

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2011-142805

(P2011-142805A)

(43) 公開日 平成23年7月21日(2011.7.21)

(51) Int.Cl.		F I		テーマコード (参考)
HO2J 17/00 (2006.01)		HO2J 17/00		B
HO1Q 7/00 (2006.01)		HO1Q 7/00		

審査請求 未請求 請求項の数 22 O L 外国語出願 (全 46 頁)

(21) 出願番号 特願2010-285958 (P2010-285958)
 (22) 出願日 平成22年12月22日 (2010.12.22)
 (31) 優先権主張番号 12/648, 593
 (32) 優先日 平成21年12月29日 (2009.12.29)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)
 (31) 優先権主張番号 12/650, 221
 (32) 優先日 平成21年12月30日 (2009.12.30)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 597067574
 ミツビシ・エレクトリック・リサーチ・ラ
 ボラトリーズ・インコーポレイテッド
 アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケ
 ンブリッジ、ブロードウェイ 201
 201 BROADWAY, CAMBR
 RIDGE, MASSACHUSETTS
 02139, U. S. A.

(74) 代理人 100110423
 弁理士 曾我 道治
 (74) 代理人 100094695
 弁理士 鈴木 憲七
 (74) 代理人 100111648
 弁理士 梶並 順

最終頁に続く

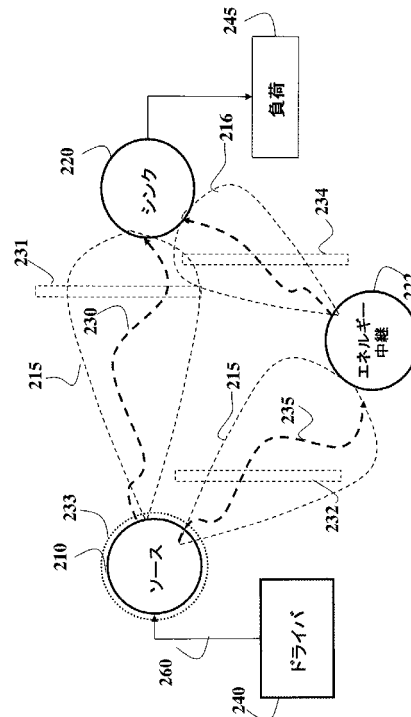
(54) 【発明の名称】 エネルギー中継器を用いた無線エネルギー伝達方法およびシステム

(57) 【要約】

【課題】この発明の実施の形態は、エネルギーを無線で伝達するように構成される方法およびシステムを開示する。

【解決手段】本システムは、エバネッセント波の結合を介してエネルギーをシンクに無線で伝達するように構成されるソースであって、エネルギーの受信に应答して、電磁 (EM) 近接場を生成する、ソースと、該ソースとシンクとの間の結合を増大させるように配置されるエネルギー中継器であって、ソース、シンク、およびエネルギー中継器は電磁および非放射構造である、エネルギー中継器とを備える。

【選択図】 図 2 A



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

エネルギーを無線で伝達するように構成されるシステムであって、
前記エネルギーを、エバネッセント波の結合を介してシンクに無線で伝達するように構成されるソースであって、前記エネルギーの受信に応答して、電磁（EM）近接場を生成する、ソースと、

前記ソースと前記シンクとの間の前記結合を増大させるように配置されるエネルギー中継器であって、前記ソース、前記シンク、および前記エネルギー中継器は電磁および非放射構造である、エネルギー中継器と、
を備える、システム。

10

【請求項 2】

前記エネルギー伝達中の前記シンクのロケーションは所定であり、前記エネルギー中継器は、前記ソースと前記シンクとの間の前記結合を増大させるように配置され、一方、前記シンクは前記所定のロケーションに配置される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 3】

前記エネルギーを前記ソースに供給するように構成されるドライバをさらに備える、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 4】

前記結合を強化するように前記 EM 近接場内に配置される負屈折率材料（NIM）をさらに備える、請求項 1 に記載のシステム。

20

【請求項 5】

前記ソースおよび前記エネルギー中継器は共振構造である、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 6】

前記 NIM は、前記シンクの前記所定のロケーションに基づいて配置される、請求項 2 に記載のシステム。

【請求項 7】

前記 NIM は、前記ソースを取り囲むように配置される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 8】

前記エネルギー中継器は、偶パタフライパターン、奇パタフライパターン、偶交差パターン、および奇交差パターンから成るパターン群から選択されるエネルギー分散パターンに基づいて配置される、請求項 1 に記載のシステム。

30

【請求項 9】

前記エネルギー分散パターンは、前記ソース、前記エネルギー中継器、および前記シンク間の距離および/または配向に基づいて確定される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 10】

前記 NIM は負誘電率特性および負透磁率特性を有する、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 11】

前記エネルギー中継器は、前記ソースから前記エバネッセント波を受信すると共に、該エバネッセント波の少なくともいくつかを前記シンクにリダイレクトするように構成される、請求項 1 に記載のシステム。

40

【請求項 12】

前記エネルギー中継器は、前記ソースから前記エネルギーを受信すると共に、該エネルギーを増幅すると共に、該エネルギーを前記シンクに伝送するように構成される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 13】

前記エネルギー中継器はループを含み、該ループは、該ループの軸が前記シンクに向かって方向付けられるように回転される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 14】

前記エネルギー中継器はループを含み、該ループは、該ループの軸が前記シンクの軸に

50

直交するように回転される、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 15】

前記エネルギー中継器は第 1 のエネルギー中継器であり、前記システムは、
前記ソースと前記シンクとの間の前記結合を増大させるように配置される第 2 のエネルギー中継器であって、前記第 1 のエネルギー中継器は該第 2 のエネルギー中継器に強力的に結合されない、第 2 のエネルギー中継器をさらに備える、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 16】

受動エネルギー中継器および能動エネルギー中継器のネットワークをさらに備える、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 17】

近接場の結合を介してエネルギーを無線で伝達するための方法であって、
ソースを提供するステップであって、該ソースは、該ソースの前記近接場とシンクの前記近接場との結合を介して該シンクに前記エネルギーを無線で伝達するように構成され、
該ソースおよび該シンクは、前記エネルギーの受信に応答して電磁 (EM) 近接場を生成するように構成される、EM および非放射構造である、ソースを提供するステップと、
エネルギー中継器を提供するステップであって、該エネルギー中継器は、前記シンクが所定のロケーションに配置されるとき、前記ソースと前記シンクとの間の前記結合を増大させるように構成される、エネルギー中継器を提供するステップと、
前記エネルギーを無線で伝達するステップと、

を含む、方法。

【請求項 18】

前記エネルギー中継器によって、前記ソースから前記エネルギーの少なくとも部分を受信するステップと、および
前記エネルギー中継器によって、前記エネルギーの少なくとも部分を前記シンクに伝達するステップと、
をさらに含む、請求項 17 に記載の方法。

【請求項 19】

負屈折率材料 (NIM) を使用して前記結合を増大させるステップをさらに含む、請求項 17 に記載の方法。

【請求項 20】

エネルギーを無線で交換するように構成されるシステムであって、
構造であって、前記エネルギーを、エバネッセント波の結合を介して無線で交換するように構成され、該構造は電磁 (EM) および非放射であり、該構造は前記エネルギーの受信に応答して EM 近接場を生成する、構造と、
コントローラであって、前記近接場が特定のエネルギー分散パターンにしたがって生成されるように前記構造の主周波数を調整するように構成される、コントローラと、
を備える、システム。

【請求項 21】

近接場の結合を介してエネルギーを無線で交換するための方法であって、
第 1 の構造を提供するステップであって、該第 1 の構造は、該第 1 の構造の近接場と第 2 の構造の近接場との結合を介して該第 2 の構造と前記エネルギーを無線で交換するように構成され、該第 1 の構造および該第 2 の構造は、電磁 (EM) および非放射であり、該第 1 の構造および該第 2 の構造は、前記エネルギーの受信に応答して EM 近接場を生成する、第 1 の構造を提供するステップと、
前記第 1 の構造と前記第 2 の構造との間の配向を確定するステップと、
前記第 1 の構造の前記近接場が、前記配向に最適な特定のエネルギー分散パターンにしたがって生成されるように前記第 1 の構造の主周波数を調整するステップと、
前記エネルギーを無線で交換するステップと、
を含む、方法。

【請求項 22】

近接場の結合を介してエネルギーを無線で交換するためのシステムであって、

第1の構造であって、該第1の構造の近接場と第2の構造の近接場との結合を介して該第2の構造と前記エネルギーを無線で交換するように構成され、該第1の構造および該第2の構造は、電磁(E M)および非放射であり、該第1の構造および該第2の構造は、前記エネルギーの受信に応答してE M近接場を生成する、第1の構造と、

前記第1の構造と前記第2の構造との間の配向を確定する手段と、

前記第1の構造の前記近接場が、前記配向に最適な特定のエネルギー分散パターンにしたがって生成されるように前記第1の構造の主周波数を調整する手段と、
を備える、システム。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

[関連出願]

本出願は、Koon Hoo Teoによって出願された、「Wireless Energy Transfer with Negative Index Material」と題する、2009年12月3日付けで出願された米国特許出願第(MERL-2218)12/630,498号、および、Koon Hoo Teoによって本出願と同時に出願され、参照により本明細書に援用される、「Wireless Energy Transfer with Negative Index Material」と題する、2009年12月xx日付けで出願された米国特許出願第(MERL-2259)12/xxx,xxx号に関する。

20

【0002】

また、本出願は、2009年12月3日付けでKoon Hoo Teo他によって出願された、「Wireless Energy Transfer with Negative Index Material」と題する(MERL-2221)米国特許出願12/630,543号、2009年12月3日付けでKoon Hoo Teo他によって出願された、「Wireless Energy Transfer with Negative Index Material」と題する(MERL-2222)米国特許出願12/630,669号、および2009年12月3日付けでKoon Hoo Teo他によって出願された、「Wireless Energy Transfer with Negative Index Material」と題する(MERL-2223)米国特許出願12/630,710号に関し、それらの特許出願はすべて参照により本明細書に援用される。

30

【0003】

この発明は、エネルギーを伝達することに関し、より詳細には、エネルギーを無線で伝達することに関する。

【背景技術】

【0004】

無線エネルギー伝達

誘導結合は、コードレス電子歯ブラシまたはハイブリッド車両バッテリーの充電のような多くの無線エネルギー伝達用途において使用されている。変圧器、ソースのような結合インダクタにおいて、たとえば一次コイルが、電磁場としてエネルギーを生成し、シンク、たとえば2次コイルが、該シンクを通過するエネルギーが最適化される、たとえばソースのエネルギーと可能な限り類似するように電磁場の範囲を定める(subtend)。エネルギーを最適化するために、ソースとシンクとの間の距離は可能な限り小さくなるべきである。これは、距離が長くなると誘導法が非常に効果のないものとなるためである。

40

【0005】

共振結合系

共振結合において、2つの共振電磁物体、すなわちソースおよびシンクが、共振状態の下で互いに相互作用する。共振結合は中距離、たとえば共振周波数波長の数分の1にわた

50

ってソースからシンクにエネルギーを伝達する。

【0006】

図1は、共振ソース110から共振シンク120へエネルギーを伝達するための従来の共振結合系100を示している。系100の動作の一般原理は誘導結合と類似している。ドライバ140がエネルギーを共振ソースに入力して、振動電磁場115を形成する。励起された電磁場は、ドライバにおける励起信号周波数、または共振系のためのソースおよびシンクの自己共振周波数に対して或るレートで減衰する。しかしながら、共振シンクが、各サイクルにおいて失ったエネルギーよりも多くのエネルギーをより多く吸収する場合、エネルギーのほとんどがシンクに伝達される。同じ共振周波数で共振ソースおよび共振シンクを動作させることによって、共振シンクがその周波数において低インピーダンスを有すると共に、エネルギーが最適に吸収されることが確実になる。共振結合系の例が、参照によって本明細書に援用される、米国特許出願公開第2008/0278264号および同第2007/0222542号に開示されている。

10

【0007】

エネルギーは、複数の共振物体、たとえばサイズ L_1 を有する共振ソースおよびサイズ L_2 を有する共振シンク間で、距離 D にわたって伝達される。ドライバは電力供給器をソースに接続し、共振シンクは電力消費装置、たとえば抵抗負荷150に接続される。エネルギーは、ドライバによって共振ソースに供給され、共振ソースから共振シンクに無線でかつ非放射で伝達され、負荷によって消費される。無線非放射エネルギー伝達は、場115、たとえば共振系の電磁場または音場を使用して実行される。本明細書を簡略化するために、場115は電磁場である。共振物体の結合中、エバネッセント波130は共振ソースと共振シンクとの間で伝播される。

20

【0008】

結合強化

結合モード理論によれば、結合強度は結合係数 k によって表される。結合強化は、結合係数 k の絶対値の増加によって表される。結合モード理論に基づいて、共振結合系の共振周波数は、複数の周波数に分割される。たとえば、2つの物体の共振結合系において、結合効果に起因して、偶モード周波数および奇モード周波数と呼ばれる2つの共振周波数が観測され得る。2つの全く同じ共振構造によって形成される2つの物体の共振系の結合係数は、以下にしたがって偶モードおよび奇モードを分割することによって計算される。

30

【0009】

$$k = |f_{\text{even}} - f_{\text{odd}}| \cdots (1)$$

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

結合を強化することが課題である。たとえば、結合を最適化するために、高い品質係数を有する共振物体が選択される。

したがって、ソースとシンクとの間の無線エネルギー伝達を最適化することが望まれている。

【課題を解決するための手段】

40

【0011】

この発明の1つの実施の形態は、エネルギーを無線で伝達するように構成されるシステムであって、本システムは、エバネッセント波の結合を介してエネルギーをシンクに無線で伝達するように構成されるソースであって、エネルギーの受信に 응답して、電磁(EM)近接場を生成する、ソースと、該ソースとシンクとの間の結合を増大させるように配置されるエネルギー中継器であって、ソース、シンク、およびエネルギー中継器は電磁および非放射構造である、エネルギー中継器とを備える、システムを開示する。

【0012】

この発明の別の実施の形態は、近接場の結合を介してエネルギーを無線で伝達するための方法であって、ソースを提供するステップであって、該ソースは、該ソースの近接場と

50

シンクの近接場との結合を介して該シンクにエネルギーを無線で伝達するように構成され、ソースおよびシンクは、エネルギーの受信に 응답して電磁（EM）近接場を生成するように構成される、EMおよび非放射構造である、ソースを提供するステップと、エネルギー中継器を提供するステップであって、該エネルギー中継器は、シンクが所定のロケーションに配置されるとき、ソースとシンクとの間の結合を増大させるように構成される、エネルギー中継器を提供するステップと、エネルギーを無線で伝達するステップとを含む、方法を開示する。

【発明の効果】

【0013】

この発明は、ソースおよびシンクの近隣の少なくとも1つまたは複数のエネルギー中継器を、該エネルギー中継器によって、ソースによって生成されるいくつかのエバネッセント波がシンクにリダイレクトされるように戦略的に配置することによって、エネルギーソースとエネルギーシンクとの間のエバネッセント波の結合を最適化することができるという認識に基づく。

10

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】従来の共振結合系のブロック図である

【図2A】この発明の実施の形態1による、エネルギー中継器を使用してエネルギーを伝達するためのシステムの例を示す図である。

【図2B】この発明の実施の形態1による電磁構造の図である。

20

【図3】異なるエネルギー分散パターンの図である。

【図4】異なるエネルギー分散パターンの図である。

【図5】異なるエネルギー分散パターンの図である。

【図6】複数のエネルギー中継器を使用してエネルギーを無線で供給するためのシステムの例を示す図である。

【図7】エネルギー中継器の実施態様の例を示す図である。

【図8】この発明の異なる実施の形態1の効果を示す概略図である。

【図9】この発明の異なる実施の形態1の効果を示す概略図である。

【図10】この発明の異なる実施の形態1の効果を示す概略図である。

【図11】この発明の異なる実施の形態1の効果を示す概略図である。

30

【図12】この発明の異なる実施の形態1の効果を示す概略図である。

【図13】この発明の異なる実施の形態1の効果を示す概略図である。

【図14】この発明の実施の形態2による、エネルギーを無線で伝達または受信するのに適したシステムの概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

実施の形態1

この発明の実施の形態1は、エネルギーソースとエネルギーシンクとの間のエバネッセント波の結合を、ソースおよびシンクの近隣における少なくとも1つのエネルギー中継器を、該エネルギー中継器によって、ソースによって生成されるいくつかのエバネッセント波がシンクにリダイレクトされるように戦略的に配置することによって、エネルギーソースとエネルギーシンクとの間のエバネッセント波の結合を最適化することができるという認識に基づく。

40

【0016】

図2Aは、ソース210からシンク220への無線エネルギー伝達を最適化するように構成されるこの発明の実施の形態1を示している。ドライバ240がエネルギー260をソース210に供給するとき、ソースはEM近接場215を生成する。通常、近接場215は特定のエネルギー分散パターンにしたがって生成される。後述するパターンは、最適ゾーンのような異なる複数のゾーンを有する。最適ゾーンにおいて、近接場強度は最適、すなわち最大である。ブラインドゾーンにおいて、近接場強度は準最適である。

50

【0017】

近接場215に制限されるエバネッセント波230のうちのいくつかは、シンクに直接到達し、結合する。しかしながら、いくつかの他のエバネッセント波235はエネルギー中継器222に到達し、近接場216内のシンクにリダイレクトされる。エネルギー中継がなければ、波235は実質的にエネルギー伝送に役立たない。

【0018】

ソースとシンクとの間の距離および配向を使用して、エネルギー中継器の特定の配置を確定する。いくつかの実施の形態1では、エネルギー中継器は受動であり、すなわちエネルギーの外部ソースに一切接続されないエネルギーであり、ソースから受信したエバネッセント波をリダイレクトする。他の実施の形態1では、エネルギー中継器は能動であり、すなわち近接場215で伝達されるエネルギーのうちのいくらかを吸収し、該エネルギーを増幅し、近接場216を再生するように構成される。したがって、この発明の実施の形態1は、ソースとシンクとの間の結合を増大させ、中継器を用いない場合よりも長い距離にわたって、ソースとシンクとの間のエネルギーの無線伝達を容易にする。

10

【0019】

図2Bは、この発明の実施の形態1によるシステム200を示している。本システムは、エネルギーを無線で交換する、たとえば送信または受信するように構成され、構造210を含み、該構造は、エネルギーが該構造によって受信されるときに電磁近接場220を生成すると共に、エバネッセント波の結合を介してエネルギーを無線で交換するように構成される。

20

【0020】

1つの実施の形態1では、エネルギー260は当該技術分野において既知のドライバ240によって供給される。この実施の形態1では、構造210は無線エネルギー伝達システムのソースとしての役割を果たす。代替的な実施の形態1では、エネルギー260はソース(図示せず)から無線で供給される。この実施の形態1において、構造210は無線エネルギー伝達システムのシンクとしての役割を果たす。

【0021】

システム200は、オプションで、近接場215および216内に配置される負屈折率材料(NIM)231~234を備える。1つの実施の形態1では、NIM233はEM構造210を実質的に取り囲む。NIMは、負誘電率特性および負透磁率特性を有する材料である。この材料に関して、いくつかの特異な現象、たとえばエバネッセント波増幅、表面のプラズモンのような挙動、および負の屈折が知られている。この発明の実施の形態1は、NIMの特異な能力を理解および利用してエバネッセント波を増幅した。これによって無線エネルギー伝達が最適化される。

30

【0022】

近接場の形状および寸法、すなわちエネルギー分散パターンは、外部エネルギー260の周波数およびEM構造210の共振周波数に依拠し、部分的に、EM構造、たとえば円形状、螺旋形状、円柱形状によって、並びに導電率、相対誘電率、および相対透磁率のようなEM構造の材料のパラメータによって確定される。

【0023】

通常、近接場の範囲270は、系の主波長程度である。非共振系では、主波長は外部エネルギー260の周波数、すなわち波長265によって確定される。共振系では、主波長は、EM構造の共振周波数によって確定される。通常、主波長は無線で交換されるエネルギーの周波数によって確定される。

40

【0024】

共鳴は、品質係数(Q係数)、すなわち蓄積エネルギーと散逸エネルギーとの無次元の比によって特徴付けられる。システム200の目的は、エネルギーを無線で伝達または受信することであるため、ドライバの周波数または共振周波数は、近接場領域の寸法を大きくするように選択される。いくつかの実施の形態1では、エネルギー260の周波数および/または共振周波数は、MHzからGHzの域にある。他の実施の形態1では、上述の

50

周波数は可視光領域にある。

【 0 0 2 5 】

エバネッセント波

エバネッセント波は、該波が形成された境界からの距離と共に強度が指数関数的に減衰する近接場定常波である。エバネッセント波 2 3 5 は、構造 2 1 0 と、波の動きに関して異なる特性を有する他の「媒体」、たとえば空気との間の境界において形成される。エバネッセント波は、外部エネルギーが E M 構造によって受信されるときに形成され、E M 構造 2 1 0 の表面からの近接場の波長の 3 分の 1 内において最も強力である。

【 0 0 2 6 】

ウィスパリングギャラリーモード (W G M)

ウィスパリングギャラリーモードは、エバネッセント波が内部的に反射されるか、または E M 構造の表面によって収束される、エネルギー分散パターンである。最小の反射損失および放射損失に起因して、W G M パターンは通常高い品質係数に達するため、W G M は無線エネルギー伝達に有用である。

【 0 0 2 7 】

図 3 は、E M 構造の例、すなわちディスク 3 1 0 を示している。ディスク 3 1 0 の材料、幾何学形状、および寸法、並びに主周波数に依拠して、W G M パターン 3 2 0 にしたがって、E M 近接場強度およびエネルギー密度がディスクの表面において最大になる。

【 0 0 2 8 】

W G M パターンは E M 構造の形状と必ずしも対称でない。W G M パターンは通常ブラインドゾーン 3 4 5 および最適ゾーン 3 4 0 を有し、ブラインドゾーン 3 4 5 において、E M 近接場の強度は最小になり、最適ゾーン 3 4 0 において E M 近接場の強度は最大になる。この発明のいくつかの実施の形態 1 は、最適ゾーン 3 4 0 に N I M 2 3 0 を置き、エバネッセント波 3 5 0 の距離範囲を拡張する。

【 0 0 2 9 】

偶モードおよび奇モード

図 4 は、パラフライエネルギー分散パターンを示している。2 つの E M 構造 4 1 1 および 4 1 2 が互いに結合され結合系を形成する場合、結合系の主周波数は、偶周波数および奇周波数によって表される。偶周波数および奇周波数における近接場分散が、偶モード結合系 4 1 0 および奇モード結合系 4 2 0 として定義される。2 つの E M 構造の結合系の偶モードおよび奇モードの一般的な特性は、E M 場が偶モードで同相である場合、奇モードで位相が異なるということである。

【 0 0 3 0 】

バタフライ対

偶モード結合系および奇モード結合系は、バタフライ対として定義される、近接場強度の奇モード分散パターンおよび偶モード分散パターンを生成する。バタフライ対の近接場強度分散は、各 E M 構造の中心に対し 0 度および 9 0 度に配向される 2 つの線 4 3 1 および 4 3 2、すなわちバタフライ対のブラインドゾーンにおいて最小に達する。しかしながら、強度分散を変更し、ブラインドゾーンの位置および / または配向を排除および / または変更することが多くの場合に望まれている。

【 0 0 3 1 】

交差対

図 5 は、この発明の実施の形態 1 による、交差対 5 0 0 として定義される近接場強度の分散パターンを示している。交差対分散パターンは、各 E M 構造の中心に対し 0 度および 9 0 度に配向される最適ゾーン 1 2 3 1 および 1 2 3 2 を有する。すなわち、交差対パターンの最適ゾーンは、バタフライ対パターンのブラインドゾーンに対応する。したがって、バタフライ対パターンおよび交差対パターンの 1 つの重要な特性は、それらのパターンのそれぞれのブラインドゾーンが重複せず、このため双方の種類のパターンが利用される場合にブラインドゾーンを排除することが可能であるということである。バタフライパターンおよび交差パターンは、同じ桁のシステム品質係数および結合係数を有する。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 2 】

エネルギー中継器配置

この発明のいくつかの実施の形態 1 は、バタフライ対エネルギー分散パターンおよび交差対エネルギー分散パターンの知識を使用して、ソースおよびシンクの近隣にエネルギー中継器を配置する。いくつかの実施の形態 1 では、シンクのロケーションは所定であり、エネルギー中継器は、シンクが所定のロケーションに配置されるときに、ソースとシンクとの間の結合を最適化するように配置される。いくつかの実施の形態 1 では、この目標は実験的に達成される。

【 0 0 3 3 】

別の実施の形態 1 では、ソースはエネルギーを複数のシンクに伝送するように構成される。したがって、エネルギー中継器は、2 つ以上のシンクの結合を増大させるように配置される。

【 0 0 3 4 】

図 6 は、第 1 のエネルギー中継器 6 3 0 および第 2 のエネルギー中継器 6 4 0 を使用して、ソース 6 1 0 からシンク 6 2 0 へのエネルギー伝送を最適化するように構成されるシステム 6 0 0 の例を示している。この実施の形態 1 では、ソース、シンク、およびエネルギー中継器の EM 構造は、図 7 に示すループ 7 0 0 として実現される。半径 r のループが半径 a の導線 7 1 0、および相対誘電率 ϵ を有するコンデンサ 7 2 0 によって形成される。コンデンサの平板面積は A であり、平板は距離 d にわたって分離される。ループ 7 0 0 は軸 7 0 5 を有し、共振構造である。しかしながら、他の実施の形態 1 は構造の異なる実施の形態 1、たとえばディスクを使用する。

【 0 0 3 5 】

ソース 6 1 0 およびシンク 6 2 0 は、それらのそれぞれの中心から測定して、互いから距離 D で配置される。ソースおよびシンクは、ソースおよびシンクの軸が同じ線に沿うように位置合わせされる。ソースはドライバ（図示せず）に接続され、シンクは負荷（図示せず）に接続される。

【 0 0 3 6 】

第 1 のエネルギー中継器および第 2 のエネルギー中継器は距離 d_s だけ離され、ソースとシンクとの間のエバネッセント波の結合を増大させるように配置される。距離 d_s は、エネルギー中継器が互いに強力に結合されないように選択される。1 つの実施の形態 1 では、エネルギー中継器のループは、それらの軸がシンクを指すように回転される。別の実施の形態 1 では、エネルギー中継器のループの軸は、ソースおよびシンクの軸と直交する。さらに別の実施の形態 1 では、エネルギー中継器の配向は任意である。

【 0 0 3 7 】

図 8 ~ 図 1 1 は、ソース 6 1 0 およびシンク 6 2 0 の配置に対する系の周波数の依存状態を示している。ここで、エネルギー中継器は非能動である。たとえば、ソースとシンクとの間の距離が増大すると、奇モード周波数 8 0 5 および偶モード周波数 8 1 5 は、図 8 に示すように、主周波数 8 2 5 に向かって収束する。

【 0 0 3 8 】

図 9 は、モード周波数におけるソースまたはシンクのいずれかの回転の効果を示す概略図を示している。この実施の形態 1 では、2 つのモード周波数は、回転に関わらず比較的安定している。

【 0 0 3 9 】

図 1 0 は、モード周波数の同軸位置合わせからソースまたはシンクの変位の効果を示す概略図を示している。1 つの実施の形態 1 では、変位は $60 \text{ cm} \sim 0 \text{ cm}$ の範囲内にある。図示するように、変位が閾値、たとえば 60 cm に達すると、奇周波数および偶周波数は、個々の共振周波数に接近する。

【 0 0 4 0 】

図 1 1 は、ソースおよびシンクの異なる配置の結合係数を示している。図示されるように、ソースとシンクとの間の距離は、結合係数に最も影響し、次に変位、次に回転に影響

10

20

30

40

50

する。

【 0 0 4 1 】

図 1 2 および図 1 3 は、この発明の、エネルギー中継器を用いる実施の形態 1 および用いない実施の形態 1 を比較するグラフを示している。図 1 2 は、エネルギー中継器を含むシステム、すなわち曲線 1 2 0 0 および 1 2 2 0 の場合に、非能動エネルギー中継器を用いるシステム、すなわち曲線 1 2 1 0 および 1 2 3 0 の場合よりも結合係数がより大きくなることを示している。図 1 3 は、エネルギー中継器を用いるシステムの結合係数と、用いないシステムの結合係数と間の比較を示している。

【 0 0 4 2 】

この発明のいくつかの実施の形態 1 は、結合が或る距離範囲にわたって最適化されることを可能にする受動エネルギー中継器または能動エネルギー中継器のより大きなネットワークを使用する。通常、エネルギー中継器は、シンク ソース共振器リンクを強力に結合しないように配置される。

10

【 0 0 4 3 】

この発明を好ましい実施の形態 1 の例として説明してきたが、この発明の精神および範囲内で様々な他の適応および変更を行うことができることは理解されたい。したがって、添付の特許請求の範囲の目的は、この発明の真の精神および範囲内に入るすべての変形および変更を包含することである。

【 0 0 4 4 】

実施の形態 2 .

この発明の別の実施の形態 2 は、近接場の結合を介してエネルギーを無線で交換するための方法であって、第 1 の構造を提供するステップであって、該第 1 の構造は、該第 1 の構造の近接場と第 2 の構造の近接場との結合を介して該第 2 の構造とエネルギーを無線で交換するように構成され、該第 1 の構造および該第 2 の構造は、電磁 (E M) および非放射であり、該第 1 の構造および該第 2 の構造は、エネルギーの受信に応答して E M 近接場を生成する、第 1 の構造を提供するステップと、第 1 の構造と第 2 の構造との間の配向を確定するステップと、第 1 の構造の近接場が、配向に最適な特定のエネルギー分散パターンにしたがって生成されるように第 1 の構造の主周波数を調整するステップと、エネルギーを無線で交換するステップとを含む、方法を提供する。

20

【 0 0 4 5 】

この発明の実施の形態 2 は、無線エネルギー伝達システムのソースまたはシンクの主周波数を調整することによって、異なるゾーンにおいて最大強度を有する、少なくとも 4 つの異なる電磁 (E M) エネルギー分散パターンを生成することが可能になるという認識に基づく。この認識によって、最適な効率で異なる方向にエネルギーを伝達することが可能になる。

30

【 0 0 4 6 】

図 1 4 は、調整可能なソース 2 1 0 から複数のシンクへの無線エネルギー伝達を最適化するように構成される、この発明の実施の形態 2 を示している。ドライバ 2 4 0 がエネルギー 2 6 0 をソース 2 1 0 に供給すると、該ソースは E M 近接場 2 1 5 を生成する。通常、近接場 2 1 5 は特定のエネルギー分散パターンにしたがって生成される。該パターンは、後述するように、近接場強度が最適、すなわち最大である最適ゾーン、および近接場強度が最小にされるブラインドゾーンのような異なる複数のゾーンを有する。

40

【 0 0 4 7 】

いくつかの用途では、エネルギーを 2 つ以上のシンク、たとえばシンク₁ 2 2 1 およびシンク₂ 2 2 2 に伝達することが好都合である。しかしながら、シンク₁ がソースのエネルギー分散パターンの最適ゾーンを占有する場合、シンク₂ はパターンのブラインドゾーンに位置する可能性がある。したがって、コントローラ 2 7 0 は、ソース 2 1 0 の主周波数を調整して、エネルギー分散パターン 2 1 5 を別のエネルギー分散パターン 2 1 6 にする。ここで、パターン 2 1 6 の最適ゾーンがパターン 2 1 5 のブラインドゾーンに置き換わる。1 つの実施の形態 2 では、パターン 2 1 5 は偶バラフライパターンまたは奇パタフ

50

ライパターンのいずれかであり、パターン 2 1 6 は偶交差パターンまたは奇交差パターンのいずれかである。

【 0 0 4 8 】

ソースとシンクとの間の配向を使用して、該ソースと該シンクとの間の無線エネルギー伝達のための特定の最適パターンを確定する。したがって、実施の形態 2 によって、1つのソースを再利用して、異なる複数のシンクのロケーションに対応する複数の方向にエネルギーを最適に伝達することが容易になる。同様に、1つのシンクは複数のソースから、すなわち異なる複数の方向からエネルギーを受信することができる。

【 0 0 4 9 】

1つの実施の形態 2 では、主周波数の調整は、発振器、たとえば電圧発振器またはデジタル制御発振器によって達成される。コントローラ 2 7 0 は、発振器の制御信号、たとえば電圧またはデジタル信号をモニタリングして、システムのための所望の共振周波数を達成する。そのような発振器の例は、D i g i - k e y 社および N a r d a 社によって製造された発振器である。別の例は、C r y s t e c k 社の発振器（型番：C V C O 5 5 C L - 0 0 6 0 - 0 1 1 0）である。該発振器は、調整電圧を 0 . 5 V ~ 9 . 5 V で変化させながら 6 0 M H z ~ 1 1 0 M H z の周波数調整範囲を提供する。

10

【 0 0 5 0 】

システム 2 0 0 は、オプションで、近接場 2 2 0 内に配置される負屈折率材料（N I M）2 3 1 ~ 2 3 3 を備える。

【 0 0 5 1 】

この発明の実施の形態 2 は、ソースの主周波数を調整して、少なくとも 4 つの異なるエネルギー分散パターンを生成する。これらのパターンはバタフライ対パターンおよび交差対パターンを含む。ソースとシンクとの間の配向を使用して、ソースとシンクとの間の無線エネルギー伝達に最適な特定のパターンを確定する。したがって、この発明の実施の形態 2 によって、1つのソースを再利用して、異なる複数のシンクのロケーションに対応する複数の方向にエネルギーを最適に伝達することが容易になる。同様に、1つのシンクは複数のソースから、すなわち異なる複数の方向からエネルギーを受信することができる。

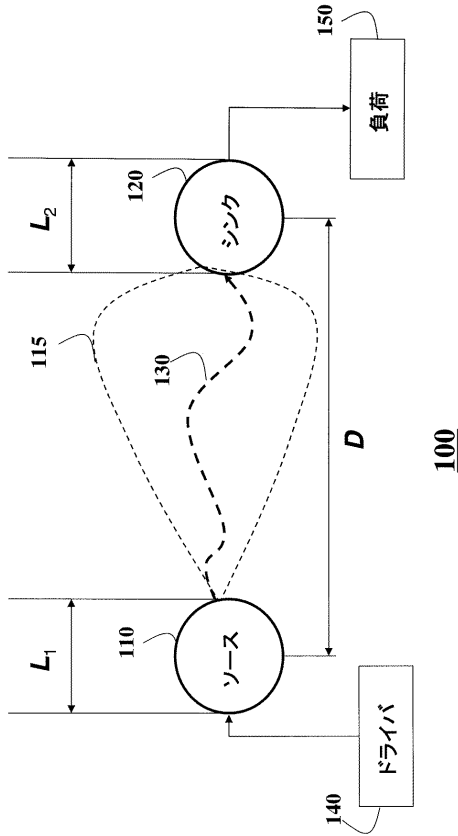
20

【 0 0 5 2 】

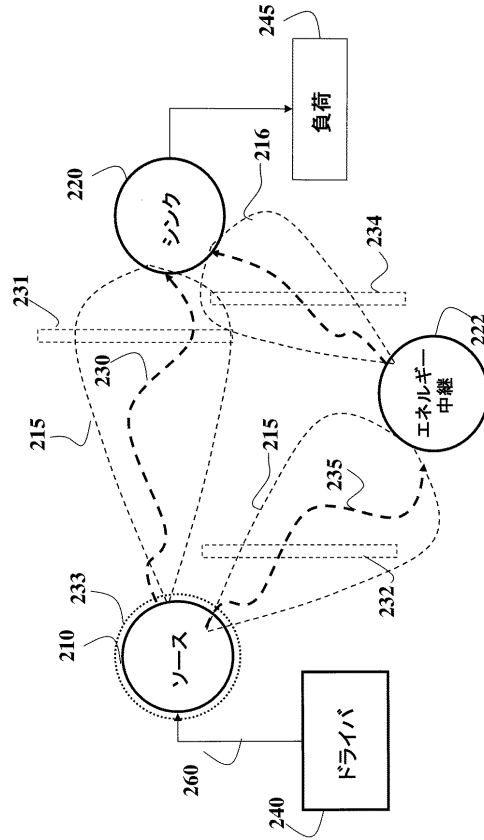
この発明を好ましい実施の形態 2 の例として説明してきたが、この発明の精神および範囲内で様々な他の適応および変更を行うことができることは理解されたい。したがって、添付の特許請求の範囲の目的は、この発明の真の精神および範囲内に入るすべての変形および変更を包含することである。

30

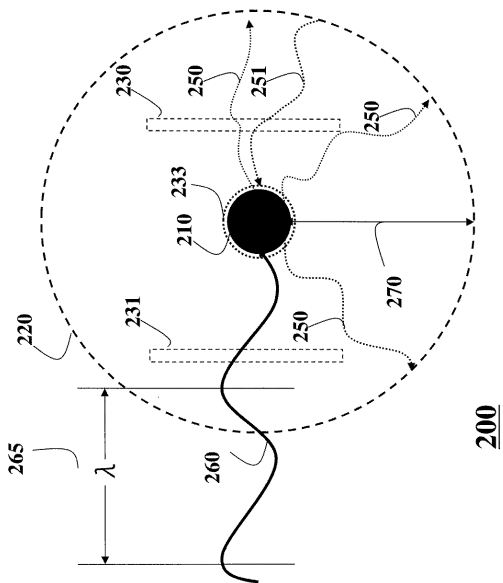
【 図 1 】



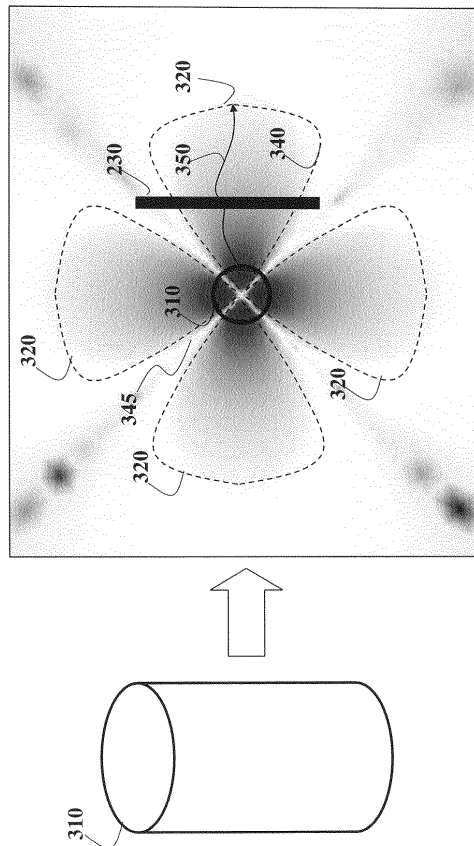
【 図 2 A 】



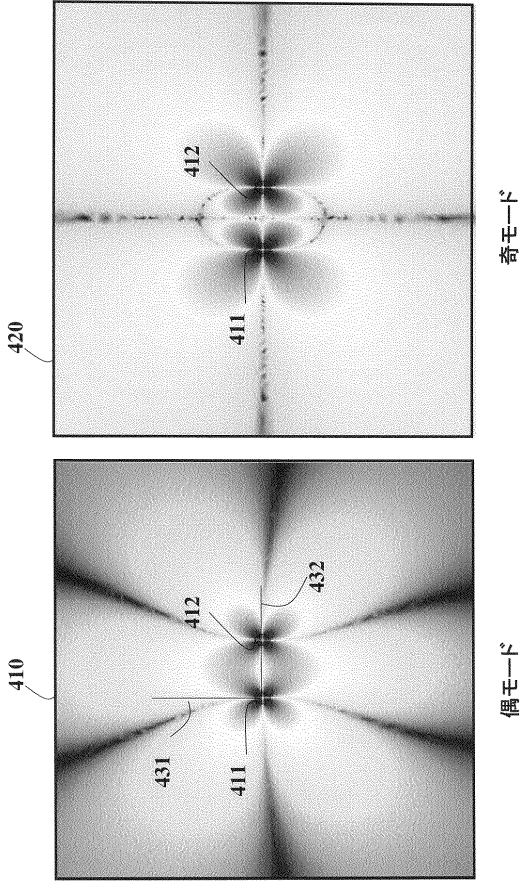
【 図 2 B 】



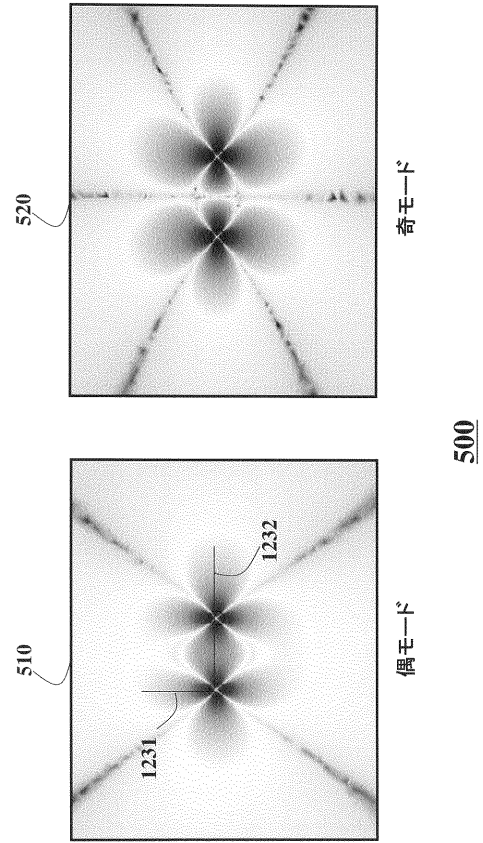
【 図 3 】



【 図 4 】

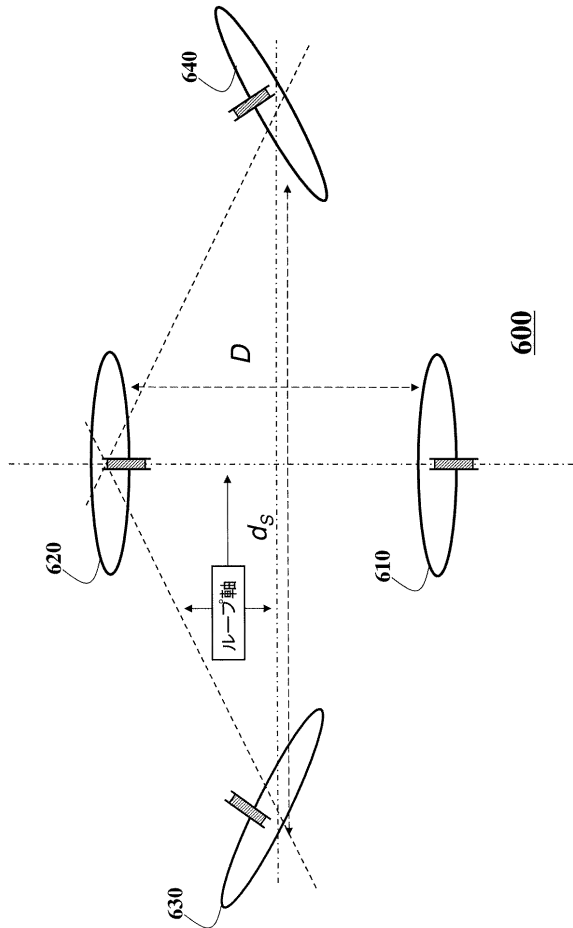


【 図 5 】

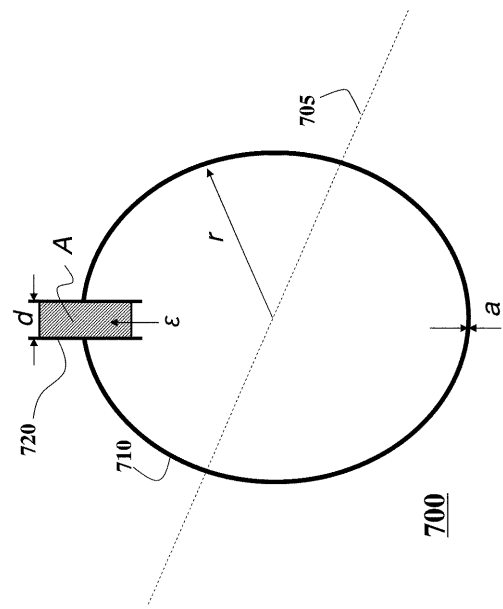


500

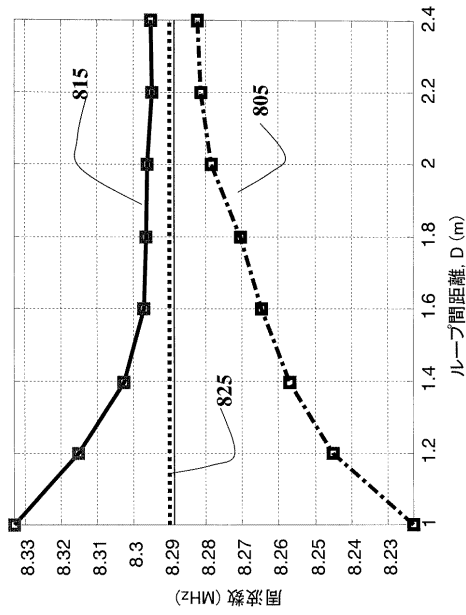
【 図 6 】



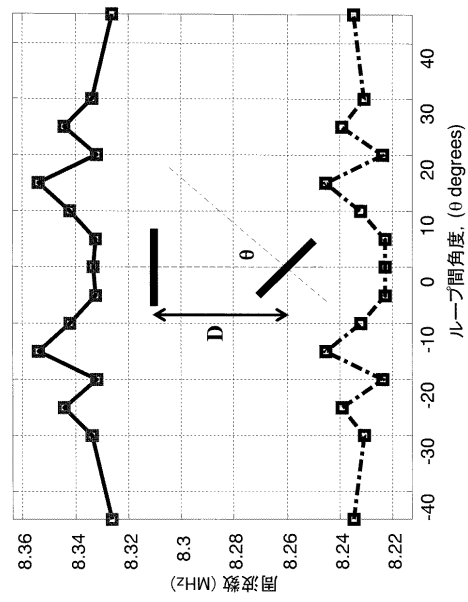
【 図 7 】



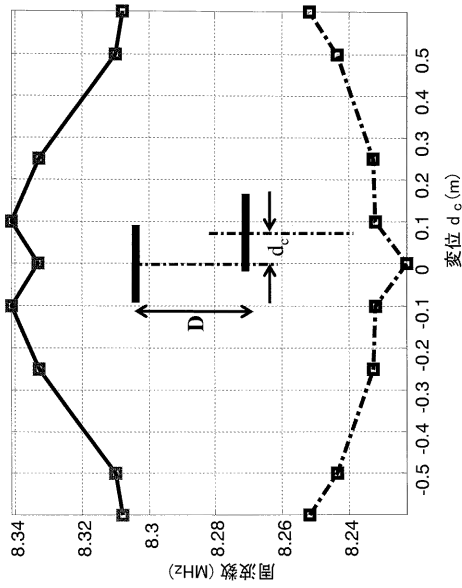
【 図 8 】



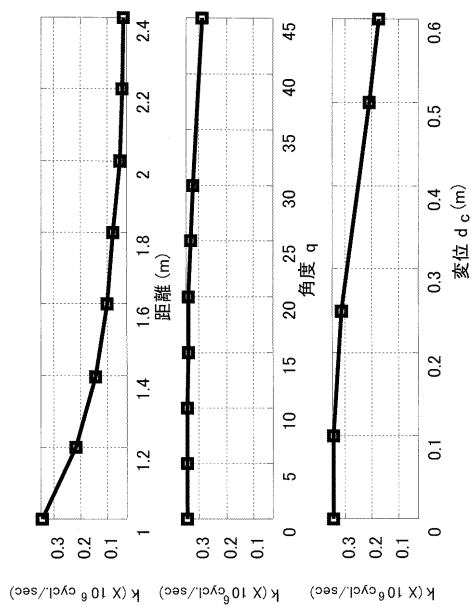
【 図 9 】



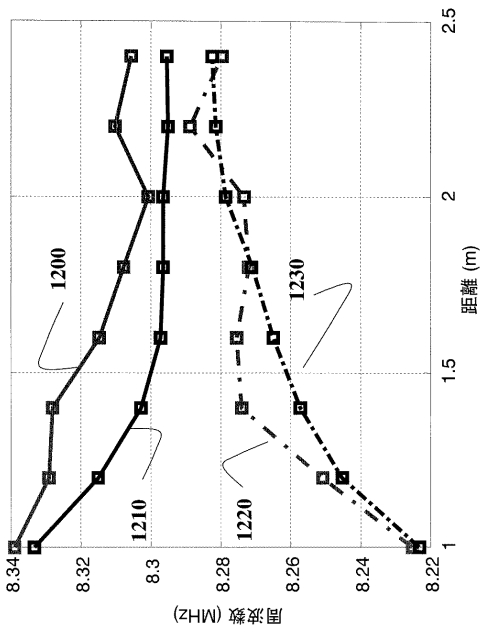
【 図 10 】



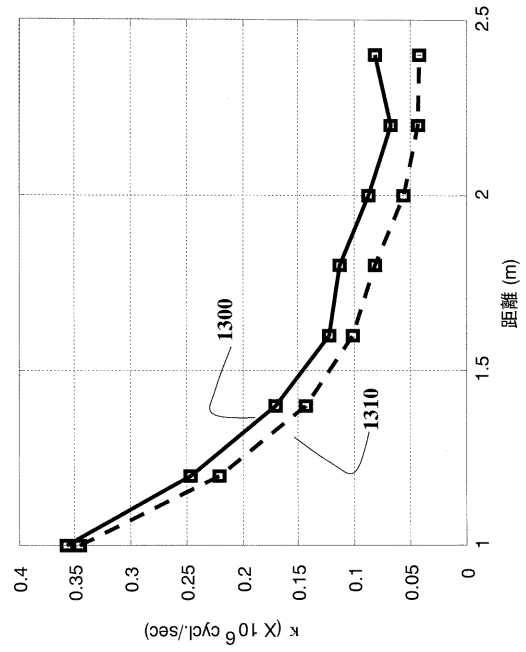
【 図 11 】



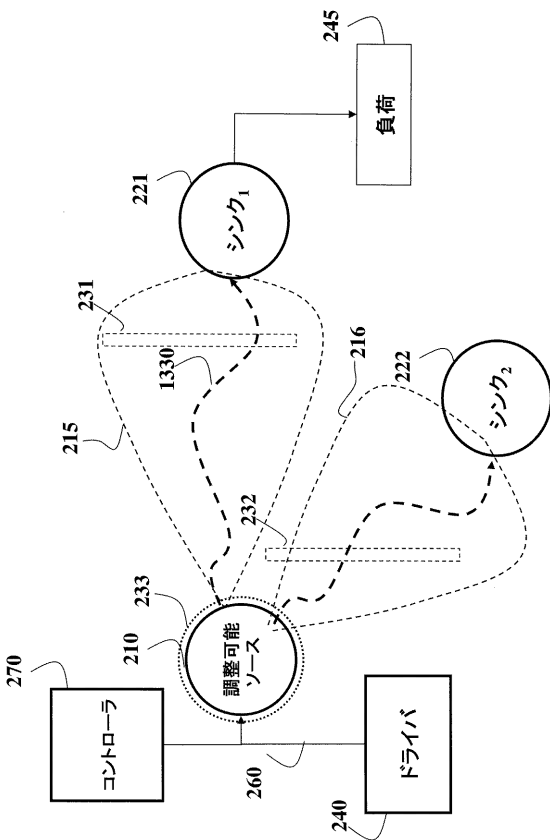
【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



フロントページの続き

- (74)代理人 100122437
弁理士 大宅 一宏
- (74)代理人 100147566
弁理士 上田 俊一
- (74)代理人 100161171
弁理士 吉田 潤一郎
- (74)代理人 100161115
弁理士 飯野 智史
- (72)発明者 クーン・フー・テオ
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、レキシントン、レキシントン・リッジ 4 2 3 1
- (72)発明者 ヴィシュワナス・アイヤー
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ネーティック、ラクスペー・ウェイ 4、ナンバー10
- (72)発明者 ウィリアム・エス・イエラズニス
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、アクトン、ナッシュ・ロード 2 4
- (72)発明者 チョンジェ・デュアン
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、メドフィールド、パイン・ストリート 2 9
- (72)発明者 ダ・ファン
アメリカ合衆国、ノースカロライナ州、ダーラム、モリーン・ロード 9 3 6、アパートメント
1 1
- (72)発明者 ザファー・サヒノグル
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、アーリントン、ハーヴァード・ストリート 3 6、アパー
トメント 1

【外国語明細書】

Wireless Energy Transfer Method and System with Energy Relays

Related Applications

This application is related to U.S. Patent Application Ser. No. (MERL-2218) 12/630,498 filed December 3, 2009, entitled “Wireless Energy Transfer with Negative Index Material” filed by Koon Hoo Teo, and U.S. Patent Application Ser. No. (MERL-2259) 12/xxx,xxx filed December xx, 2009, entitled “Wireless Energy Transfer with Negative Index Material” co-filed herewith by Koon Hoo Teo and incorporated herein by reference.

Additionally, this application is related to (MERL-2221) U.S. Patent Application No. 12/630,543 entitled “Wireless Energy Transfer with Negative Index Material,” filed by Koon Hoo Teo et al. on December 3, 2009, (MERL-2222) U.S. Patent Application No. 12/630,669 entitled “Wireless Energy Transfer with Negative Material,” filed by Koon Hoo Teo et al. on December 3, 2009, (MERL-2223) U.S. Patent Application No. 12/630,710 entitled “Wireless Energy Transfer with Negative Index Material” filed by Koon Hoo Teo et al. on December 3, 2009, all incorporated herein by reference.

Field of the Invention

The present invention relates to transferring energy, and more

particularly, to transferring energy wirelessly.

Background of the Invention

Wireless Energy Transfer

Inductive coupling is used in a number of wireless energy transfer applications such as charging a cordless electronic toothbrush or hybrid vehicle batteries. In coupled inductors, such as transformers, a source, e.g., primary coil, generates energy as an electromagnetic field, and a sink, e.g., a secondary coil, subtends that field such that the energy passing through the sink is optimized, e.g., is as similar as possible to the energy of the source. To optimize the energy, a distance between the source and the sink should be as small as possible, because over greater distances the induction method is highly ineffective.

Resonant Coupling System

In resonant coupling, two resonant electromagnetic objects, i.e., the source and the sink, interact with each other under resonance conditions. The resonant coupling transfers energy from the source to the sink over a mid-range distance, e.g., a fraction of the resonant frequency wavelength.

Figure 1 shows a conventional resonant coupling system 100 for

transferring energy from a resonant source 110 to a resonant sink 120. The general principle of operation of the system 100 is similar to inductive coupling. A driver 140 inputs the energy into the resonant source to form an oscillating electromagnetic field 115. The excited electromagnetic field attenuates at a rate with respect to the excitation signal frequency at driver or self resonant frequency of source and sink for a resonant system. However, if the resonant sink absorbs more energy than is lost during each cycle, then most of the energy is transferred to the sink. Operating the resonant source and the resonant sink at the same resonant frequency ensures that the resonant sink has low impedance at that frequency, and that the energy is optimally absorbed. An example of the resonant coupling system is disclosed in published U.S. Patent Applications 2008/0278264 and 2007/0222542, incorporated herein by reference.

The energy is transferred, over a distance D , between resonant objects, e.g., the resonant source having a size L_1 and the resonant sink having a size L_2 . The driver connects a power provider to the source, and the resonant sink is connected to a power consuming device, e.g., a resistive load 150. Energy is supplied by the driver to the resonant source, transferred wirelessly and non-radiatively from the resonant source to the resonant sink, and consumed by the load. The wireless non-radiative energy transfer is performed using the field 115, e.g., the electromagnetic field or an acoustic

field of the resonant system. For simplicity of this specification, the field 115 is an electromagnetic field. During the coupling of the resonant objects, evanescent waves 130 are propagated between the resonant source and the resonant sink.

Coupling Enhancement

According to coupled-mode theory, strength of the coupling is represented by a coupling coefficient k . The coupling enhancement is denoted by an increase of an absolute value of the coupling coefficient k . Based on the coupling mode theory, the resonant frequency of the resonant coupling system is partitioned into multiple frequencies. For example, in two objects resonance compiling systems, two resonant frequencies can be observed, named even and odd mode frequencies, due to the coupling effect. The coupling coefficient of two objects resonant system formed by two exactly same resonant structures is calculated by partitioning of the even and odd modes according to

$$K = \pi \left| f_{even} - f_{odd} \right| \quad (1)$$

It is a challenge to enhance the coupling. For example, to optimize the coupling, resonant objects with a high quality factor are selected

Accordingly, it is desired to optimize wireless energy transfer

between the source and the sink.

Summary of the Invention

One embodiment of the invention discloses a system configured to transfer energy wirelessly, comprising a source configured to transfer the energy wirelessly to a sink via a coupling of evanescent waves, wherein the source generates an electromagnetic (EM) near-field in response to receiving the energy; and an energy relay arranged such that to increase the coupling between the source and the sink, wherein the source, the sink, and the energy relay are electromagnetic and non-radiative structures.

Another embodiment of the invention discloses a method for transferring energy wirelessly via a coupling of near-fields, comprising steps of providing a source configured to transfer an energy wirelessly to a sink via the coupling of near-fields of the source and the sink, wherein the source and the sink are electromagnetic (EM) and non-radiative structures configured to generate EM near-fields in response to receiving the energy; providing an energy relay configured to increase the coupling between the source and the sink when the sink is arranged in a predetermined location; and transferring the energy wirelessly.

Effect of the Invention

This invention is based on a realization that a coupling of evanescent waves between an energy source and an energy sink can be optimized by arranging strategically at least one or more energy relays in a neighborhood of the source and the sink such that some evanescent waves generated by the source are redirected by the energy relay to the sink.

Brief Description of the Drawings

Figure 1 is a block diagram of a conventional resonant coupling system;

Figure 2A is an example of a system for transferring energy using an energy relay according to embodiments of the invention;

Figure 2B is a diagram of an electromagnetic structure according an embodiment of the invention;

Figure 3-5 are diagrams of different energy distribution pattern;

Figure 6 is an example of a system for supplying energy wirelessly using multiple energy relays;

Figure 7 example of an implementation of the energy relay; and

Figures 8-13 are schematics illustrating effects of different embodiments of the invention.

Figure 14 is a schematic of a system suitable to transfer or receive energy wirelessly according to an embodiment 2 of the invention.

Detailed Description of the Preferred Embodiments

Embodiment 1

Embodiments of the invention are based on a realization that a coupling of evanescent waves between an energy source and an energy sink can be optimized by arranging strategically at least one energy relay in a neighborhood of the source and the sink such that some evanescent waves generated by the source are redirected by the energy relay to the sink.

Figure 2A shows an embodiment of our invention configured to optimized wireless energy transfer from the source 210 to the sink 220. When the driver 240 supplies the energy 260 to the source 210, the source generates an EM near-field 215. Typically, the near-field 215 is generated according to a particular energy distribution pattern. The pattern, as described below, has different zones such as optimal zones, wherein near-field intensities are optimal, i.e., maximum. In blind zones, the near-field intensities are suboptimal.

Some of the evanescent waves 230, which are confined to the near field 215, directly reach and couple to the sink. However, some other evanescent waves 235 reach the energy relay 222 and are redirected to the sink within a near-field 216. Without the energy relay, the waves 235 are substantially useless for the energy transmission.

A distance and an orientation between the source and the sink are used to determine a particular arrangement of the energy relay. In some embodiments, the energy relay is passive, i.e., the energy not connected to any external source of energy and redirects the evanescent waves received from the source. In other embodiments, the energy relay is active, i.e., configured to absorb some of the energy transferred with the near-field 215, amplify the energy and regenerate the near-field 216. Accordingly, the embodiments increase the coupling between the source and the sink and facilitate transferring the energy wirelessly between the source and the sink over a longer distance than without the relay.

Figure 2B shows a structure 200 according an embodiment of the invention. The system is configured to exchange, e.g., transmit or receive, energy wirelessly and includes the structure 210 configured to generate an electromagnetic near-field 220 when the energy is received by the structure and exchange the energy wirelessly via a coupling of evanescent waves.

In one embodiment, the energy 260 is supplied by the driver 240 as known in the art. In this embodiment, the structure 210 serves as a source of the wireless energy transfer system. In an alternative embodiment, the energy 260 is supplied wirelessly from the source (not shown). In that embodiment, the structure 210 serves as the sink of the wireless energy transfer system.

The system 200 optionally includes negative index material (NIM) 231 -234 arranged within the near-field 215-216. In one embodiment, the NIM 233 substantially encloses the EM structure 210. The NIM is a material with negative permittivity and negative permeability properties. Several unusual phenomena are known for this material, e.g., evanescent wave amplification, surface plasmon-like behavior and negative refraction. Embodiments of the invention appreciated and utilized the unusual ability of NIM to amplify evanescent waves, which optimizes wireless energy transfer.

The shape and dimensions of the near-field, i.e., the energy distribution pattern, depends on a frequency of the external energy 260, and on a resonant frequency of the EM structure 210, determined in part by a shape of the EM structure, e.g., circular, helical, cylindrical shape, and parameters of a material of the EM structure such as conductivity, relative permittivity, and relative permeability.

Usually, a range 270 of the near-field is in an order of a dominant wavelength of the system. In non resonant systems, the dominant wavelength is determined by a frequency of the external energy 260, i.e., the wavelength λ 265. In resonant systems, the dominant wavelength is determined by a resonant frequency of the EM structure. In general, the dominant wavelength is determined by the frequency of the wirelessly exchanged energy.

The resonance is characterized by a quality factor (Q-factor), i.e., a dimensionless ratio of stored energy to dissipated energy. Because the objective of the system 200 is to transfer or to receive the energy wirelessly, the frequency of the driver or the resonant frequency is selected to increase the dimensions of the near-field region. In some embodiments, the frequency of the energy 260 and/or the resonant frequency is in diapason from MHz to GHz. In other embodiments, aforementioned frequencies are in the domain for visible light.

Evanescent Wave

An evanescent wave is a near-field standing wave with an intensity that exhibits exponential decay with distance from a boundary at which the wave is formed. The evanescent waves 235 are formed at the boundary between the structure 210 and other "media" with different properties in respect of wave motion, e.g., air. The evanescent waves are formed when the external energy is

received by the EM structure and are most intense within one-third of a wavelength of the near field from the surface of the EM structure 210.

Whispering Gallery Mode (WGM)

Whispering gallery mode is the energy distribution pattern in which the evanescent waves are internally reflected or focused by the surface of the EM structure. Due to minimal reflection and radiation losses, the WGM pattern reaches unusually high quality factors, and thus, WGM is useful for wireless energy transfer.

Figure 3 shows an example of the EM structure, i.e., a disk 310. Depending on material, geometry and dimensions of the disk 310, as well as the dominant frequency, the EM near-field intensities and energy density are maximized at the surface of the disk according to a WGM pattern 320.

The WGM pattern is not necessarily symmetric to the shape of the EM structure. The WGM pattern typically has blind zones 345, in which the intensity of the EM near-field is minimized, and optimal zones 340, in which the intensity of the EM near-field is maximized. Some embodiments of the invention place the NIM 230 in the optimal zones 340 to extend a range of the evanescent waves 350.

Even and Odd Modes

Figure 4 shows a butterfly energy distribution pattern. When two EM structures 411 and 412 are coupled to each other forming a coupled system, the dominant frequency of the coupled system is represented by even and odd frequencies. The near-field distribution at even and odd frequencies is defined as even mode coupled system 410 and an odd mode coupled system 420. Typical characteristic of the even and the odd modes of the coupled system of two EM structures is that if the EM field is in phase in the even mode then the EM field is out of phase in the odd mode.

Butterfly Pair

The even and odd mode coupled systems generate an odd and even mode distribution patterns of the near-field intensities defined as a butterfly pair. The EM near-field intensity distribution of the butterfly pair reaches minimum in two lines 431 and 432 oriented at 0 degree and 90 degree to the center of each EM structure, i.e., blind zones of the butterfly pair. However, it is often desired to change the intensity distribution and eliminate and/or change the positions and/or orientations of the blind zones.

Crossing Pair

Figure 5 shows distribution patterns of the near-field intensities

according embodiments of the invention define as a crossing pair 500. The crossing pair distribution pattern has optimal zones 1231 and 1232 oriented at 0 degree and 90 degree to the center of each EM structure, i.e., the optimal zones of the crossing pair pattern corresponds to the blind zones of the butterfly pair pattern. Therefore, one important characteristic of the butterfly pair and the crossing pair patterns is that their respective blind zones are not overlapping, and thus allows for eliminating the blind zones when both kinds of patterns are utilized. Butterfly and crossing patterns have the system quality factor and the coupling coefficient of the same order of magnitude.

Energy Relays Arrangement

Some embodiments of the invention use the knowledge of butterfly and crossing pair energy distribution pattern to arrange the energy relays in the neighborhood of the source and the sink. In some embodiment the location of the sink is predetermined, and the energy relays are arranged such that to optimize the coupling between the source and the sink when the sink is arranged in the predetermined location. In some embodiments this objective is achieved experimentally.

In another embodiment, the source is configured to transmit the energy to multiple sinks. Accordingly, the energy relays are arranged to increase the coupling of more than one sink.

Figure 6 shows an example of a system 600 configured to optimized transmission of the energy from the source 610 to the sink 620 using a first energy relay 630 and a second energy relay 640. In this embodiment, the EM structures of the source, sink, and the energy relay are implemented as a loop 700 as shown in Figure 7. The loop of a radius r is formed by a conductor wire 710 of a radius a , and by a capacitor 720 having a relative permittivity ϵ . A plate area of the capacitor is A , and the plates are separated over a distance d . The loop 700 has axis 705 and is a resonant structure. However, other embodiment uses different implementation of the structures, e.g., a disc.

The source 610 and the sink 620 are arranged over a distance D from each other measured from their respective centers. The source and the sink are aligned such that axes of the source and the sink lie along the same line. The source is connected to the driver (not shown) and the sink is connected to the load (not shown).

The first and the second energy relays are separated by a distance d_s and are arranged such as to increase the coupling of evanescent waves between the source and the sink. The distance d_s is selected such that the energy relays are not coupled strongly to

each other. In one embodiment, the loops of the energy relays are rotated such that their axes points towards the sink. In another embodiment the axes of the loops of the energy relays are perpendicular to the axis of the source and sink. In yet another embodiment the orientation of the energy relays is arbitrary.

Figures 8-11 show schematics illustrating dependencies of frequencies of the system on arrangements of the source 610 and the sink 620, wherein the energy relays are inactive. For example, as the distance between the source and the sink increases the odd 805 and even 815 mode frequencies converge towards a dominant frequency 825, as shown in Figure 8.

Figure 9 shows a schematic illustrating effect of the rotation of either the source or the sink on the mode frequencies. In this embodiment, the two mode frequencies relatively stable despite of the rotation.

Figure 10 shows a schematic illustrating effect of displacement of the source or the sink from the coaxial alignment on the mode frequencies. In one embodiment, the displacement is within a range from 60 cm to 0. As shown, after the displacement reaches a threshold, e.g., 60 cm, the odd and even frequencies approach the individual resonator frequencies.

Figure 11 shows coupling coefficients for different arrangements of

the source and the sink. As shown, the distance between the source and the sink affect the coupling coefficient the most, followed by the displacement and then the rotation.

Figures 12 and 13 show graphs comparing embodiments of the invention with and without energy relays. Figure 12 shows that the coupling coefficient is larger for the system which includes the energy relays, i.e., the curves 1200 and 1220, than for the system with the inactive energy relays, i.e., the curves 1210 and 1230. Figure 13 shows the comparison between the coupling coefficients of the systems with and without energy relays.

Some embodiments of the invention use a larger network of passive or active energy relays that allow the coupling to be optimized over a range of distances. Typically, the energy relays are arranged such that they do not strongly couple to the sink-source resonant link.

Although the invention has been described by way of examples of preferred embodiments, it is to be understood that various other adaptations and modifications may be made within the spirit and scope of the invention. Therefore, it is the object of the appended claims to cover all such variations and modifications as come within the true spirit and scope of the invention.

Embodiment 2

One embodiment 2 of the invention provides a system configured to exchange energy wirelessly, comprising a structure configured to exchange the energy wirelessly via a coupling of evanescent waves, wherein the structure is electromagnetic (EM) and non-radiative, and wherein the structure generates an EM near-field in response to receiving the energy; and a controller configured to tune the structure such that the near-field is generated according a particular energy distribution pattern.

Another embodiment 2 of the invention provides a method for exchanging energy wirelessly via a coupling of near-fields, comprising steps of providing a first structure configured to exchange energy wirelessly with a second structure via the coupling of near-fields of the first structure and the second structure, wherein the first and the second structures are electromagnetic (EM) and non-radiative, and wherein the first and the second structures generate EM near-fields in response to receiving the energy; determining an orientation between the first structure and the second structure; tuning a dominant frequency of the first structure such that the near-field of the first structure is generated according a particular energy distribution pattern optimal for the orientation; and exchanging energy wirelessly.

Embodiments of the invention are based on a realization that tuning a dominant frequency of a source or a sink of a wireless

energy transfer system enables the generation of at least four different electromagnetic (EM) energy distribution patterns with maximum intensities in different zones. This realization allows transferring energy in different direction with optimized efficiency.

Figure 14 shows an embodiment of our invention configured to optimized wireless energy transfer form a tunable source 210 to multiple sinks. When the driver 240 supplies the energy 260 to the source 210, the source generates an EM field 215. Typically, the near-field 215 is generated according to a particular energy distribution pattern. The pattern, as described below, has different zones, such as optimum zones, wherein near-field intensities are optimal, i.e., maximum, and blind zones, wherein the near-field intensities are minimized.

In some applications, it is advantageous to transfer the energy to more than one sink, e.g., to the sink₁ 221 and to the sink₂ 222. However, if the sink₁ occupies the optimal zone of the energy distribution pattern of the source, the sink₂ can be located in the blind zone of the pattern. Therefore, a controller 270 tunes the dominant frequency of the source 210 to change the energy distribution pattern 215 to another energy distribution pattern 216, wherein the optimal zone of the pattern 216 replaces the blind zone of the pattern 215. In one embodiment, the pattern 215 is either even or odd butterfly pattern, and the pattern 216 is either even or odd crossing pattern.

An orientation between the source and the sink is used to determine a particular optimal pattern for wireless energy transfer between the source and the sink. Accordingly, the embodiments facilitate reusing one source to transfer energy optimally to multiple directions corresponding to locations of different sinks. Similarly, one sink can receive the energy from multiple sources, i.e., from different directions.

In one embodiment, the tuning of the dominant frequency is achieved by an oscillator, e.g., a voltage or a digital controlled oscillator. A controller 270 monitors a control signal, e.g., voltage or digital signal, of the oscillator to achieve the desired resonant frequency for the system. Examples of such oscillators are oscillators manufactured by Digi-key, and Narda companies. Another example is the Crystek corporation oscillator (model no: CVCO55CL-0060-0110), which provides frequency tuning range from 60MHz to 110MHz with tuning voltage changing from 0.5V to 9.5V.

The system 200 optionally includes a negative index material (NIM) 231 -233 arranged within the near-field 220.

Embodiments of the invention tune the dominant frequency of the source to generate at least four different energy distribution patterns. Those patterns include the butterfly pair pattern and the

crossing pair pattern. The orientation between the source and the sink is used to determine a particular pattern optimal for wireless energy transfer between the source and the sink. Accordingly, the embodiments facilitate reusing one source to transfer energy optimally to multiple directions corresponding to locations of different sinks. Similarly, one sink can receive the energy from multiple sources, i.e., from different directions.

Although the invention has been described by way of examples of preferred embodiments, it is to be understood that various other adaptations and modifications may be made within the spirit and scope of the invention. Therefore, it is the object of the appended claims to cover all such variations and modifications as come within the true spirit and scope of the invention.

1. A system configured to transfer energy wirelessly, comprising:
 - a source configured to transfer the energy wirelessly to a sink via a coupling of evanescent waves, wherein the source generates an electromagnetic (EM) near-field in response to receiving the energy; and
 - an energy relay arranged such that to increase the coupling between the source and the sink, wherein the source, the sink, and the energy relay are electromagnetic and non-radiative structures.
2. The system of claim 1, wherein a location of the sink during the energy transfer is predetermined, and wherein the energy relay is arranged such that to increase the coupling of between the source and the sink while the sink is arranged in the predetermined location.
3. The system of claim 1, further comprising:
 - a driver configured to supply the energy to the source.
4. The system of claim 1, further comprising:
 - a negative index material (NIM) arranged within the EM near-field such that the coupling is enhanced.
5. The system of claim 1, wherein the source and the energy relay are resonant structures.

6. The system of claim 2, wherein the NIM is arranged based on the predetermined location of the sink.

7. The system of claim 1, wherein the NIM is arranged such as to enclose the source.

8. The system of claim 1, wherein the energy relay is arranged based on an energy distribution pattern selected from a group of patterns consistent of an even butterfly pattern, an odd butterfly pattern, even crossing pattern, and an odd crossing pattern.

9. The system of claim 1, wherein the energy distribution pattern is determined based on a distance and/or an orientation among the source, the energy relay and the sink.

10. The system of claim 1, wherein the NIM has a negative permittivity property and a negative permeability property.

11. The system of claim 1, wherein the energy relay is configured to receive the evanescent waves from the source and redirect at least some of the evanescent waves to the sink.

12. The system of claim 1, wherein the energy relay is configured to receive the energy the source, amplify the energy and transmit

the energy to the sink.

13. The system of claim 1, wherein the energy relay includes a loop, wherein the loop is rotated such that an axis of the loop is directed toward the sink.

14. The system of claim 1, wherein the energy relay includes a loop, wherein the loop is rotated such that an axis of the loop is perpendicular to an axis of the sink.

15. The system of claim 1, wherein the energy relay is a first energy relay, further including:

a second energy relay arranged such that to increase the coupling between the source and the sink, wherein the first energy relay is not strongly coupled to the second energy relay.

16. The system of claim 1, further comprising:

a network of passive and active energy relays.

17. A method for transferring energy wirelessly via a coupling of near-fields, comprising steps of:

providing a source configured to transfer an energy wirelessly to a sink via the coupling of near-fields of the source and the sink, wherein the source and the sink are electromagnetic (EM) and non-radiative structures configured to generate EM near-fields in response to receiving the energy;

providing an energy relay configured to increase the coupling between the source and the sink when the sink is arranged in a predetermined location; and

transferring the energy wirelessly.

18. The method of claim 17, further comprising:

receiving, by the energy relay, at least part of the energy from the source; and

transferring, by the energy relay, at least part of the energy to the sink.

19. The method of claim 17, further comprising:

increasing the coupling using negative index material (NIM).

20. A system configured to exchange energy wirelessly, comprising:

a structure configured to exchange the energy wirelessly via a coupling of evanescent waves, wherein the structure is electromagnetic (EM) and non-radiative, and wherein the structure generates an EM field in response to receiving the energy; and

a controller configured to tune a dominant frequency of the structure such that the near-field is generated according a particular energy distribution pattern.

21. A method for exchanging energy wirelessly via a coupling of near-fields, comprising steps of:

providing a first structure configured to exchange an energy wirelessly with a second structure via the coupling of near-fields of the first structure and the second structure, wherein the first and the second structures are electromagnetic (EM) and non-radiative, and wherein the first and the second structures generate EM near-fields in response to receiving the energy;

determining an orientation between the first structure and the second structure;

tuning a dominant frequency of the first structure such that the near-field of the first structure is generated according a particular energy distribution pattern optimal for the orientation; and

exchanging energy wirelessly.

22. A system for exchanging energy wirelessly via a coupling of near-fields, comprising:

a first structure configured to exchange an energy wirelessly with a second structure via the coupling of near-fields of the first structure and the second structure, wherein the first and the second structures are electromagnetic (EM) and non-radiative, and wherein the first and the second structures generate EM near-fields in response to receiving the energy;

means for determining an orientation between the first structure and the second structure; and

means for tuning a dominant frequency of the first structure such that the near-field of the first structure is generated according a particular energy distribution pattern optimal for the orientation.

Abstract

Embodiments of the invention disclose a method and a system configured to transfer energy wirelessly, comprising a source configured to transfer the energy wirelessly to a sink via a coupling of evanescent waves, wherein the source generates an electromagnetic (EM) near-field in response to receiving the energy; and an energy relay arranged such that to increase the coupling between the source and the sink, wherein the source, the sink, and the energy relay are electromagnetic and non-radiative structures.

Representative Drawing

Figure 2A

FIG. 1

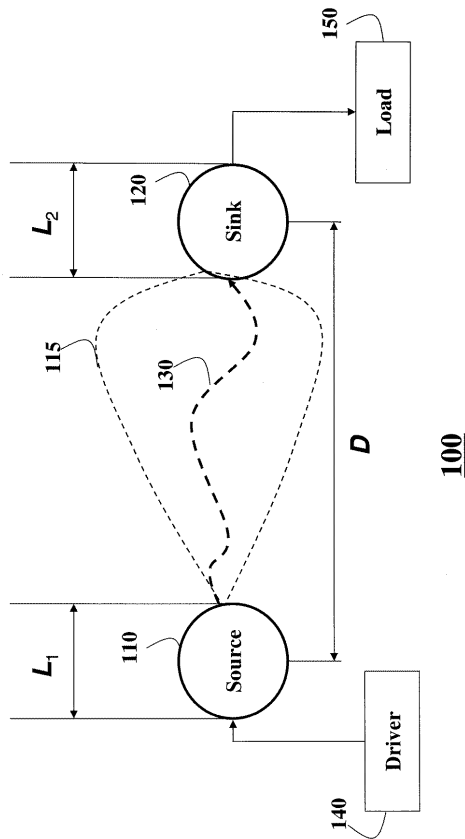


FIG. 2A

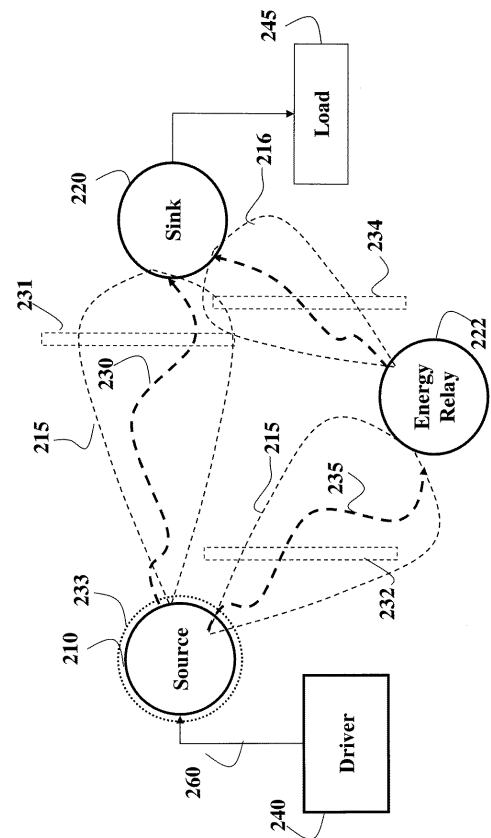


FIG. 2B

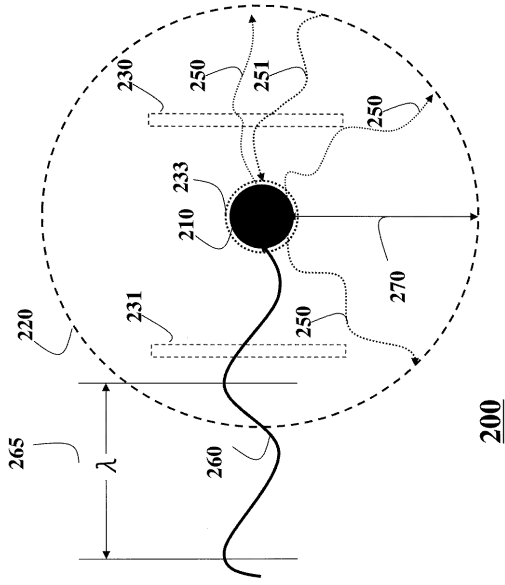
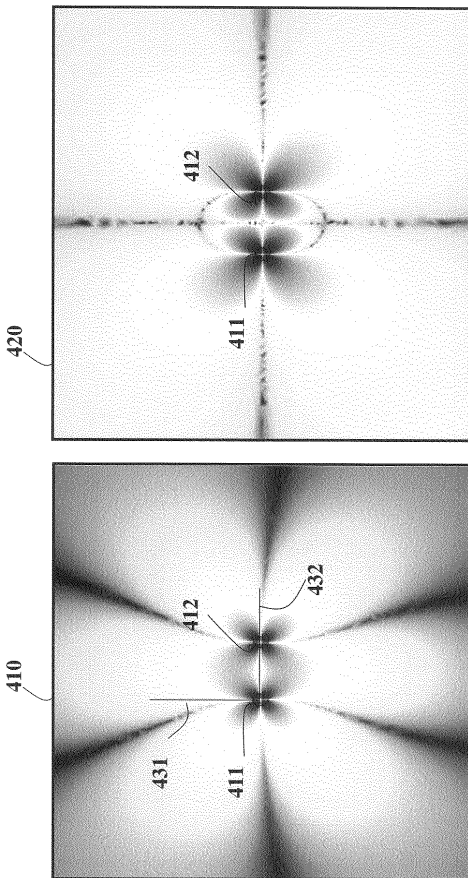


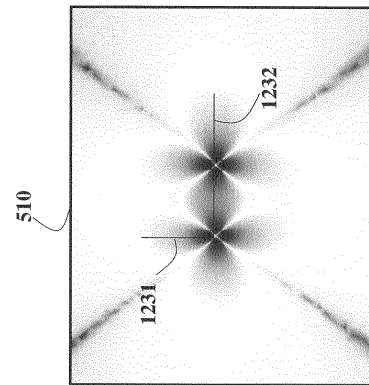
FIG. 4



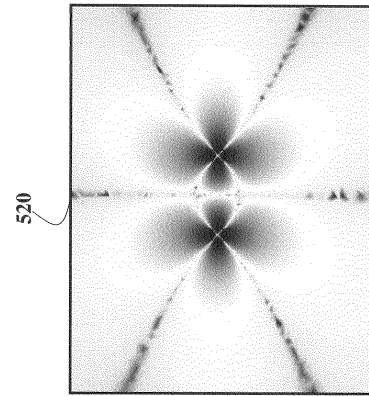
Even Mode

Odd Mode

FIG. 5



even mode



odd mode

500

FIG. 3

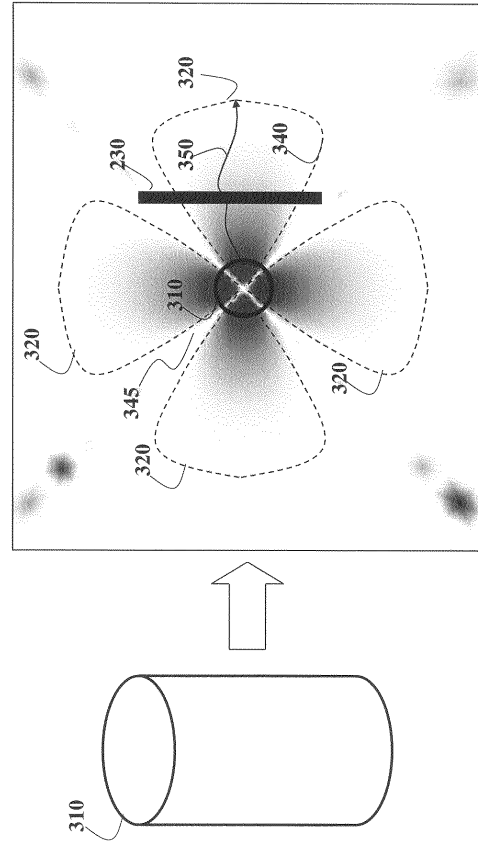


FIG. 6

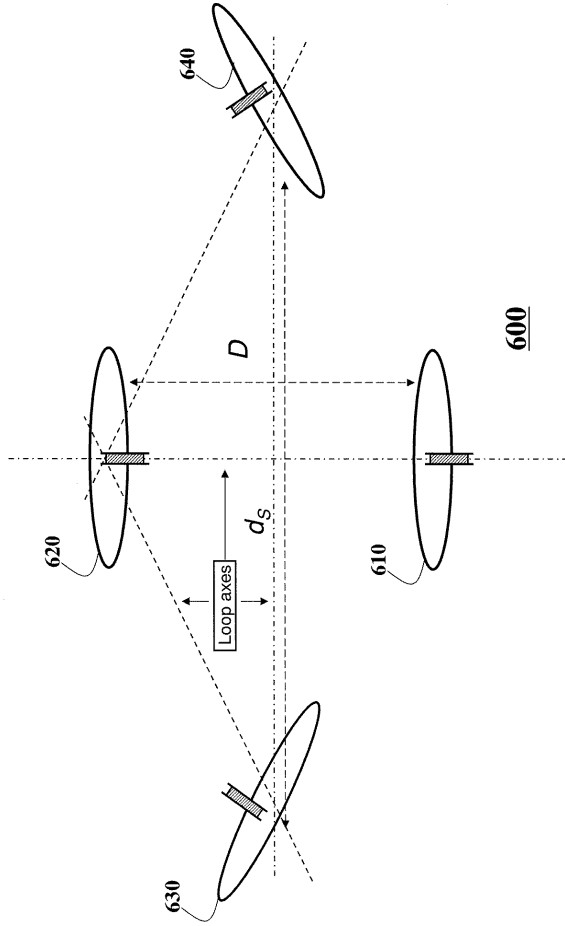


FIG. 8

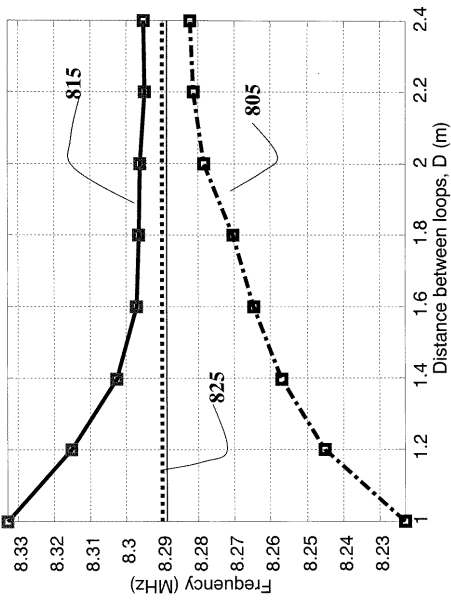


FIG. 7

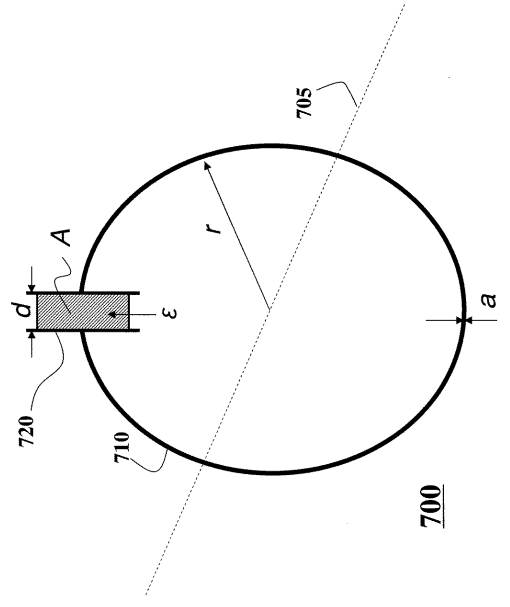


FIG. 9

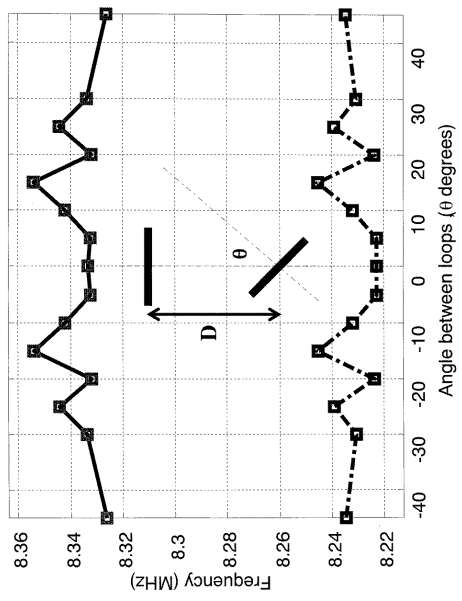


FIG. 10

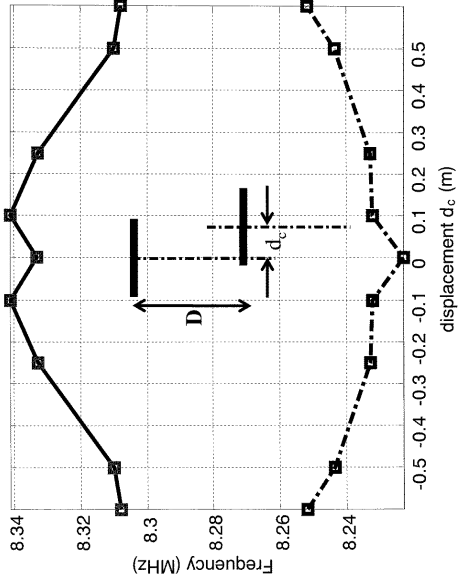


FIG. 11

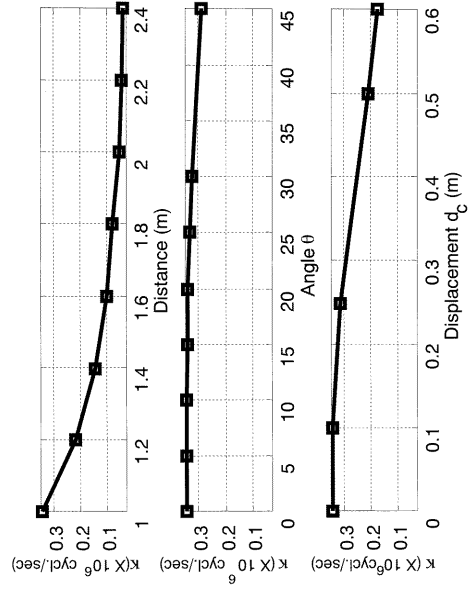


FIG. 12

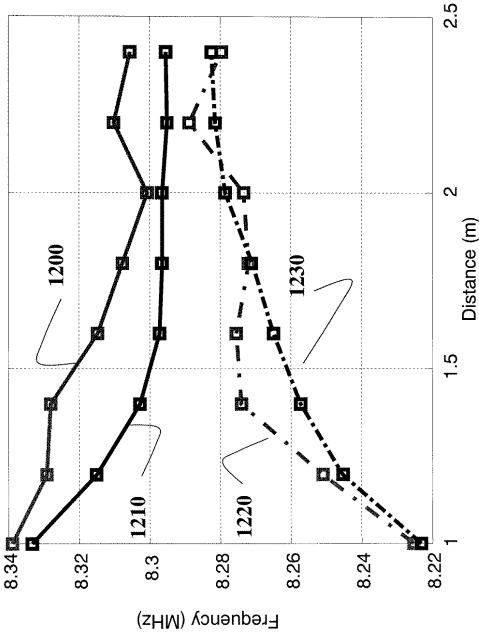


FIG. 13

