발명은 낮은 진성 손실률(low intrinsic-loss rate) $\Gamma_{1,2}$ 에 대한 높은 $Q = \omega / (2\Gamma)$ 의 공진 모드를 필요로 하며, 소산 테일(evanescent tail)은 먼 거리 D에 걸쳐 강한 커플링률 $|K_{12,21}|$ 에 대한 두 개의 객체의 특성 크기(characteristic size) L_1, L_2 보다 상당히 길며, 여기서 D는 두 개의 객체 사이의 가장 가까운 거리이다. 이

것은, 근처 기기들과의 간섭을 최소화하기 위해 일반적으로 짧은 테일을 선호하기 때문에, 광범위하게 연구되지 않은 동작의 영역이다.

[0033] 유전체 도파로(dielectric waveguide)와 같이 거의 무한한 범위의 객체들은 도파 모드(guided mode)들을 지원할 수 있으며, 이 모드들의 소산 테일은 객체로부터 멀어지는 방향으로 기하급수적으로 감쇠하되, 차단(cutoff)에 가깝게 조정되는 경우에는 천천히 감쇠하며, 거의 무한한 Q를 가질 수 있다. 본 발명의 에너지 전달 방식을 구현하기 위해, 이러한 형상(geometry)은 특정한 응용에는 적절할 수 있지만, 일반적으로 유한의 객체들, 즉 공기에 의해 모든 곳이 위상적으로(topologically) 둘러싸여 있는 객체들이 더 적당하다.

[0034] 불행히도, 유한한 범위의 객체들은, 자유 공간: $\bar{k}^2 = \omega^2 / c^2$ 내에 있기 때문에, 공기 중에서 사방으로 기하급수적으로 감쇠하는 전자기 상태를 지원할 수 없다. 이 때문에, 객체들이 무한한 Q의 상태들을 지원할 수 없다는 것을 볼 수 있다. 그렇지만, 매우 긴 수명 (소위 "하이-Q(high-Q)") 상태를 발견할 수 있는 데, 이것의 테일은, 진동(방사)하기 전에 충분히 긴 거리에 걸쳐 공진 객체로부터 멀어지는 필요한 지수형 감쇠(needed exponential-like decay)를 표시한다. 필드 작용(field behavior)에서 이러한 변화가 일어나는 경우, 한계 표면을 "방사 부식(radiation caustic)"이라 칭하며, 원거리/방사 필드(far/radiation fields)가 아닌 근거리장에 기초하도록 되어 있는 무선 에너지-전달 방식에 있어서, 커플링된 객체들 간의 거리는 틀림 없이 한 객체가 다른 객체의 방사 부식 내에 있도록 되어 있을 것이다.

[0035] 본 발명은 매우 일반적이고 위의 조건들을 만족시키는 어떠한 유형의 공진 구조체도 그 구현에 사용될 수 있다. 예로서 그리고 명확함을 위해, 잘 알려진, 그러나 확연히 다른 두 가지의 전자기 공진 시스템을 이용하여 작업하도록 선택할 수 있다: 유전체 디스크 루프 및 용량적으로-로딩된 전도성-와이어 루프. 최적화 없이도, 그리고 그 간략함에도 불구하고, 두 가지는 상당히 우수한 성능을 나타내도록 보여질 것이다. 이것들의 차이는, 전도체 물질이 손실이 높기 때문에, 예를 들어, 광학 영역 유전체에서의 실용적인 고려가 우선됨으로 해서, 대부분 적용 가능한 주파수 범위 내에 있다.

[0036] 도 2a에 도시된 바와 같이, 하이-Q 위스퍼링 갤러리 모드(whispering-gallery mode)를 지원하는 공기에 의해 둘러싸인 반경 r 및 유전율 ϵ 의 2D 유전체 디스크 캐비티를 고찰한다. 이러한 캐비티는, 원통 좌표계에서의 변수의 분리 및 경계 조건의 응용과 같은 분석적 모델링과, 30pts/r의 해상도를 가진 상세한 수치적 시간 영역 유한 차분(finite-difference-time-domain; FDTD) 시뮬레이션을 이용하여 조사된다. 3D 경우의 물리학은 현저히 상이해서는 안 되고, 분석적 복잡성 및 수치적 요건은 매우 증가하게 될 것임에 유의하라. 복소 고유진동수 및 소위 "누설(leaky)" 고유모드의 필드 패턴에 대한 두 가지 방법의 결과는 다양한 형상 및 관심의 대상이 되는 파라미터의 경우에 있어서 서로 탁월한 일치(excellent agreement)이다.

[0037] 방사 모델 감쇠 길이는, 이것은 커플링 세기(coupling strength) $K \equiv |K_{21}| = |K_{12}|$ 를 결정하는 데, 파장과 비슷하며, 그러므로 캐비티들 사이의 거리가 그들의 크기보다 긴 캐비티들 사이에서 근거리장 커플링이 발생하기 위해서, 서브파장-크기(subwavelength-sized) 공진 객체들($r \ll \lambda$)이 필요하다. 하이-방사-Q(high-radiation-Q) 및 긴-테일-서브파장 공진(long-tailed-subwavelength resonance)은, 유전체 유전율 ϵ 이 실제적으로 가능한 만큼 크고 (주요 수(principal number) m 의) 방위각 필드(azimuthal field) 변동이 느릴 때(즉, m 이 작음), 달성될 수 있다.

[0038] 하나의 이러한 TE-편광 유전체-캐비티 모드는, $\epsilon=147.7$ 및 $m=2$ 를 사용하는 양호한 특징 $Q_{\text{rad}}=1992$ 및 $\lambda/r=20$ 을 가지는 데, 이는 도 2a에 도시되어 있으며, 이러한 종류의 공진 객체들에 대한 모든 이후의 계산에 있어서 "테스트" 캐비티(18)일 것이다. 적절한 캐비티의 다른 예는 $\epsilon=65.61$ 및 $m=2$ 사용하는 $Q_{\text{rad}}=9100$ 및 $\lambda/r=10$ 을 가진다. ϵ 의 이러한 값들은 먼저 비현실적으로 크게 보일 수 있다. 그렇지만, 마이크로파 영역(미터-범위(meter-range) 커플링 응용에 적합함)에는 합리적으로 충분히 높은 유전 상수 및 낮은 손실(예를 들어, 티타니아(Titania): $\epsilon \approx 96$, $\text{Im}\{\epsilon\}/\epsilon \approx 10^{-3}$; 테트라티탄산 바륨(Barium tetratitanate): $\epsilon \approx 37$, $\text{Im}\{\epsilon\}/\epsilon \approx 10^{-4}$; 탄탈산 리튬(Lithium tantalite): $\epsilon \approx 40$, $\text{Im}\{\epsilon\}/\epsilon \approx 10^{-4}$; 등)을 가지는 많은 물질들이 존재할 뿐만 아니라, ϵ 는 그것 말고도 금속형(네거티브- ϵ) 물질 또는 금속유전체 광자 결정의 표면 상의 표면-플라즈몬(surface-plasmon) 모드와 같은, 다른 알려진 서브파장($\lambda/r \gg 1$) 표면-파 시스템의 실효 굴절률(effective index)을 나타낼 수 있다.

[0039] 물질 흡수와 관련해서, 마이크로파에서의 통상적인 손실 탄젠트(loss tangent)(예를 들어, 위의 물질들에 대해 열거된 것들)는 $Q_{\text{abs}} \sim \varepsilon' / \text{Im}\{\varepsilon\} \sim 10000$ 를 제시한다. 방사의 효과와 흡수의 효과를 조합하면, 위의 분석은, 적절하게 설계된 공진 기기 - 객체 d에 있어서 $Q_d \sim 2000$ 의 값이 달성될 수 있다는 것을 의미한다. 그렇지만, 공진 소스 s는 실제로 종종 움직일 수 없을 것이고 그 허용된 형상 및 크기에 대한 제약은 통상적으로 기기의 설계상의 제약보다는 덜 엄격할 것임에 유의해야 하며, 그러므로 흡수에 의해서만 제한되는 $Q_s \sim 10000$ 을 감안하여 방사 손실이 무시될 수 있을 정도로 설계될 수 있다는 것을 가정하는 것이 합리적이다.

[0040] 달성 가능한 에너지 전달 레이트(rate)를 계산하기 위해, 도 2b에 도시된 바와 같이, 두 개의 캐비티(20, 22)를 그 중심 간에 거리 D를 두고 위치시킬 수 있다. 이때 조합된 시스템의 정상 모드(normal mode)는 초기 모드들의 우수(even) 및 기수(odd) 중첩이며, 이것들의 주파수는 계산하고자 하는 커플링 계수 κ 에 의해 분할된다. 분석적으로, 커플링 모드 이론은 유전체 객체를 위해

$$\kappa_{12} = \omega_2 / 2 \cdot \int d^3r E_1^*(r) E_2(r) \varepsilon_1(r) / \int d^3r |E_1(r)|^2 \varepsilon(r)$$

를 주고, 여기서 $\varepsilon_{1,2}(r)$ 은 배경 유전체(자유 공간)을 배제한 단위 객체 1 단독 또는 객체 2 단독의 유전체 함수를 나타내고 $\varepsilon(r)$ 은 두 객체가 존재하는 전체 공간의 유전체 함수를 나타낸다. 수치적으로, 캐비티 중 하나를 여기하여 다른 캐비티에 대한 에너지-전달 시간을 계산하거나 또는 분할된 정상-모드 주파수를 결정함으로써, FDTD 시뮬레이션들을 사용하여 κ 를 알아낼 수 있다. "테스트" 디스크 캐비티의 경우, 방사 부식의 반경 r_c 는 $r_c \approx 11r$ 이고, 비-방사성 커플링의 경우에는 $D < r_c$ 이며, 그러므로 여기서 $D/r = 10, 7, 5, 3$ 을 선택할 수 있다. 이때, 도 3의 모드의 경우, 이것은 두 개의 캐비티를 연결하는 라인에 대하여 기수인 데, 분석 예측은 $\omega/2\kappa = 1602, 771, 298, 48$ 인 반면, 수치 예측은 각각 $\omega/2\kappa = 1717, 770, 298, 47$ 이므로, 두 방법은 잘 들어맞는다. 두 개의 초기 캐비티 모드의 방사 필드는 그 상대적 위상 및 진폭에 의존하여 보강적으로(constructively) 또는 상쇄적으로(deconstructively) 간섭하여, 증가하거나 감소되는 순수 방사 손실을 각각 유도해내며, 이에 따라 임의의 캐비티 거리의 경우에 우수 및 기수 정상 모드는, 하나는 초기의 단일-캐비티 $Q=1992$ (커플링-모드 이론에 의해 포착되지 않는 현상)보다 크고 하나는 작은 Q들을 가지되, 평균 Γ 는 항상 대략 $\Gamma \approx \omega/2Q$ 인 식으로 되어 있다. 그러므로, 대응하는 커플링-대-손실 비율은 $\kappa/\Gamma = 1.16, 2.59, 6.68, 42.49$ 이며, 비록 이것들이 이상적인 동작 영역 $\kappa/\Gamma \gg 1$ 에 해당되지는 않지만, 그럼에도 달성된 값들은 응용에 유용하기에 충분히 크다.

[0041] 도 3에 도시된 바와 같이, 반경 a의 원형 단면이 공기에 의해 둘러싸인 전도성 와이어의 반경 r의 N 코일의 루프

$$L = \mu_0 N^2 r [\ln(8r/a) - 2]$$

프(10 또는 12)를 고찰한다. 이 와이어는 인덕턴스 L 를 가지며, 여기서 μ_0 는 자유 공간의 투자율(magnetic permeability)이며, 따라서 이것을 캐패시턴스 C와 연결시키면 주파수

$$\omega = 1/\sqrt{LC}$$

에서의 루프 공진이 만들어진다. 공진의 속성은 커패시터 양단의 전압으로 인한 커패시터 내의 전계로부터 와이어의 전류로 인한 자유 공간 내의 자계의 에너지의 주기적 교환에 있다. 이러한 공진 시스템에서의 손실은 와이어 내의 저항 손실과 자유 공간으로의 방사 손실로 이루어진다.

[0042] 비-방사성 커플링에 있어서, 근거리장 영역을 사용하여야 하며, 근거리장 영역의 범위는 대략 파장 λ 에 의해 설정되며, 이에 따라 바람직한 동작 영역은 루프가 작은($r \ll \lambda$) 곳이다. 이러한 제한에서, 두 개의 손실 채널

$$R_{ohm} = \sqrt{\mu_0 \rho \omega / 2} \cdot N r / a \quad \text{및} \quad R_{rad} = \pi / 6 \cdot \eta_0 N^2 (\omega r / c)^4$$

과 연관된 저항은 각각

이고, 여기서 ρ 는 와이어 물질의 저항이고, $\eta_0 \approx 120\pi \Omega$ 는 자유 공간의 임피던스이다. 이때 이러한 공진의 품질 인자(quality factor)는 $Q = \omega L / (R_{ohm} + R_{rad})$ 이고, 시스템 파라미터에 의해 결정된 일부의 주파수의 경우에 가장 높으며, 낮은 주파수에서는 저항 손실에 의해 좌우되고 높은 주파수에서는 방사에 의해 좌우된다.

[0043] 마이크로파 단위로 대략의 추정치를 얻기 위해, 구리($\rho = 1.69 \cdot 10^{-8} \Omega m$) 와이어로 이루어진 하나의 코일($N=1$)을 사용할 수 있는 데, 이때, 예를 들어 셀 폰에 적절한, $r=1cm$ 및 $a=1mm$ 의 경우에는 품질 인자가 $f=380MHz$ 에서 $Q=1225$ 로 정점에 이르고, 랩톱 또는 가정용 로봇에 적절한 $r=30cm$ 및 $a=2mm$ 의 경우에는 품질 인자가 $f=17MHz$ 에서 $Q=1103$ 로 정점에 이르는 반면, (실내 천장 위의 소스 루프일 수 있는) $r=1m$ 및 $a=4mm$ 의 경우에는 품질 인자

가 $f=5\text{MHz}$ 에서 $Q=1315$ 로 정점에 이른다. 그래서 일반적으로, 예상되는 품질 인자는 $\lambda/r \approx 50-80$ 에서 $Q \approx 1000-1500$ 인데, 즉 근거리장 커플링에 적절하다.

[0044] 그 중심 간 거리 D 에서 두 개의 루프(10 및 12) 사이의 에너지 전달의 레이트는, 도 3에 도시된 바와 같이,

$\kappa_{12} = \omega M / 2\sqrt{L_1 L_2}$ 로 주어지며, 여기서 M 은 두개의 루프(10 및 12)의 상호 인덕턴스이다. 한계 $r \ll$

$D \ll \lambda$ 에서, 준정적 결과(quasi-static result) $M = \pi/4 \cdot \mu_0 N_1 N_2 (\eta r_2)^2 / D^3$ 를 사용할 수 있

으며, 이것은 $\omega/2\kappa \sim (D/\sqrt{\eta r_2})^3$ 를 의미한다. 예를 들어, 다시 $D/r=10, 8, 6$ 를 선택함으로써, $r=1\text{cm}$ 의 두 개의 루프에 대하여, 위에서 사용된 것과 동일하게, $\omega/2\kappa=3033, 1553, 655$ 를 각각 얻을 수 있고, $r=30\text{cm}$ 의 경우에, $\omega/2\kappa=7131, 3651, 1540$ 을 얻을 수 있으며, $r=1\text{m}$ 의 경우에, $\omega/2\kappa=6481, 3318, 1400$ 을 얻을 수 있다. 대응하는 커플링-대-손실 비율(coupling-to-loss ratio)은, 단일-루프 Q 가 피크에 이르는 주파수에서 피크이며, 세 개의 루프 종류 및 거리에 있어서 $\kappa/\Gamma=0.4, 0.79, 1.97$ 및 $0.15, 0.3, 0.72$ 및 $0.2, 0.4, 0.94$ 이다. 다른 루프들의 예는, 거리 $D=3\text{m}$ (실내 높이)가 떨어진 경우의, $r=1\text{m}$ (천장에서의 소스) 루프 및 $r=30\text{cm}$ (바닥 위의 가정용 로봇) 루프인 경우이며, 이 경우 개별적인 Q 들의 피크들 사이에서는, $f=6.4\text{MHz}$ 에서

$\kappa/\sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2} = 0.88$ 피크이다. 다시, 이러한 값들은 최적의 영역 $\kappa/\Gamma \gg 1$ 내에 있는 것이 아니라, 충분한 것으로 보여질 것이다.

[0045] 에너지 전달을 위해서는 이러한 유도 방식(inductive scheme)과 이미 사용되는 근거리 유도 방식(close-range inductive scheme)들 사이의 차이를 이해하는 것이 중요하며, 이 차이는 이러한 방식들이 이탈-공진(non-resonant) 방식이라는 점이다. 커플링-모드 이론을 사용하여, 형상과 소스에 저장된 에너지를 일정하게 유지하면, 현재 제안된 공진-커플링 유도 메커니즘이, 종래의 이탈-공진 메커니즘보다 기기에서의 작업을 위해 Q 가 근사적으로 1000배 이상의 파워를 전달시킬 수 있다는 것을 보이는 것은 용이하며, 이것이 바로 중간-범위 에너지 전달이 가능한 이유이다. 용량적으로-로딩된 전도성 루프는 공진 안테나로서 (예를 들어 셀폰에서) 실제로 폭넓게 사용되고 있지만, $r/\lambda \sim 1$ 로 원거리장(far-field) 영역에서 동작하며, 방사 Q 는 안테나가 효율적일 수 있도록 의도적으로 작게 설계되어 있으며, 이에 따라 에너지 전달에는 적절하지 않다.

[0046] 분명하게, 본 발명의 공진 기반의 무선 에너지-전달 방식의 성공은 객체의 공진의 견고성(robustness)에 크게 의존한다. 그러므로 근처의 랜덤 이탈-공진 외래 객체의 존재에 대한 이것들의 감도는 분석을 필요로 하는 제안된 방식의 다른 측면이다. 공진 객체와 외래 객체의 상호작용은 수학적 1의 커플링-모드-이론 모델의 변형에 의해 얻어질 수 있는데, 외래 객체는 잘 정의된 공진(well-defined resonance)을 갖지 않거나 공진이 거의 일어나지 않지 않지(far-off-resonance) 때문에, 공진 객체와 외래 객체 간의 에너지 교환은 최소이고, 그래서 수학적 1에서의 항 κ_{12} 는 삭제될 수 있다. 공진 객체 $a_1(t)$ 에서 필드 진폭에 대한 적절한 분석적 모델은 다음과 같이 된다:

수학적 2

$$\frac{da_1}{dt} = -i(\omega_1 - i\Gamma_1)a_1 + i\kappa_{11}a_1$$

[0047]

[0048] 즉, 외래 객체의 영향은 단지 공진 객체의 공진에 대한 섭동일 뿐이며 그리고 그것은 이중(twofold)이다. 첫째, κ_{11} 의 실수부를 통해 그 공진 주파수를 시프트시킴과 그래서 다른 객체들로부터 이조(detune)시킨다. 이것은, 형상에서의 작은 변화를 통해, 그 주파수를 조정하는 모든 기기에 피드백 메커니즘을 적용함으로써 보다 쉽게 수정될 수 있는 문제이고, 그 주파수를 소스의 주파수에 일치시킨다. 둘째, 그 유도된 분극화(induced polarization)이나 그 내부의 전류를 통한 외래 객체로부터의 방사로의 산란으로 인해, 그리고 κ_{11} 의 허수부를 통한 외부 객체에서의 물질 흡수로 인해, 공진 객체가 모달 에너지(modal energy)를 잃어버리게 한다. Q 에서의

이러한 감소는 에너지-전달 방식의 기능성에 대해 악영향이 될 수 있는 데, 왜냐하면 이것은 교정될 수 없으므로 그 진폭이 정량화되어야 하기 때문이다.

[0049] 고찰되어 온 공진 객체들의 제1 예에서, 유전체 디스크 객체, 작은(small) 객체, 저굴절률 객체, 저-물질-손실(low-material-loss) 객체 또는 멀리 벗어난 객체(far-away stray objects)들의 종류는 작은 산란 및 흡수를 유도할 것이다. Q의 감소에 대해 더 위험한 실재의 경우를 시험하기 위해, "테스트" 유전체 디스크 캐비티(40)를, a) 도 4a에 도시된 바와 같이, 큰(large) $\text{Re}\{\epsilon\}=49$ 및 $\text{Im}\{\epsilon\}=16$ 이고 크기는 같되 형상이 상이한, 인체와 같은, 다른 이탈-공진의 객체(off-resonance object)(42); 및 b) 도 4b에 도시된 바와 같이, 큰 면적(large extent)이되 작은(small) $\text{Re}\{\epsilon\}=2.5$ 및 $\text{Im}\{\epsilon\}=0.05$ 인, 벽과 같은, 거친 표면(46)에 가깝게 배치할 수 있다.

[0050] 분석적으로, 작은 섭동과 상호작용하는 객체들에 대해서, 산란으로 인한 방사-Q의 감소된 값은, 외래 객체 $X=42$ 또는 거친 표면 $X=46$ 의 내측의 공진 캐비티(1)에 의해 유도된

$$\int d^3r |P_{X1}(r)|^2 \propto \int d^3r |E_1(r) \cdot \text{Re}\{\epsilon_X(r)\}|^2$$
의 분극화를 사용하여 추정될 수 있다. 검사된 경우들에서 외래 객체들의 굴절률 또는 크기 중 어느 하나가 크기 때문에, 이러한 1차(first-order) 섭동-이론 결과는 충분히 정확하지 않을 수 있으며, 그러므로 단지 수치적 FDTD 시뮬레이션에 의존할 수 있을 뿐이다. 이러한 객체들 내측의 흡수-Q는

$$\text{Im}\{k_{11}\} = \omega/2 \cdot \int d^3r |E_1(r)|^2 \text{Im}\{\epsilon_X(r)\} / \int d^3r |E_1(r)|^2 \epsilon(r)$$
를 통해 추정될 수 있다.

[0051] 이러한 방법들을 사용하면, 캐비티와 외래-객체 중심들 사이의 거리 $D/r=10, 7, 5, 3$ 에 있어서, $Q_{\text{rad}}=1992$ 는 각각 $Q_{\text{rad}}=1988, 1258, 702, 226$ 으로 감소되고, 객체 내측의 흡수율은 $Q_{\text{abs}}=312530, 86980, 21864, 1662$ 이며, 즉 객체(가능하게는 이동 객체)가 캐비티에 매우 근접하지 않은 경우, 캐비티의 공진은 고-굴절률 및/또는 고-손실의 외래 객체들로부터 해롭게 방해받지 않는다. 예를 들어, 거친 표면에 대한 캐비티의 거리 $D/r=10, 7, 5, 3, 0$ 에 있어서, $Q_{\text{rad}}=2101, 2257, 1760, 1110, 572$ 이고 $Q_{\text{abs}} > 4000$ 이며, 즉 캐비티가 표면에 끼워질 때의 극단적인 경우라도, 초기의 공진 모드에 대한 영향은 수용 가능하게 낮다는 것을 알 수 있다. 금속 객체들의 인접성(close proximity)도 또한 공진 필드를 산란시킬 수 있지만, 간략화를 위해 이러한 객체들은 존재하지 않는 것으로 가정할 수 있다.

[0052] 공진 소스-객체 s를 사용하여 공진 기기-객체 d에 에너지를 무선으로 전달하되, 이탈-공진의 외래-객체 e가 존재하는 조합된 시스템을 가정한다. e로부터의 모든 비본질적 손실 메커니즘의 강도(strength)는, 외래 객체의 위치 r_e 에서 평가된, 공진 소스의 테일(tail)의 작은 진폭(small amplitude)의 제곱, $|E_s(r_e)|^2$ 에 의해 결정된다. 대조적으로, 소스로부터 기기로의 에너지의 공진 커플링의 계수는, 기기의 위치 r_d 에서 평가된, 동일-차수의 테일 진폭 $|E_s(r_d)|$ 에 의해 결정되지만, 이때 제공되지는 않는다. 그러므로, 기기에 대한 소스의 거리와 그리고 외래 객체에 대한 소스의 거리가 같은 경우에 있어서, 기기와의 에너지 교환을 위한 커플링 시간은, 특히 공진 필드의 진폭이 소스로부터 지수형 감소(exponential-like decay)를 가질 때, 외래 객체의 내측의 손실이 누적되는 데 필요한 시간보다 훨씬 짧다. 소스에서는 더 작은 테일을 갖고 기기에서는 더 긴 테일을 가져서 원하는 커플링이 달성되고, 그래서 다른 객체들로부터 소스에 대한 간섭이 최소로 되도록 시스템을 설계함으로써 성능을 실제로 최적화할 수 있을 것이다.

[0053] 위의 개념은 도 2a 내지 도 2b 및 도 4a 내지 도 4b를 조합시키는 시뮬레이션에 의해 유전체 디스크 캐비티의 경우에 검증될 수 있는데, 즉, 도 5에 도시된 바와 같이, 두 개(소스-기기)의 "테스트" 캐비티(50)가 $10r$ 떨어져서 위치하고, 이 두 개의 테스트 캐비티 사이에 $\epsilon=49$ 의 동일한 크기의 외래 객체(52)가 $\epsilon=2.5$ 의 큰 거친 표면(56)으로부터 거리 $5r$ 를 두고서 존재하는 경우에 검증될 수 있다. 이때, $Q=1992$, $\omega/2\kappa=1717$ (따라서 $\kappa/\Gamma=1.16$)의 원래의 값은 $Q=765$, $\omega/2\kappa=965$ (따라서 $\kappa/\Gamma=0.79$)로 저하된다. 고찰된 외부 섭동의 정도를 고려하면, 이러한 변화는 받아들일 수 있을 정도로 작으며, 그리고 시스템 설계는 최적화되지 않았으므로, 커플링-대-손실 비율(coupling-to-loss ratio)의 최종 값을 보면 이 방식이 에너지 전달에 유용하게 될 가망이 있다.

[0054] 공진 객체들이 고려되는 제2 예에서는, 전도성-와이어 루프(conduction-wire loop)가 이용되고, 공진 상의 외래

객체들의 영향은 거의 없다. 이러한 이유는, 고려되고 있는 동작($r \ll \lambda$)의 준정적 상황(quasi-static regime)에서, 커패시터 내측에 전계가 국한되어 있으므로, 루프를 둘러싸는 공기 영역 내의 근거리장이 두드러지게 작용을 띄기 때문이다. 그러므로 이 근거리장과 상호작용할 수 있고 공진에 대한 섭동으로서 작동하는 외래 객체들은 상당한 자기적 속성(투자율 $\text{Re}\{\mu\} > 1$ 또는 자기 손실 $\text{Im}\{\mu\} > 0$)을 갖는 객체들이다. 거의 모든 일반적인 물질들은 비자성이기 때문에, 이 물질들은 자유 공간에서와 동일한 방식으로 자계에 응답하며, 그래서 전도성-와이어 루프의 공진을 방해하지 않는다. 이러한 공진에 영향을 미칠 것으로 예상되는 유일한 섭동은 대형 금속 구조체의 인접성이다.

[0055] 위의 사실에서의 지극히 중요한 암시는 인간에 대한 안전 고려와 관계가 있다. 인체 역시 비자성이므로 아무런 위험을 겪지 않으면서 강력한 자계를 지탱할 수 있다. 이것은 분명하게, 많은 현실 세계 응용(real-world application)에 있어서 이러한 종류의 공진 시스템의 이점이다. 한편, 고(유효)굴절률의 유전체 시스템들은, κ/Γ 의 더 큰 달성된 값으로 판단하건대, 시스템들의 효과가 더 높을 것으로 보이며, 시스템들은 또한 전술한 바와 같이, 훨씬 더 작은 길이-스케일에 적용 가능하다는 이점들을 갖는다.

[0056] 인체 h 및 벽(wall)의 존재 시에 공진 소스 s 및 기기 d의 조합된 시스템을 다시 고찰해 보고, 작업(operational work)에 사용하기 위하여 기기로부터 에너지가 배출(drain)될 때, 이러한 공진 기반의 에너지-전달 방식의 효과를 연구해 본다. 이전에 알게 된 파라미터들을 사용할 수 있는데: 유전체 디스크에 있어서는, 소스에서의 흡수-우세의 손실 $Q_s \sim 10^4$, 기기에서의 방사-우세의 손실 $Q_d \sim 10^3$ (이것은 인체 및 벽으로부터 산란을 포함함), 객체들로부터 인체의 매우 근접하지 않은 거리에 의존하는 인체에서의 소스-에너지 및 기기-에너지의 흡수 Q_{s-h} , $Q_{d-h} \sim 10^4 - 10^5$, 및 벽에서의 무시할만한 흡수 손실을 사용할 수 있고; 전도성-와이어 루프에 있어서는, $Q_s \sim Q_d \sim 10^3$ 을 사용할 수 있고, 인체 및 벽으로부터의 섭동은 무시할 수 있다. 대응하는 손실-비율 $\Gamma = \omega/2Q$, 거리-의존성 커플링 κ , 및 워킹 파워(working power)가 추출되는 레이트 Γ_w 를 이용하여, 기기 필드-진폭에 대한 커플링-모드-이론 수학적식은 다음과 같다.

수학적식 3

$$\frac{da_d}{dt} = -i(\omega - i\Gamma_d)a_d + i\kappa a_s - \Gamma_{d-h}a_d - \Gamma_w a_d$$

[0057]

[0058] 다른 임시의 방식들을 사용하여 기기로부터 파워를 추출할 수 있으며 그 방식들의 효과는 조합된 시스템 파라미터들에 대해 다른 의존성을 보인다. 여기서, 정상 상태를 가정할 수 있는데, 여기서 소스 내측의 필드 진폭이 일정하게 유지되고, 즉 $a_s(t) = A_s e^{-i\omega t}$ 이고, 그래서 기기 내측의 필드 진폭은 $a_d(t) = A_d e^{-i\omega t}$ 이며, 단 $A_d = i\kappa / (\Gamma_d + \Gamma_{d-h} + \Gamma_w) A_s$ 이다. 그러므로 소스에서 손실된 파워는 $P_s = 2\Gamma_s |A_s|^2$ 이고, 기기에서 손실된 파워는 $P_d = 2\Gamma_d |A_d|^2$ 이며, 인체에서 흡수된 파워는 $P_h = 2\Gamma_{s-h} |A_s|^2 + 2\Gamma_{d-h} |A_d|^2$ 이며, 유용한 추출된 파워는 $P_w = 2\Gamma_w |A_d|^2$ 이다. 에너지 보존으로부터, 시스템으로 들어오는 전체 파워는 $P_{total} = P_s + P_d + P_h + P_w$ 이다. 전체 손실-비율은

$$\Gamma_s^{tot} = \Gamma_s + \Gamma_{s-h} \quad \text{및} \quad \Gamma_d^{tot} = \Gamma_d + \Gamma_{d-h} \quad \text{이다.} \quad \text{목표된 응용에 대하여, 워크-배출 비율(work-}$$

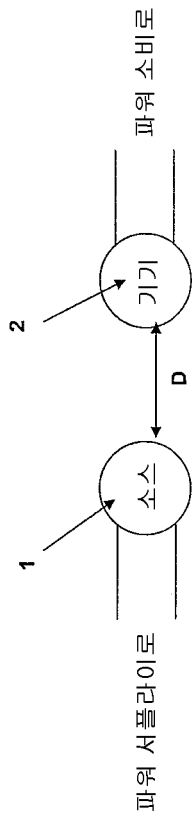
drainage rate)은 공진 객체들 내에 저장되는 필요한 에너지를 최소화하도록 $\Gamma_w = \Gamma_d^{tot}$ 가 선택되어야 하거나 κ 의 일부의 값에 대해 유용한 파워-대-손실 파워의 비율, 즉 효율성 $\eta_w = P_w/P_{total}$ 이 최대가 되도록

$\Gamma_w = \Gamma_d^{tot} \sqrt{1 + \kappa^2 / \Gamma_s^{tot} \Gamma_d^{tot}} > \Gamma_d^{tot}$ 이 선택되어야 한다. 두 가지의 서로 다른 선택에 대한 효율성 η 은, 이득의 특징(figure-of-merit) κ/Γ_d 의 함수로서, 도 6a 및 도 6b에 각각 도시되어 있으며, 이 이득의 특징은 또한 소스-기기 거리에 의존한다.

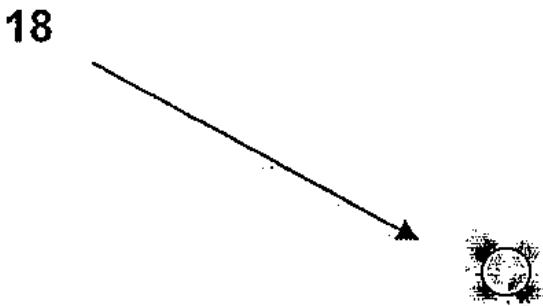
- [0059] 도 6a 내지 도 6b는 유전체 디스크의 시스템 및 최적화된 효율성의 선택에 있어서, 그 효율성이 예를 들어 약 40%로 크게 될 수 있다는 것을 보여주고 있다. 인체 내에서의 에너지의 소실은, 값들 $\kappa/\Gamma d > 1$ 및 $Q_h > 10^5$ 에 있어서, 즉 중거리 소스-기기 거리($D_d/r < 10$) 및 최대한의 인체-소스/기기 거리($D_h/r > 8$)에 있어서, 5% 미만으로 충분히 작다. 예를 들어, $D_d/r = 10$ 및 $D_h/r = 8$ 의 경우, 10W가 로드(load)에 전달되어야 한다면, 도 6b로부터 알 수 있듯이, $\sim 0.4W$ 가 인체 내에서 소실될 것이고, $\sim 4W$ 가 소스 내에서 흡수될 것이며, $\sim 2.6W$ 가 자유 공간으로 방사될 것이다. 전도성-와이어 루프의 시스템에 있어서, 달성된 효율성은, $\kappa/\Gamma d \approx 1$ 의 경우 $\sim 20\%$ 로 더 작지만, 전술한 바와 같이, 인체 내에서의 에너지의 소산이 없다는 점이 상당한 이점이다.
- [0060] 공진 객체 설계의 최적화를 통해 훨씬 더 우수한 성능이 달성될 수 있다. 또한, 더 큰 방사-Q를 가지는 정상 모드(normal mode)의 주파수에서 연속파 동작(continuous-wave operation)과 같이, 커플링된 객체들의 방사 필드들 사이의 전술한 간섭 효과를 활용함으로써, 전체 시스템 기성능을 더 향상시킬 수 있다. 그러므로 본 발명의 무선 에너지-전달 방식은 많은 현대의 응용에 대해 유망하다. 모든 고찰이 정적 형상에 대해 이루어져 왔지만, 에너지-전달 시간 κ^{-1} 이 $\sim 1\mu s$ 이기 때문에, 그 모든 결과는 이동 객체의 동적 형상에 대해 직접적으로 적용될 수 있으며, 이 에너지-전달 시간은 거시적인 객체의 이동과 연관된 어떠한 시간의 척도보다 훨씬 더 짧다.
- [0061] 본 발명은 중거리 무선 비-방사성 에너지 전달을 위한 공진에 기초한 방식을 제공한다. 매우 간단한 구현 형상의 분석에 따라, 제안된 메커니즘의 잠재적인 응용 가능성을 위한 성능 특성을 향상시킬 수 있다. 예를 들어, 거시적 세계에서, 이러한 방식은 공장 안의 로봇 및/또는 컴퓨터, 또는 간선 도로 상의 전기 버스들(electric buses)에 파워를 전달(소스-캐비티는 이 경우 간선 도로 위에서 운용되는 "파이프(pipe)"가 될 것이다)하는 데 사용될 수 있을 것이다. 훨씬 더 작은 파장이 사용되고 더 작은 파워를 필요로 하는 미시적 세계에서는, 이것은 CMOS 전기 기기를 위한 광학 상호접속(inter-connect)을 구현하거나 또는 소스들과 기기들 사이의 상대적 열라인먼트에 관해 별 우려 없이, 그 밖의 독자적 나노-객체들에 에너지를 전달하는 데 사용될 수 있을 것이며; 에너지-전달 거리는 객체의 크기에 비해 훨씬 더 길 것인 데, 왜냐하면 유전체 물질의 $\text{Im}\{\epsilon(\omega)\}$ 가 마이크로웨이브 주파수에서보다 그 필요한 광학 주파수에서 훨씬 더 낮을 수 있기 때문이다.
- [0062] 미래의 과학 연구의 현장으로서, 향상된 성능 또는 상이한 범위의 적용 가능성을 위해 여러 가지 물질 시스템이 조사될 것이다. 예를 들어, 플라즈몬 시스템(plasmonic system)을 연구함으로써 성능을 상당히 향상시킬 수 있을 것이다. 이러한 시스템들은 자유 공간 파장보다 훨씬 더 짧은 그 표면 상의 필드들의 공간적 변화를 가질 수 있고, 이 특징이 바로 스케일의 필요한 디커플링을 가능하게 하는 것인 데: 공진 객체는 그 필드의 지수형 테일보다 상당히 작아질 수 있다. 또한, 소스 및 기기가 공통의 응집 물질 객체(condensed-matter object)를 통해 접속되는 응용에 대해서도 음향 공진을 이용하여 조사할 것이다.
- [0063] 본 발명을 몇 가지 양호한 실시예와 관련해서 도시하고 설명하였으나, 이러한 형태 및 그 상세한 설명에 대한 다양한 변화, 삭제 및 추가가 본 발명의 정신 및 범주를 벗어남이 없이 이루어질 수 있다.

도면

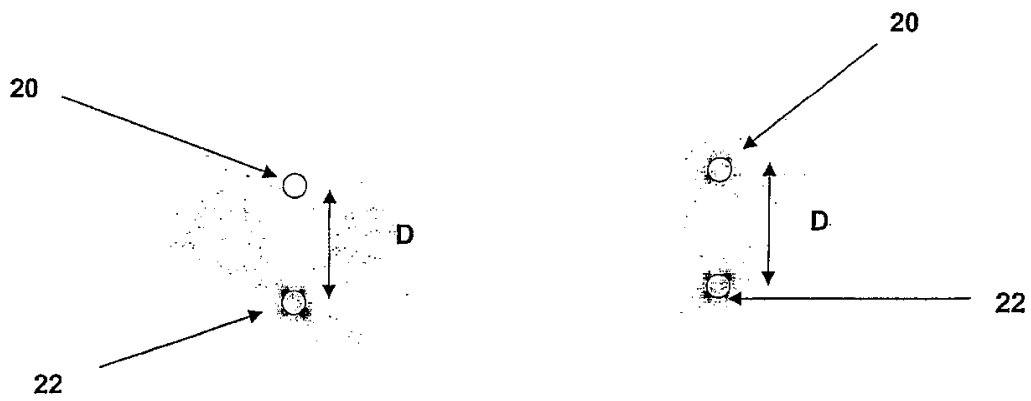
도면1



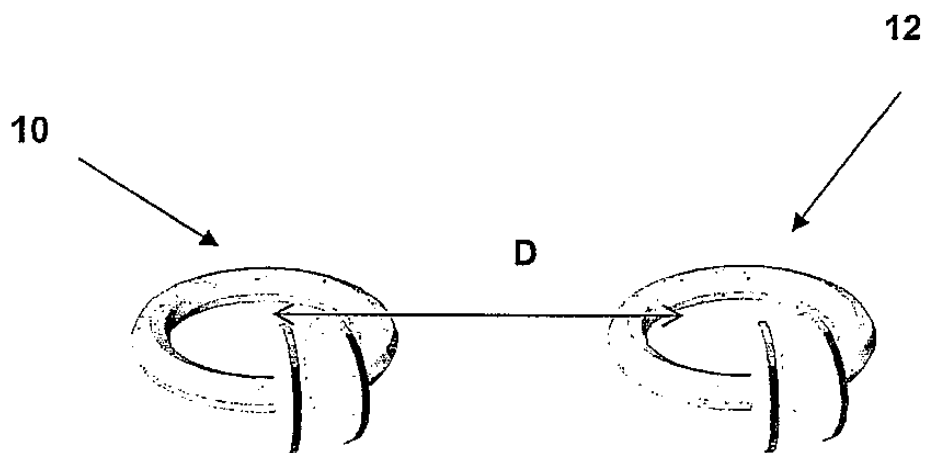
도면2a



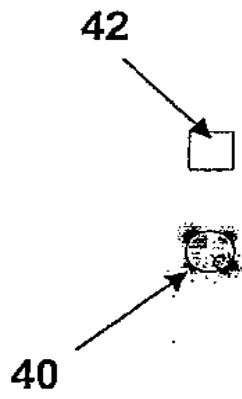
도면2b



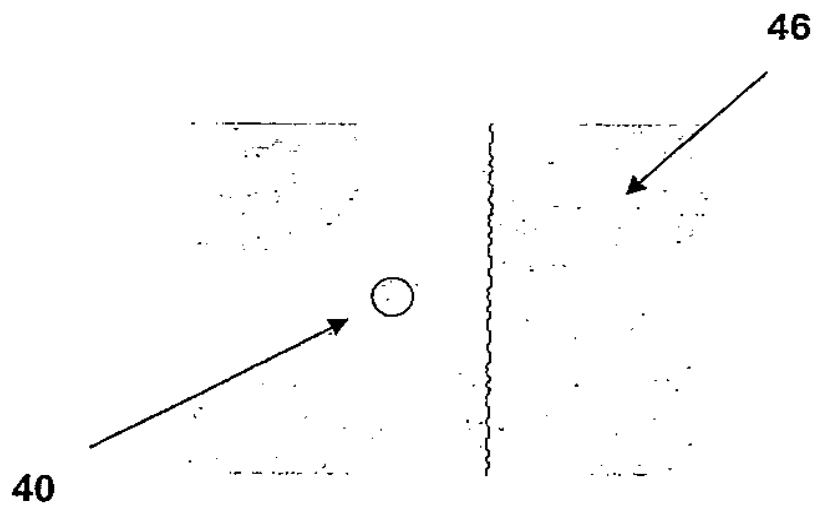
도면3



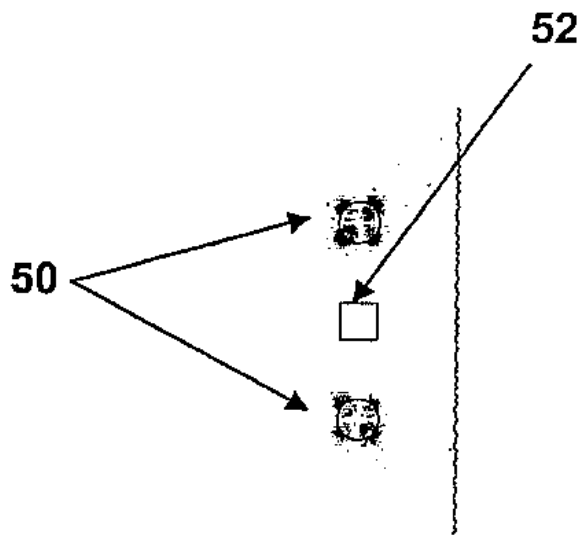
도면4a



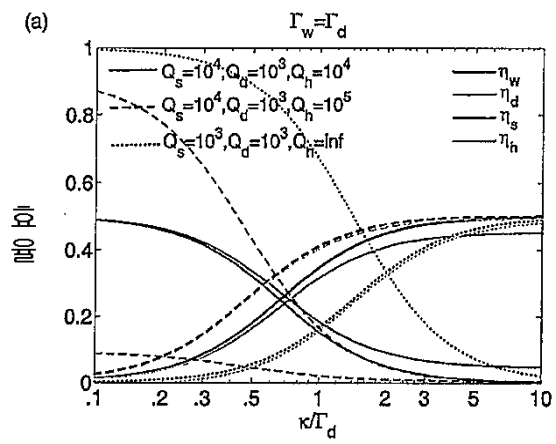
도면4b



도면5



도면6a



도면6b

(b) 각각의 κ/Γ_d 에 대해 최적화된, $\Gamma_w > \Gamma_d$

