

(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2017-157975

(P2017-157975A)

(43) 公開日 平成29年9月7日(2017.9.7)

(51) Int.Cl.
H01Q 15/10 (2006.01)

F I
H01Q 15/10

テーマコード (参考)
5J020

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2016-38296 (P2016-38296)
(22) 出願日 平成28年2月29日 (2016.2.29)

(71) 出願人 504203572
国立大学法人茨城大学
茨城県水戸市文京二丁目1番1号
(74) 代理人 100102635
弁理士 浅見 保男
(74) 代理人 100197022
弁理士 谷水 浩一
(72) 発明者 鈴木 健仁
茨城県日立市中成沢町四丁目12番1号
国立大学法人茨城大学 工学部内
Fターム(参考) 5J020 AA02 BA02 BA03 BB01 BB03

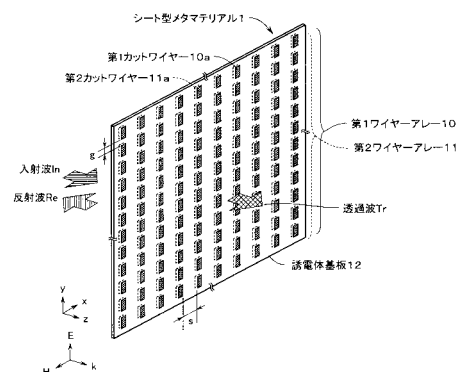
(54) 【発明の名称】 シート型メタマテリアルおよびシート型レンズ

(57) 【要約】

【課題】 金属性のカットワイヤーが誘電体基板の両面に装荷された構造とされたテラヘルツ波帯において屈折率がゼロとなるシート型メタマテリアルを提供する。

【解決手段】 フィルム状の誘電体基板12の表面に第1ワイヤーアレー10が形成され、誘電体基板12の裏面に第2ワイヤーアレー11が形成されている。第1ワイヤーアレー10は、間隔gを空けてy軸方向に、間隔sを空けてx軸方向に並べられて配列された長さlの細長い金属製の第1カットワイヤー10aにより構成され、第2ワイヤーアレー11は、第1カットワイヤー10aと重なるように同形状で対称配置されて形成された第2カットワイヤー11aにより構成されている。誘設計周波数を0.5THzとした時に、誘電体基板の厚さdが約50μm、間隔sを約361μm、間隔gを約106μm、第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aの長さlを使用周波数においてほぼ共振する長さとする。これにより、屈折率がゼロとなるシート型メタマテリアルが得られる。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

フィルム状の誘電体基板と、

該誘電体基板の一面に形成された第 1 ワイヤアレーと、

前記誘電体基板の他面に形成された第 2 ワイヤアレーとを備え、

前記第 1 ワイヤアレーは、間隔 g を空けて前記誘電体基板の y 軸方向に、間隔 s を空けて y 軸と直交する x 軸方向に並べられて配列された所定長 l の細長い金属製の第 1 カットワイヤーにより構成され、前記第 2 ワイヤアレーは、前記第 1 カットワイヤーと同形状で前記第 1 カットワイヤーに重なるように対称配置されて配列された金属製の第 2 カットワイヤーにより構成されており、

設計周波数を 0.51 THz とした時に、前記誘電体基板の厚さ d を約 $50 \mu\text{m}$ 、前記間隔 s を約 $361 \mu\text{m}$ 、前記間隔 g を約 $106 \mu\text{m}$ 、前記第 1 カットワイヤーおよび前記第 2 カットワイヤーの長さ l を使用周波数においてほぼ共振する長さとするを特徴とするシート型メタマテリアル。

【請求項 2】

多数の単位セルが整列してフィルム状の誘電体基板に形成されているシート型レンズであって、

前記単位セルは、該誘電体基板の一面に形成された所定長 l の細長い金属製の第 1 カットワイヤーと、前記第 1 カットワイヤーと同形状で前記誘電体基板の他面に形成された金属製の第 2 カットワイヤーとにより構成され、

前記誘電体基板の一面には、前記単位セルの前記第 1 カットワイヤーが y 軸方向に間隔 g を空けると共に、 y 軸方向に直交する x 軸方向に間隔 s を空けて配列され、

前記誘電体基板の他面には、前記単位セルの前記第 2 カットワイヤーが y 軸方向に間隔 g を空けると共に、 y 軸方向に直交する x 軸方向に間隔 s を空けて配列され、

前記第 1 カットワイヤーおよび前記第 2 カットワイヤーの長軸が y 軸方向にほぼ平行に配列されており、前記誘電体基板の領域が、中央部から外縁までの n 領域に分割され、最も内側の第 1 領域 R_1 の屈折率が正、最も外側の第 n 領域 R_n の屈折率が負とされ、前記第 1 領域 R_1 と前記第 n 領域 R_n との間の所定の領域 R_k の屈折率がゼロとされて、前記第 1 領域 R_1 から前記第 n 領域 R_n に向かうに従って屈折率が次第に小さくされていることを特徴とするシート型レンズ。

【請求項 3】

前記第 1 領域 R_1 ないし前記領域 R_k までの領域においては、前記第 1 カットワイヤーと前記第 2 カットワイヤーとが重なるよう対称配置され、前記領域 R_k の次の領域 $R(k+1)$ から前記第 n 領域 R_n までの領域においては、前記第 1 カットワイヤーと前記第 2 カットワイヤーとが y 軸方向にずらせて重なるよう非対称配置されていることを特徴とする請求項 2 に記載のシート型レンズ。

【請求項 4】

所定の屈折率を得るために、前記第 1 カットワイヤーおよび前記第 2 カットワイヤーにおける幅 w 、前記所定長 l 、前記間隔 s 、前記間隔 g の寸法が、前記第 1 領域ないし前記第 n 領域において、調整されていることを特徴とする請求項 2 に記載のシート型レンズ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、金属性のカットワイヤーが誘電体基板の両面に装荷されたメタマテリアルとして機能するシート型メタマテリアル、および、シート型メタマテリアルを応用したシート型レンズに関する。

【背景技術】

【0002】

誘電率・透磁率がともに負の媒質に光が入射すると、負の屈折が起こることがベセラゴにより示され、透磁率および誘電率が負になる人工的な構造が提案された。この透磁率お

10

20

30

40

50

よび誘電率が負になる人工的な構造は、原子より十分大きく光波長のスケールより小さい構造物の集合体からなり、メタマテリアルといわれている。負屈折媒質であるメタマテリアルを用いると、平面構造とされた完全レンズを作成することができる。完全レンズでは、回折限界を超えた微細なものまで観察することが可能であり、近接場（エバネッセント波）まで忠実に再現することができる。

【0003】

メタマテリアルは、最近注目されているテラヘルツ波用のレンズに適用することができる。テラヘルツ波は、周波数が0.1～10THz（波長が30μm～3000μm）の電磁波とされており、波長が遠赤外～ミリ波領域とほぼ一致し、「光」と「ミリ波」に挟まれた周波数領域に存在している。このため、テラヘルツ波は、光と同様に高い空間分解能でものを見分ける能力と、ミリ波と同様の物質を透過する能力を併せ持っている。テラヘルツ波帯はこれまで未開拓電磁波であったが、この周波数帯の電磁波の特徴を生かした時間領域分光、イメージング及びトモグラフィによる材料のキャラクタリゼーションへの応用などが検討されてきている。テラヘルツ波の発生は、物質透過性と直進性を兼ね備えるためX線に替わる安全かつ革新的なイメージングや、数100Gbps級の超高速無線通信を可能とすることができる。

10

【0004】

特に、テラヘルツイメージングは、X線に代わる安全、安心かつ高精度な可視化技術の1つとして大きな魅力を有している。回折限界を突破した近接場によるテラヘルツナノイメージングや、1.4THzで分解能400nm（1波長/540）が得られることが報告されている。また、共鳴トンネルダイオードを用いた0.3THzでのイメージングも報告されている。メタマテリアルは負の屈折率に設計することができ、エバネッセント成分となる近接場光を離れた場所で復元し、回折限界を超えた平板完全レンズを実現できる可能性がある。

20

【0005】

本出願人は、特願2015-16116号の出願でテラヘルツ波帯において低損失で負の屈折率が得られるシート型メタマテリアルを提案していると共に、特願2015-154943号の出願でテラヘルツ波帯において低損失で高屈折率が得られるシート型メタマテリアルを提案している。

また、ゼロの屈折率を得られるメタマテリアルが提案されている（非特許文献1参照）。このゼロの屈折率が得られる従来のメタマテリアル100の概念図を図21に示す。図21に示すメタマテリアル100は、金属110と誘電体111とを周期的に積層した周期構造とされている。このメタマテリアルでは、特定の周波数（臨界状態）の場合には、実効屈折率がゼロになる。ゼロ屈折率の物質では、位相の前進はなくなる、つまり光は図示するように空間を進む一連の山と谷、動く波として振る舞わない。代わりにゼロ屈折率の物質は定常相、全てが山か全てが谷となり、無限に長い波長になる。その山と谷は、空間ではなく、時間の変数としてのみ振動する。この均一な位相により、光はエネルギーを失うことなく、伸びたり縮んだり、捻れたり曲がったりする。このため、図示するように光がメタマテリアル100に対して上面から進入した場合、メタマテリアル100中においては位相は変化することなく一定の位相で伝搬していく（位相速度無限大）。

30

40

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】国立研究開発法人 物質・材料研究機構 「光メタマテリアルが屈折率ゼロの特殊な性質を持つことを理論的に解明」[online]，[平成28年 2月14日検索]，インターネット<<http://www.nims.go.jp/news/press/2015/12/201512160.html>>

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

屈折率が負の材料中において伝搬するテラヘルツ波の位相は進行方向とは逆に進

50

行し、上記したように屈折率がゼロの材料中において伝搬するテラヘルツ波の位相は一定となり、屈折率が正の材料中において伝搬するテラヘルツ波の位相は進行方向に進行する。これにより、屈折率が負、ゼロ、正の材料を組み合わせることにより、自然界の材料では不可能な拡張された位相制御がテラヘルツ波において可能となる。また、屈折率が負、ゼロ、正の材料を組み合わせることにより、分布屈折率のメタ材料レンズを実現することができる。

しかしながら、上記した従来の屈折率がゼロのメタ材料は金属 1 1 0 と誘電体 1 1 1 とを周期的に積層した周期構造とされていることから、周期構造内でテラヘルツ波が減衰し易く、良好な透過電力特性を得ることが困難になるという問題点があった。また、上記した従来の屈折率がゼロのメタ材料では、屈折率が負および正に設定されていないことから、分布屈折率のテラヘルツ波帯のレンズを提供できないという問題点があった。

10

【0008】

そこで、本発明は、金属性のカットワイヤーが誘電体基板の両面に装荷された構造とされたテラヘルツ波帯において屈折率がゼロとなるシート型メタ材料を提供すること、および、金属性のカットワイヤーが誘電体基板の両面に装荷された構造とされたテラヘルツ波帯における分布屈折率のシート型レンズを提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記目的を達成するために、本発明のシート型メタ材料は、フィルム状の誘電体基板と、該誘電体基板の一面に形成された第 1 ワイヤアレーと、前記誘電体基板の他面に形成された第 2 ワイヤアレーとを備え、前記第 1 ワイヤアレーは、間隔 g を空けて前記誘電体基板の y 軸方向に、間隔 s を空けて y 軸と直交する x 軸方向に並べられて配列された所定長 l の細長い金属製の第 1 カットワイヤーにより構成され、前記第 2 ワイヤアレーは、前記第 1 カットワイヤーと同形状で前記第 1 カットワイヤーに重なるように対称配置されて配列された金属製の第 2 カットワイヤーにより構成されており、設計周波数を 0.51 THz とした時に、前記誘電体基板の厚さ d を約 $50 \mu\text{m}$ 、前記間隔 s を約 $361 \mu\text{m}$ 、前記間隔 g を約 $106 \mu\text{m}$ 、前記第 1 カットワイヤーおよび前記第 2 カットワイヤーの長さ l を使用周波数においてほぼ共振する長さとするを最も主要な特徴としている。

20

30

【0010】

また、本発明のシート型レンズは、多数の単位セルが整列してフィルム状の誘電体基板に形成されているシート型レンズであって、前記単位セルは、該誘電体基板の一面に形成された所定長 l の細長い金属製の第 1 カットワイヤーと、前記第 1 カットワイヤーと同形状で前記誘電体基板の他面に形成された金属製の第 2 カットワイヤーとにより構成され、前記誘電体基板の一面には、前記単位セルの前記第 1 カットワイヤーが y 軸方向に間隔 g を空けると共に、 y 軸方向に直交する x 軸方向に間隔 s を空けて配列され、前記誘電体基板の他面には、前記単位セルの前記第 2 カットワイヤーが y 軸方向に間隔 g を空けると共に、 y 軸方向に直交する x 軸方向に間隔 s を空けて配列され、前記第 1 カットワイヤーおよび前記第 2 カットワイヤーの長軸が y 軸方向にほぼ平行に配列されており、前記誘電体基板の領域が、中央部から外縁までの n 領域に分割され、最も内側の第 1 領域 R_1 の屈折率が正、最も外側の第 n 領域 R_n の屈折率が負とされ、前記第 1 領域 R_1 と前記第 n 領域 R_n との間の所定の領域 R_k の屈折率がゼロとされて、前記第 1 領域 R_1 から前記第 n 領域 R_n に向かうに従って屈折率が次第に小さくされていることを最も主要な特徴としている。

40

また、本発明のシート型レンズにおいて、前記第 1 領域 R_1 ないし前記領域 R_k までの領域においては、前記第 1 カットワイヤーと前記第 2 カットワイヤーとが重なるよう対称配置され、前記領域 R_k の次の領域 $R(k+1)$ から前記第 n 領域 R_n までの領域においては、前記第 1 カットワイヤーと前記第 2 カットワイヤーとが y 軸方向にずらせて重なるよう非対称配置されている。さらに、本発明のシート型レンズにおいて、所定の屈折率を

50

得るために、前記第1カットワイヤーおよび前記第2カットワイヤーにおける幅 w 、前記所定長 l 、前記間隔 s 、前記間隔 g の寸法が、前記第1領域ないし前記第 n 領域において調整されている。

【発明の効果】

【0011】

本発明によれば、金属性のカットワイヤーが誘電体基板の両面に装荷された構造とされ、設計周波数を 0.51 THz とした時に、誘電体基板の厚さ d を約 $50\ \mu\text{m}$ 、間隔 s を約 $361\ \mu\text{m}$ 、間隔 g を約 $106\ \mu\text{m}$ 、第1カットワイヤーおよび第2カットワイヤーの長さ l を使用周波数においてほぼ共振する長さとすることにより、テラヘルツ波帯において屈折率がほぼゼロとなるシート型メタ材料を得ることができる。また、フィルム状の誘電体基板上に最も内側の第1領域から最外側の第 n 領域に向かって屈折率が正からゼロ、ゼロから負になるよう単位セルを形成することにより、一枚のフィルム状とされた分布屈折率のテラヘルツ波帯のシート型レンズを提供することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】本発明の実施例のシート型メタ材料の構成を示す斜視図である。

【図2】本発明の実施例のシート型メタ材料の周期境界壁を示した単位セルの構成を示す斜視図である。

【図3】本発明の実施例のシート型メタ材料における単位セルの寸法の一例を示す図表である。

20

【図4】本発明の実施例のシート型メタ材料におけるFOMと屈折率の周波数特性を示すグラフである。

【図5】本発明にかかるシート型メタ材料における透過電力と反射電力の周波数特性を示すグラフである。

【図6】本発明にかかるシート型メタ材料における比インピーダンスの周波数特性を示すグラフである。

【図7】本発明にかかるシート型メタ材料における比誘電率の周波数特性を示すグラフである。

【図8】本発明にかかるシート型メタ材料における比透磁率の周波数特性を示すグラフである。

30

【図9】本発明にかかるシート型メタ材料の単位セルの 0.5 THz における間隔 g と長さ l のパラメータに対する屈折率の実部の等高線図である。

【図10】本発明にかかるシート型メタ材料の単位セルの 0.5 THz における間隔 g と長さ l のパラメータに対する屈折率の虚部の等高線図である。

【図11】本発明にかかるシート型メタ材料の単位セルの 0.5 THz における間隔 g と長さ l のパラメータに対する透過電力の等高線図である。

【図12】本発明にかかるシート型メタ材料の単位セルの 0.5 THz における間隔 g と長さ l のパラメータに対する反射電力の等高線図である。

【図13】本発明の実施例のシート型レンズの構成を示す斜視図、一部拡大図である。

【図14】本発明の実施例のシート型レンズにおける寸法の一例を示す図表である。

40

【図15】本本発明の実施例のシート型レンズにおける周期境界壁を示した屈折率が負の単位セルの構成を示す斜視図である。

【図16】本本発明の実施例のシート型レンズにおける屈折率が負の単位セルの構成を示す側面図、単位セルの寸法の一例を示す図表である。

【図17】本発明の実施例のシート型レンズのE面およびH面の電界強度の分布を示す図である。

【図18】本発明の実施例のシート型レンズの光軸上の電界強度を示す図である。

【図19】本発明の実施例のシート型レンズの光軸に直交する面上の電界強度の分布を示す図である。

【図20】本発明の実施例のシート型レンズの光軸に直交する面における光軸から直交す

50

る面上の距離に対する電界強度を示す図である。

【図 2 1】従来のゼロの屈折率を得られるメタマテリアルの概念図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

本発明の実施例のシート型メタマテリアル 1 の構成を示す斜視図を図 1 に、本発明の実施例のシート型メタマテリアル 1 の 1 周期分の構成である周期境界壁を示した単位セル 1 3 の構成を示す斜視図を図 2 に示す。

これらの図に示す本発明の実施例にかかるシート型メタマテリアル 1 は、テラヘルツ波帯において屈折率がほぼゼロのシート型メタマテリアルとして動作する。このシート型メタマテリアル 1 は、図 1 および図 2 に示すように $x - y$ 平面に置かれた柔軟なフィルムからなる矩形の誘電体基板 1 2 の表面に細長い矩形の第 1 カットワイヤー 1 0 a が所定間隔で y 軸方向および x 軸方向に多数本並べて形成され、裏面に第 1 カットワイヤー 1 0 a と同形状の細長い矩形の第 2 カットワイヤー 1 1 a が第 1 カットワイヤー 1 0 a にそれぞれ重なるよう対称配置されて多数本並べて形成されている。この場合、第 1 カットワイヤー 1 0 a および第 2 カットワイヤー 1 1 a は、長手方向が y 軸に平行とされ、互いに平行に縦横に配列されている。

【0014】

y 軸方向に細長い矩形の長さ l の第 1 カットワイヤー 1 0 a を、その中心軸が一致するよう y 軸方向に g の間隔を空けると共に、互いに平行になるよう s の間隔を空けて x 軸方向に多数本並べて、誘電体基板 1 2 の表面に配設されるように形成されている。この第 1 カットワイヤー 1 0 a を、縦横に上記所定間隔 g, s で誘電体基板 1 2 の表面に複数本形成することにより第 1 ワイヤアレー 1 0 が構成されている。また、細長い矩形の長さ l の第 2 カットワイヤー 1 1 a を、その中心軸が一致するよう y 軸方向に g の間隔を空けると共に、互いに平行になるよう s の間隔を空けて x 軸方向に多数本並べて、第 1 カットワイヤー 1 0 a に重なるよう対称配置されて誘電体基板 1 2 の裏面に形成されている。この第 2 カットワイヤー 1 1 a を、縦横に上記所定間隔 g, s で誘電体基板 1 2 の裏面に複数本形成することにより第 2 ワイヤアレー 1 1 が構成されている。このように、第 1 カットワイヤー 1 0 a および第 2 カットワイヤー 1 1 a の長軸は y 軸方向にほぼ平行に配列されている。誘電体基板 1 2 は、例えばシクロオレフィンポリマーフィルムからなり、その比誘電率は約 2.34、 $\tan \delta$ は約 0.0016 の低損失とされる。誘電体基板 1 2 は、他の低損失の誘電体フィルムとしても良い。

【0015】

上記した構成の本発明にかかるシート型メタマテリアル 1 は、図 2 に示す単位セル 1 3 を縦横に所定間隔で多数配列した構造と等価となる。図 2 に示すように、第 1 カットワイヤー 1 0 a および第 2 カットワイヤー 1 1 a の幅は w 、長さは l とされる。また、単位セル 1 3 における矩形の誘電体基板 1 2 の横幅は、幅 w に間隔 s を加えた寸法とされ、その縦の長さは、長さ l に間隔 g を加えた寸法とされ、その厚さは d とされる。第 1 カットワイヤー 1 0 a および第 2 カットワイヤー 1 1 a は、誘電体基板 1 2 上に厚さ t で形成した金属膜を、エッチング加工すること等により形成されている。

【0016】

この単位セル 1 3 は $x - y$ 平面に配置され、その周囲が図 2 に示すように周期境界壁 1 4 で囲われており、 y 軸方向に偏波されたテラヘルツ波帯の入射波 I_n が入射される。入射波 I_n において反射された成分は反射波 R_e となり、透過した成分は透過波 T_r となる。入射波 I_n は、その電界成分 E が y 軸方向となり、その磁界成分 H が x 軸方向とされて、進行方向 k は z 軸方向となる。すると、鎖交する磁界により誘電体基板 1 2 の第 1 カットワイヤー 1 0 a と第 2 カットワイヤー 1 1 a との間に逆方向に電流が流れ磁性体粒子として働くようになる。特に、第 1 カットワイヤー 1 0 a と第 2 カットワイヤー 1 1 a の長さ l に基づく共振周波数の近傍では等価透磁率がほぼゼロを呈する周波数帯域が生じるようになる。また、 y 軸方向の電界 E により第 1 カットワイヤー 1 0 a と第 2 カットワイヤー 1 1 a 上で分極が起こり、誘電体粒子としても働くようになる。特に、第 1 カットワイ

10

20

30

40

50

ヤー 10 a と第 2 カットワイヤー 11 a の長さ l に基づく共振周波数の近傍では等価誘電率がほぼゼロを呈する周波数帯域が生じるようになる。

図 2 に示す単位セル 13 のように、誘電体基板 12 の表裏面の第 1 カットワイヤー 10 a と第 2 カットワイヤー 11 a とが重なっている構造においては、磁性を示す共振の周波数よりも誘電性を示す共振の周波数の方が高いことが知られている。しかしながら、本発明にかかるシート型メタマテリアル 1 では、後述するように磁性の共振周波数が上がり、誘電性の共振周波数とほぼ同じ共振周波数とすることができる。これは、誘電体基板 12 を介して互いに対面する第 1 カットワイヤー 10 a と第 2 カットワイヤー 11 a との間の容量が増えるため、誘電性の共振周波数が下がることも原因の一つと考えられる。第 1 カットワイヤー 10 a および第 2 カットワイヤー 11 a を形成する金属材料としては、金、銀、銅、アルミニウム等の良好な導電率を示す金属が用いられる。

10

【0017】

設計周波数を 0.51 THz とした時の単位セル 13 の寸法の一例を図 3 に示す。図 3 に示す寸法の例では、単位セル 13 は、第 1 カットワイヤー 10 a および第 2 カットワイヤー 11 a の長さ l が約 $202.2 \mu\text{m}$ 、第 1 カットワイヤー 10 a および第 2 カットワイヤー 11 a の y 軸方向の間隔 g が約 $106 \mu\text{m}$ 、第 1 カットワイヤー 10 a および第 2 カットワイヤー 11 a の幅 w が約 $120.2 \mu\text{m}$ 、第 1 カットワイヤー 10 a および第 2 カットワイヤー 11 a の x 軸方向の間隔 s が約 $360.7 \mu\text{m}$ 、誘電体基板 12 の厚さ d が約 $50 \mu\text{m}$ 、第 1 カットワイヤー 10 a および第 2 カットワイヤー 11 a の厚さ t が約 $0.5 \mu\text{m}$ とされている。なお、本発明にかかるシート型メタマテリアル 1 においては、誘電体基板 12 の厚さ d を含む寸法が、実用の範囲の寸法とされている。この場合、フレキシブルなシクロオレフィンポリマーフィルムとされた誘電体基板 12 の比誘電率は約 2.34 、 \tan は約 0.0016 となっており、誘電体基板 12 における波長短縮率は約 0.654 となる。このため、設計周波数の 0.51 THz の周波数の 1 波長 () は約 $588.2 \mu\text{m}$ であるが、誘電体基板 12 上においては約 $384.7 \mu\text{m}$ に短縮され、第 1 カットワイヤー 10 a および第 2 カットワイヤー 11 a の長さ l は約 / 2 の共振する長さとなることが分かる。

20

【0018】

本発明にかかるシート型メタマテリアル 1 において、図 3 に示す寸法とした単位セル 13 の電気的特性の解析結果および実験結果を図 4 ないし図 9 に示す。図 4 ないし図 9 では、実験結果を黒丸で解析結果を実線で示している。なお、解析は高周波 3 次元電磁界シミュレータ HFSS により行い、解析においては第 1 カットワイヤー 10 a および第 2 カットワイヤー 11 a は完全導体で構成されているものとしている。図 3 に示す寸法とした単位セル 13 の解析では、 0.51 THz における実効屈折率 n_{eff} として $0.076 + j0.022$ のほぼゼロの屈折率が得られ、この周波数における透過電力として約 97.7% の良好な透過電力特性が得られている。また、反射波 R_e の反射電力は約 0.058% の僅かな反射電力となる。

30

【0019】

図 4 は、 $0.45 \text{ THz} \sim 0.55 \text{ THz}$ の周波数帯域における性能指数 FOM (Figure of Merit) および複素屈折率の周波数特性の解析結果および実験結果を示している。図 4 を参照すると、複素屈折率の実部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ の解析結果は 0.475 THz において約 -1.5 となり、周波数の上昇に伴い上昇し約 0.504 THz においてほぼゼロとなる。周波数の上昇に伴いさらに上昇して 0.55 THz において約 0.75 となる。複素屈折率の実部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ の実験結果はほぼ解析結果と同様となる。また、複素屈折率の虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ の解析結果は 0.45 THz において約 0.18 となり、周波数の上昇に伴い緩やかに下降し約 0.55 THz においてほぼゼロとなる。虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ の実験結果は 0.45 THz において約 1.25 となるが、約 0.457 THz において約 0.17 に下降し周波数が上昇するにつれ約 0.26 まで上昇するが、約 $0.475 \text{ THz} \sim 0.49 \text{ THz}$ までは解析結果とほぼ同様となる。 0.5 THz を超えると約 $0.21 \sim 0.25$ の間のほぼ一定の値となる。

40

50

【0020】

図4に示す性能指数FOMの解析結果は、0.45THzにおいて約32となり、周波数の上昇に伴い下降し約0.5THzにおいてゼロを横切り、約0.504THzにおいて最小の約0.5まで小さくなる。その後、周波数が上昇すると上昇して約0.506THzでゼロを横切ってさらに上昇し、0.55THzにおいて約90となる。FOMの実験結果は、約0.49THzまでは解析結果の上下の値を取るが、0.5THzを超えると約0.3から約2.5まで上昇する解析結果より小さな値となる。

設計周波数0.51THzにおいて、解析結果では、実効屈折率 n_{eff} が約 $0.076 + j0.022$ でFOMが約3.42得られており、実験結果では、実効屈折率 n_{eff} が約 $0.11 + j0.26$ でFOMが約0.42得られている。このように、図3に示す寸法とすることにより、設計周波数0.51THzにおいてほぼゼロの屈折率を呈するシート型メタマテリアル1とすることができる。

10

【0021】

図5は、0.45THz～0.55THzの周波数帯域における透過電力 T_r と反射電力 R_e の周波数特性の解析結果および実験結果を示している。図5を参照すると、透過電力の解析結果では0.45THzにおいて約75%となり、周波数の上昇に伴い下降して約0.46THzにおいて約60%まで低下するが、その後上昇し約0.506THzにおいて最大の約97.7%まで上昇する。その後、周波数が上昇すると緩やかに下降して0.55THzにおいてほぼ88%となる。実験結果では、約0.49THzまでは解析結果を超え約0.506THzにおいて最大の約99%の透過電力が得られており、0.5THzを超える周波数においては解析結果にほぼ一致しているが、高域においては低下しており、0.55THzにおいて約78%となる。

20

また、図5を参照すると、反射電力の解析結果では0.45THzにおいて約8%となり、周波数の上昇に伴い上昇して約0.46THzにおいて約31%まで上昇するが、その後下降し約0.506THzにおいて最小の約0%まで下降する。その後、周波数が上昇すると緩やかに上昇して0.55THzにおいて約13%となる。実験結果では、0.45THzにおいて約25%となり、周波数の上昇に伴い下降して約0.48THzにおいて約0%まで低下する。0.5THzを超えると緩やかに上昇して0.55THzにおいて約22%となる。

設計周波数0.51THzにおいて、解析結果では、約97.7%の透過電力と約6.7%の反射電力が得られており、実験結果では、約100.5%の透過電力と約0.058%の反射電力が得られている。このように、図3に示す寸法とすることにより、設計周波数0.51THzにおいてほぼゼロの屈折率を呈すると共に良好な透過電力特性のシート型メタマテリアル1とすることができる。

30

【0022】

図6は、単位セル13の0.45THz～0.55THzの周波数帯域における複素比インピーダンス Z_r の周波数特性の解析結果および実験結果を示している。図6を参照すると、複素比インピーダンス Z_r の実部 $Re(Z_r)$ の解析結果では、約0.45THzにおいて約0.51となり、周波数の上昇に伴い僅かに下降し約0.475THzにおいて約0.5となり約0.49THzまで維持される。0.5THzを超えると急激に上昇していき約0.505THzにおいて最大の約0.9となり、その後急激に下降して0.513THzにおいて約0.5になり0.55THzまで約0.5となる。実験結果では、約0.46THzにおいて約0.95となり、周波数の上昇に伴い僅かに下降し0.48THzにおいて約0.61となる。0.5THzを超えると約0.07から上昇して約0.531THzにおいて約0.39となり、0.55THzまで維持される。

40

また、図6を参照すると複素比インピーダンス Z_r の虚部 $Im(Z_r)$ の解析結果では、約0.45THzにおいて約-0.04となり、周波数の上昇に伴い僅かに上昇し約0.475THzにおいてほぼゼロとなり約0.49THzまで維持される。0.5THzを超えると急激に下降して約0.504THzにおいて約-0.28となり、その後急激に上昇して0.503THzにおいて約0.04となり、周波数の上昇に伴い僅かに下降し

50

0.513 THzにおいてほぼゼロとなっており、約0.55 THzまで維持される。虚部 $\text{Im}(Z_r)$ の実験結果では、約0.46 THzにおいて約0.36となり、周波数の上昇に伴い緩やかに下降し0.48 THzにおいて約0.17となる。0.5 THzを超えると約0.52から下降して約0.525 THzにおいて約0.24となり、0.55 THzでは約0.21となる。

設計周波数0.51 THzにおいて、解析結果では、 $0.58 + j0.055$ の比インピーダンス Z_r が得られており、実験結果では、 $0.072 + j0.51$ の比インピーダンス Z_r が得られている。

【0023】

図7は、単位セル13の0.45 THz ~ 0.55 THzの周波数帯域における比誘電率 ϵ_r の周波数特性の解析結果および実験結果を示している。図7を参照すると、比誘電率 ϵ_r の実部 $\text{Re}(\epsilon_r)$ の解析結果では、約0.47 THzにおいて約-4となり、周波数の上昇に伴い上昇していき約0.49 THzにおいて約-1.34となる。0.5 THzを超えても上昇していき約0.506 THzにおいてほぼゼロとなり、0.55 THzにおいて約1.46となる。実験結果では、約0.46 THzにおいて約-3.6となり、周波数の上昇に伴い上昇し0.48 THzにおいて約-1.47となる。0.5 THzを超えると約0.4から上昇して0.55 THzにおいて約1.7となる。この実験結果は解析結果にほぼ一致している。

また、図7を参照すると比誘電率 ϵ_r の虚部 $\text{Im}(\epsilon_r)$ の解析結果では、約0.45 THzにおいて約-0.3となり、周波数の上昇に伴い僅かに上昇し約0.46 THzにおいてほぼゼロとなり約0.55 THzまでほぼゼロが維持される。虚部 $\text{Im}(\epsilon_r)$ の実験結果では、0.46 THzにおいて約1.6となり、周波数の上昇に伴い下降し0.48 THzにおいて約0.1となる。0.5 THzを超えると約-0.15から若干下降して約0.55 THzにおいて約-0.25となる。

設計周波数0.51 THzにおいて、解析結果では、 $0.13 - j0.026$ の比誘電率 ϵ_r が得られており、実験結果では、 $0.53 - j0.141$ の比誘電率 ϵ_r が得られている。

【0024】

図8は、単位セル13の0.45 THz ~ 0.55 THzの周波数帯域における比透磁率 μ_r の周波数特性の解析結果および実験結果を示している。図8を参照すると、比透磁率 μ_r の実部 $\text{Re}(\mu_r)$ の解析結果では、0.45 THzにおいて約-3となり、周波数の上昇に伴い上昇していき約0.5 THzにおいてほぼゼロとなる。0.5 THzを超えると若干上昇していき0.55 THzにおいて約0.34となる。実験結果では、約0.46 THzにおいて約-4となり、周波数の上昇に伴い上昇し約0.5 THzにおいてほぼゼロとなる。0.5 THzを超えると若干上昇して0.55 THzにおいて約0.27となる。

また、図8を参照すると比透磁率 μ_r の虚部 $\text{Im}(\mu_r)$ の解析結果では、約0.45 THzにおいて約0.27となり、周波数の上昇に伴い僅かに下降し約0.49 THzにおいてほぼゼロとなり約0.55 THzまで維持される。虚部 $\text{Im}(\mu_r)$ の実験結果では、0.456 THzにおいて約-4となり、周波数の上昇に伴い上昇し0.48 THzにおいて約-0.1となる。0.5 THzを超えると約0.1から若干上昇して約0.55 THzにおいて約0.27となる。

設計周波数0.51 THzにおいて、解析結果では、 $0.043 + j0.017$ の比透磁率 μ_r が得られており、実験結果では、 $-0.13 + j0.075$ の比透磁率 μ_r が得られている。

屈折率 n は、 $\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}$ で表され、上記したように単位セル13の比誘電率 ϵ_r および比透磁率 μ_r が小数点以下の小さな値となることから、設計周波数0.51 THzにおいてシート型メタ材料1の屈折率がほぼゼロになることが分かる。

【0025】

本発明にかかるシート型メタ材料1において、図3に示す寸法とした単位セル1

10

20

30

40

50

3の電気的特性の解析結果を図9ないし図12に示す。なお、解析は高周波3次元電磁界シミュレータHFSSにより行い、解析においては第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aは完全導体で構成されているものとしている。

図9は、図3に示す寸法とした単位セル13において、第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aのy軸方向の間隔 g を $100\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ とし、第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aの長さ l を $190\mu\text{m} \sim 225\mu\text{m}$ の範囲とした時の 0.50THz の周波数における実効屈折率 n_{eff} の実部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ の等高線図である。図9を参照すると、長さ l を $190\mu\text{m}$ から約 $225\mu\text{m}$ まで長くしていくに従い屈折率が -1 から 0.5 まで上昇する傾向を示している。長さ l を約 $205\mu\text{m}$ 、間隔 g を約 $105\mu\text{m}$ とした時に、実効屈折率 n_{eff} の実部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ はほぼゼロに近い約 0.0008 のほぼゼロとみなせるごく小さな屈折率が得られる。

10

図10は、図3に示す寸法とした単位セル13において、第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aのy軸方向の間隔 g を $100\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ とし、第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aの長さ l を $190\mu\text{m} \sim 225\mu\text{m}$ の範囲とした時の 0.50THz の周波数における実効屈折率 n_{eff} の虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ の等高線図である。図10を参照すると、長さ l を $200\mu\text{m} \sim$ 約 $225\mu\text{m}$ の範囲において間隔 g を $100\mu\text{m}$ から $150\mu\text{m}$ まで長くしていくに従い実効屈折率 n_{eff} の虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ が約 0.1 から約 1 まで上昇する傾向を示している。長さ l を約 $205\mu\text{m}$ 、間隔 g を約 $105\mu\text{m}$ とした時に、実効屈折率 n_{eff} の虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ はほぼゼロに近い約 0.06 のごく小さな屈折率が得られる。

20

【0026】

図11は、図3に示す寸法とした単位セル13において、第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aのy軸方向の間隔 g を $100\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ とし、第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aの長さ l を $190\mu\text{m} \sim 225\mu\text{m}$ の範囲とした時の 0.50THz の周波数における透過電力の等高線図である。図11を参照すると、長さ l を $195\mu\text{m} \sim$ 約 $225\mu\text{m}$ の範囲において間隔 g を $150\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ まで短くしていくに従い約 93% 以上の透過電力が得られることがわかる。長さ l を約 $205\mu\text{m}$ 、間隔 g を約 $105\mu\text{m}$ とした時に、約 97.6% の良好な透過電力が得られる。

図12は、図3に示す寸法とした単位セル13において、第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aのy軸方向の間隔 g を $100\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ とし、第1カットワイヤー10aおよび第2カットワイヤー11aの長さ l を $190\mu\text{m} \sim 225\mu\text{m}$ の範囲とした時の 0.50THz の周波数における反射電力の等高線図である。図12を参照すると、間隔 g が約 $137\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ の範囲を除く長さ l の全範囲において約 1% 以下の良好な反射電力が得られることがわかる。長さ l を約 $205\mu\text{m}$ 、間隔 g を約 $105\mu\text{m}$ とした時に、約 0.08% の良好な反射電力が得られる。

30

図9～図12に示すように、図3に示す寸法とすることにより、周波数 0.50THz においてほぼゼロの屈折率を呈すると共に良好な透過電力特性のシート型メタマテリアル1とすることができる。

【0027】

40

次に、本発明にかかるシート型メタマテリアルを応用した本発明の実施例のシート型レンズ2の構成を示す斜視図を図13に、本発明のシート型レンズ2における寸法の一例を示す図表を図14に示す。

図13に示す本発明のシート型レンズ2は、 $x-y$ 平面に置かれた柔軟なフィルムからなる矩形の誘電体基板22に半径 r とされた円形を近似する多角形(以下、「ほぼ円形」という)とされたシート型メタマテリアル21が形成されて構成されている。このシート型メタマテリアル21は、ほぼ円形を同心の複数の領域に分割されて、中央部のほぼ円形の領域 R_1 、これを囲むほぼ円形のリング状の複数の領域 $R_2 \sim R_n$ までの n 領域に分割されている。この領域のピッチ(領域の半径方向の高さ)は一部拡大図で示すように p とされる。そして、中央の領域 R_1 に最も大きい正の屈折率が設定され、各領域 $R_1 \sim R_n$

50

の屈折率は中央から外側に向かって次第に小さくなるよう設定されて、中途の k 番目の領域 R_k ($1 < k < n$) の屈折率がゼロに設定される。 k 番目の領域 R_k の外側の領域 $R_{k+1} \sim R_n$ までの領域の屈折率は次第に小さくなる負の屈折率に設定される。このように、本発明にかかるシート型レンズ 2 は、分布屈折率のシート型レンズ 2 とされる。

【0028】

設計周波数を 1 THz 、焦点距離を 5.0 mm とした時の本発明にかかる分布屈折率のシート型レンズ 2 の寸法および屈折率の一例が図 14 に示されており、図 14 を参照するとシート型レンズ 2 の半径 r が約 2.41 mm 、各領域 $R_1 \sim R_n$ のピッチ p が約 $20 \mu\text{m}$ とされて領域数が 121 とされている。そして、中央の領域 R_1 の屈折率 n_1 が約 5.00 、81 番目の領域 R_{81} の屈折率 n_{81} がほぼ 0、最外側の領域 R_{121} の屈折率 n_{121} が約 -5.92 に設定されている。この場合は、領域数が 121 とされているが、本発明にかかるシート型レンズ 2 は、この領域数に限るものではない。

領域 R_1 はほぼ円形とされ領域 $R_2 \sim R_n$ はほぼ円形のリング状の形状とされており、各領域 $R_1 \sim R_n$ に単位セルが領域の円周方向および半径方向に多数並べられて形成されており、単位セルの屈折率はその領域に必要な屈折率に設定されている。この場合、単位セルは領域の接線方向および半径方向に所定間隔で並んで互いに平行になるよう形成されている。領域内に形成される単位セルの構造は、屈折率が正ないしゼロの領域 $R_1 \sim R_k$ と、屈折率が負の領域 $R_{k+1} \sim R_n$ とで異なっており、屈折率が正ないしゼロの領域 $R_1 \sim R_k$ に形成される単位セルの構造は図 2 に示す単位セル 13 の構成とされ、屈折率が負の領域 $R_{k+1} \sim R_n$ に形成される単位セルの構造は図 15、図 16 (a) に示す単位セル 33 の構成とされる。

【0029】

領域 $R_1 \sim R_k$ に形成される単位セル 13 においては、使用周波数を $0.3 \text{ THz} \sim 0.5 \text{ THz}$ とした時に、第 1 カットワイヤー 10a および第 2 カットワイヤー 11a の幅 w を約 $46 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ 、間隔 s を約 $160 \mu\text{m} \sim 162 \mu\text{m}$ 、厚さ d を約 $50 \mu\text{m}$ 、長さ l を使用周波数においてほぼ共振する長さとする、5 以上の屈折率を得ることができる。この時、誘電体基板 22 の厚さ d を約 $23 \mu\text{m}$ とし他の寸法はそのままとすると、約 8 以上の屈折率を得ることができ、厚さ d を薄くすることにより高い屈折率を得ることができる。また、使用周波数を $0.6 \text{ THz} \sim 0.9 \text{ THz}$ とした時に、第 1 カットワイヤー 10a および第 2 カットワイヤー 11a の幅 w を約 $46 \mu\text{m}$ 、間隔 s を約 $162 \mu\text{m}$ 、厚さ d を約 $50 \mu\text{m}$ 、長さ l を使用周波数においてほぼ共振する長さとして、3 以上の屈折率を得ることができる。この時、厚さ d を約 $23 \mu\text{m}$ とし他の寸法をそのままとすると、約 6 以上の屈折率を得ることができ、厚さ d を薄くすることにより高い屈折率を得ることができる。

さらに、領域 $R_1 \sim R_k$ の単位セル 13 において、第 1 カットワイヤー 10a および第 2 カットワイヤー 11a の長さ l を約 $205 \pm 10 \mu\text{m}$ 、幅 w を約 $120 \mu\text{m}$ 、間隔 g を $100 \sim 150 \mu\text{m}$ 、間隔 s を約 $360 \mu\text{m}$ とすることにより、ほぼゼロの屈折率を得ることができる。

このように、領域 $R_1 \sim R_k$ に形成される単位セル 13 においては、第 1 カットワイヤー 10a および第 2 カットワイヤー 11a の長さ l 、幅 w の寸法および間隔 g 、 s の寸法を設計周波数および得ようとする屈折率に応じて調整することにより、その領域に必要な屈折率、例えば $0 \sim 5.00$ の屈折率を得ることができる。

【0030】

図 15、図 16 (a) に示す単位セル 33 の構成は、屈折率が負に設定される領域 $R_{k+1} \sim R_n$ に形成される単位セルの構造とされる。

これらの図に示す単位セル 33 は、 $x-y$ 平面に置かれた誘電体基板 22 の表面に細長い矩形の第 1 カットワイヤー 31 が y 方向に形成され、裏面に細長い矩形の第 2 カットワイヤー 32 が、第 1 カットワイヤー 31 に y 軸方向に約 $1/2$ だけずらせて重なるよう非対称配置されて形成されている。この場合、第 1 カットワイヤー 31 および第 2 カットワイヤー 32 は y 軸 (長軸) 方向に間隔 g を空けると共に、互いに平行になるよう x 軸 (短

軸)方向に間隔 s を空けて形成されている。これにより、単位セル 33 が領域 $R(k+1) \sim R_n$ の円周方向および半径方向に多数並べられて平行に形成された際に、第1カットワイヤー 31 の長軸方向の間隔が g とされると共に、短軸方向の間隔が s とされる。誘電体基板 22 は、例えばシクロオレフィンポリマーフィルムとされ、その比誘電率は約 2.34、 $\tan \delta$ は約 0.0016 の低損失とされる。誘電体基板 22 は、他の低損失の誘電体フィルムとしても良い。第1カットワイヤー 31 および第2カットワイヤー 32 は、誘電体基板 22 上に厚さ t で形成した金属膜をエッチング加工したり、金属インクを印刷等することにより形成されている。

【0031】

この単位セル 33 を $x-y$ 平面に配置して、その周囲が図 15 に示すように周期境界壁 35 で囲われており、 y 方向に偏波されたテラヘルツ波帯の入射波 I_n が入射される。入射波 I_n は、その電界成分 E が y 方向となり、その磁界成分 H が x 方向となって、進行方向 k は z 方向となる。すると、鎖交する磁界により誘電体基板 22 の第1カットワイヤー 31 と第2カットワイヤー 32 との間に逆方向に電流が流れ磁性体粒子として働くようになる。特に、第1カットワイヤー 31 と第2カットワイヤー 32 の長さ l に基づく共振周波数以上では等価透磁率が負を呈する周波数帯域が生じるようになる。また、 y 方向の電界 E により第1カットワイヤー 31 と第2カットワイヤー 32 上で分極が起こり、誘電体粒子としても働くようになる。特に、第1カットワイヤー 31 と第2カットワイヤー 32 の長さ l に基づく共振周波数以上では等価誘電率が負を呈する周波数帯域が生じるようになる。この場合、図 15 に示す単位セル 33 では、第1カットワイヤー 31 と第2カットワイヤー 32 とが長さ l の約 $1/2$ だけずらされて重なりが短くされていることから、磁性の共振周波数が上がるようになる。また、上下方向に配置された第1カットワイヤー 31 と第2カットワイヤー 32 間の容量だけでなく、誘電体基板 12 を介して互いに対面する第1カットワイヤー 31 と第2カットワイヤー 32 との間の容量が増えるため、誘電性の共振周波数が下がるようになる。これによって、誘電性の共振周波数よりも磁性の共振周波数が高くなり、誘電率が負となる帯域内で磁性の共振が起こるようになる。このため、単位セル 33 においては、誘電率および透磁率が共に負となる所定範囲の周波数領域が得られ、この周波数領域において負の屈折率を得ることができるようになる。第1カットワイヤー 31 および第2カットワイヤー 32 を形成する金属材料としては、金、銀、銅、アルミニウム等を用いることができる。

【0032】

領域 $R(k+1) \sim R_n$ の単位セル 33 においては、誘電体基板 22 の厚さ d が約 $50 \mu\text{m}$ 、間隔 s が約 $178 \mu\text{m}$ 、間隔 g が約 $10 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 、第1カットワイヤー 31 と第2カットワイヤー 32 の長さ l が約 $90 \mu\text{m} \sim 360 \mu\text{m}$ 、幅 w が約 $32 \mu\text{m}$ とされて、約 $0.3 \text{ THz} \sim 0.9 \text{ THz}$ において負の屈折率を得ることができる。

このように、領域 $R(k+1) \sim R_n$ の単位セル 33 においては、第1カットワイヤー 31 および第2カットワイヤー 32 の長さ l 、幅 w の寸法および間隔 g 、 s の寸法を設計周波数および得ようとする屈折率に応じて調整することにより、その領域に必要な屈折率、例えば $0 \sim -5.92$ の負の屈折率を得ることができる。なお、単位セル 13 においては、第1カットワイヤー 10a および第2カットワイヤー 11a 長さ l を約 $195 \mu\text{m} \sim 205 \mu\text{m}$ 、間隔 g を約 $100 \mu\text{m} \sim 120 \mu\text{m}$ とすることにより $0 \sim -0.6$ 程度の負の屈折率を得ることができることから、領域領域 $R(k+1)$ から所定数の領域においては、単位セル 13 を用いるようにしても良い。

【0033】

図 14 に示す寸法、領域数、屈折率とし、本発明にかかるシート型レンズ 2 に周波数が 1 THz のテラヘルツ波を入射した時の、E面 (E-plane) および H面 (H-plane) における電界強度の分布を図 17 (a) (b) に示す。

図 17 (a) の E面 (E-plane) の電界強度の分布を参照すると、シート型レンズ 2 (lens) からの光軸 (z 軸) 上の位置 (Position) が横軸とされ、シート型レンズ 2 からの位置が約 4.54 mm 付近の E面の位置の電界強度が最大とされていることが分かる。ま

た、図17(b)のH面(H-plane)の電界強度の分布を参照すると、シート型レンズ2 (lens)からの光軸上の位置(Position)が横軸とされ、シート型レンズ2からの位置が約4.54mmのH面の位置の電界強度が最大とされていることが分かる。

【0034】

図14に示す寸法、領域数、屈折率とし、本発明にかかるシート型レンズ2に周波数が1THzのテラヘルツ波を入射した時の、本発明のシート型レンズ2の光軸(z-axis)上の電界強度を図18に示す。

図18を参照すると、シート型レンズ2(lens)からの光軸(z-axis)上の距離が横軸とされ、縦軸が電界強度とされている。シート型レンズ2からの距離が約2.6mmを超えると電界強度が急激に上昇し、約4.5mmの位置で電界強度が最大(約11[V/m])となる。距離が約4.5mmを超えると、距離に応じて電界強度が低下していくことが分かる。距離が10mmの位置では約0.9[V/m]の電界強度となる。

10

【0035】

図14に示す寸法、領域数、屈折率とし、本発明にかかるシート型レンズ2に周波数が1THzのテラヘルツ波を入射した時の、本発明のシート型レンズ2の光軸(z軸)を中心とする面における電界強度の分布を図19に、本発明のシート型レンズ2の光軸を中心とする面における中心からの距離に対する電界強度を図20に示す。

図19にはシート型レンズ2(lens)からの光軸(z軸)上の位置が4.54mmとされた位置において光軸を中心とする面における電界強度の分布が示されており、図19を参照すると、縦軸の垂直位置が中心位置である0mmの位置、横軸の水平位置が中心位置である0mmの位置の電界強度が最大とされていることが分かる。

20

また、図20には、シート型レンズ2(lens)からの光軸(z軸)上の位置が4.54mmとされた位置において光軸を中心とする面におけるE面(E-plane)およびH面(H-plane)の電界強度の分布が示されている。図20を参照すると、実線で示すE面(E-plane)の電界強度は、位置(Position)が中心位置である0mmの位置に置いて最大(約11[V/m])となり、0mmの位置から離れるにつれて電界強度は急激に低下していき、約±0.6mmの位置で約1.4[V/m]まで低下し、約±0.8mmを超える位置で1[V/m]以下に低下する。また、破線で示すH面(H-plane)の電界強度は、位置(Position)が中心位置である0mmの位置に置いて最大(約11[V/m])となり、0mmの位置から離れるにつれて電界強度は急激に低下していき、約±0.6mmの位置で約0.9[V/m]の電界強度まで低下して上下に振動を繰り返し、約±0.8mmを超える位置で1[V/m]以下の電界強度に低下する。

30

以上説明した本発明のシート型レンズ2では、シート型レンズ2(lens)からの光軸(z軸)上の約4.54mmの位置が焦点となり、テラヘルツ波帯において良好に機能するレンズになることが分かる。

【産業上の利用可能性】

【0036】

以上説明した本発明のシート型メタマテリアルおよびシート型レンズでは、誘電体基板は低損失であれば良くシクロオレフィンポリマーフィルムに限られるものではない。誘電体基板の比誘電率が変わると、誘電体基板における波長短縮率が変わるため、第1カットワイヤーおよび第2カットワイヤーの長さlは波長短縮率に応じた長さとする。なお、誘電体基板としてシクロオレフィンポリマーフィルムを使用した場合は、比誘電率が約2.34であることから、その波長短縮率は約0.654となる。また、第1カットワイヤーおよび第2カットワイヤーを形成する金属材料は、金、銀、銅、アルミニウムに限られるものではないが、抵抗損の少ない金属材料が好適とされる。

40

本発明のシート型メタマテリアルは、所定長lの細長い金属製の第1カットワイヤーを、厚さdの誘電体基板の表面においてy軸方向に、間隔sを空けてy軸と直交するx軸方向に並べて配列し、第1カットワイヤーと同形状の第2カットワイヤーを、誘電体基板の裏面において、第1カットワイヤーに重なるように配列して対称配置されて構成されている。

50

また、本発明のシート型レンズは、一枚の薄い誘電体基板上にシート型メタマテリアルを形成することにより構成されており、シート型メタマテリアルは同心のほぼ円形とされた複数の領域に分割されて、中央部のほぼ円形の領域、これを囲むほぼ円形のリング状の複数の領域から構成されている。そして、中央部の領域の屈折率は正の大きな屈折率とされ、外側の領域に向かって次第に屈折率が低くされ、中途の領域においては屈折率がほぼゼロとされる。さらに、屈折率がほぼゼロの領域の外側の領域の屈折率は、次第に小さくなる負の屈折率とされる。これにより、一枚の薄い誘電体基板で、テラヘルツ波帯において良好に機能する分布屈折率のシート型レンズとすることができる。また、本発明のシート型レンズにおいては、領域数を121として、81番目の領域の屈折率をゼロとしたが、これに限ることはなく領域数はレンズとして機能する任意の数とすることができ、また、屈折率ゼロの領域は中央の領域から最外側までの領域の中の任意の領域とすることができる。さらに、本発明のシート型レンズにおいては、誘電体基板を矩形として、誘電体基板に形成されるシート型メタマテリアルを円形としたが、誘電体基板を円形あるいは多角形としてもよく、シート型メタマテリアルも円形や矩形としてもよい。

10

【符号の説明】

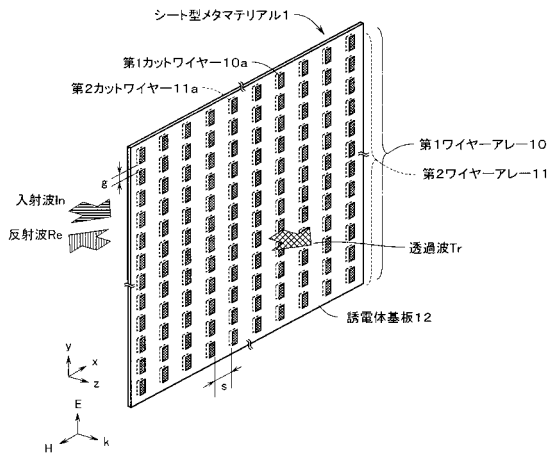
【0037】

- 1 シート型メタマテリアル
- 2 シート型レンズ
- 10 第1ワイヤーアレー
- 10a 第1カットワイヤー
- 11 第2ワイヤーアレー
- 11a 第2カットワイヤー
- 12 誘電体基板
- 13 単位セル
- 14 周期境界壁
- 21 シート型メタマテリアル
- 22 誘電体基板
- 31 第1カットワイヤー
- 32 第2カットワイヤー
- 33 単位セル
- 35 周期境界壁
- 100 メタマテリアル
- 110 金属
- 111 誘電体

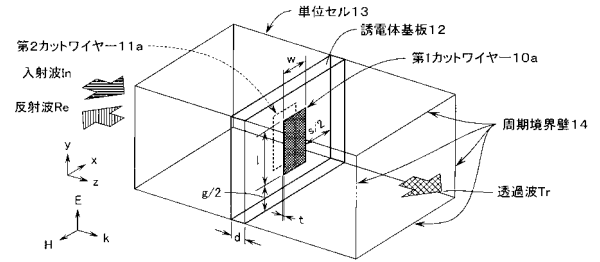
20

30

【 図 1 】



【 図 2 】

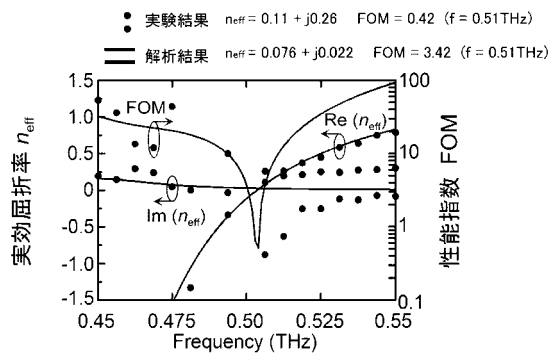


【 図 3 】

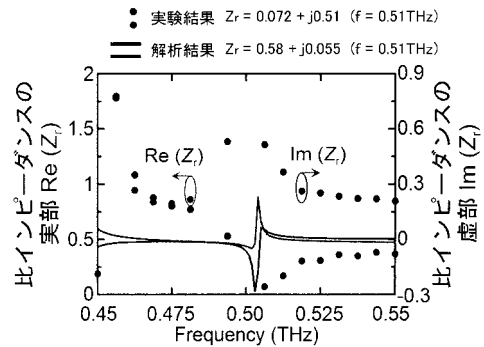
l	202.2 μm
g	106 μm
w	120.2 μm
s	360.7 μm
d	50 μm
t	0.5 μm

設計周波数 0.51THz
 Cyclo-olefin polymer
 $\epsilon_r = 2.34, \tan \delta = 0.0016$

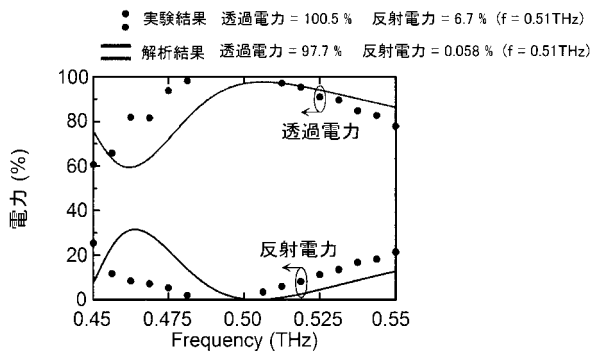
【 図 4 】



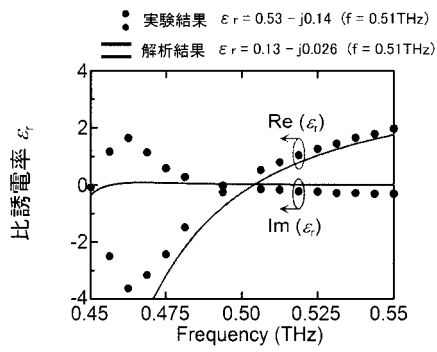
【 図 6 】



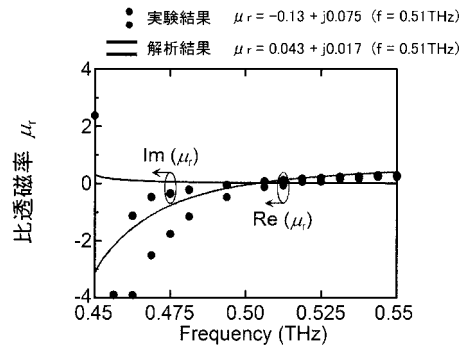
【 図 5 】



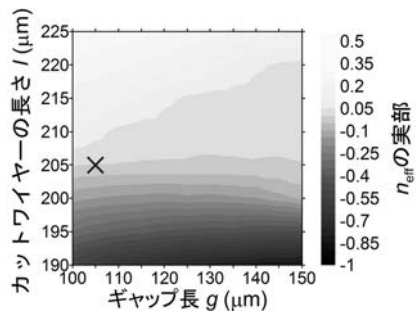
【 図 7 】



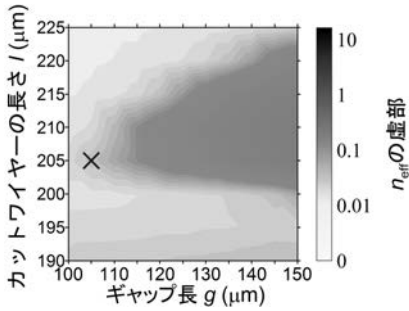
【 図 8 】



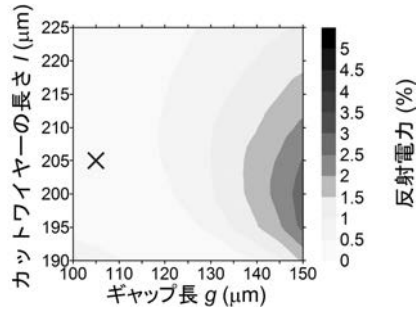
【 図 9 】



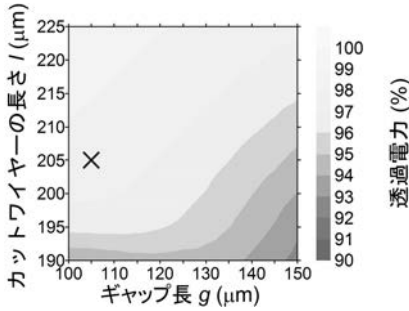
【 図 1 0 】



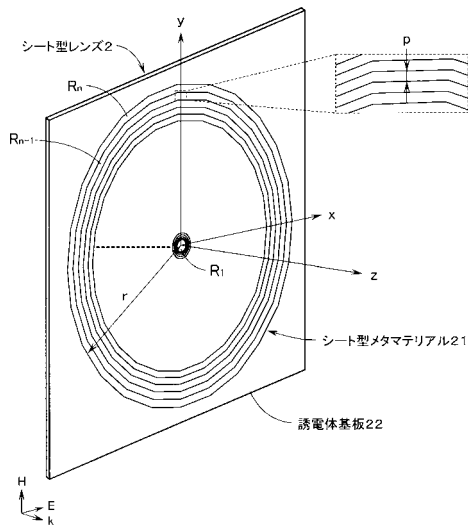
【 図 1 2 】



【 図 1 1 】



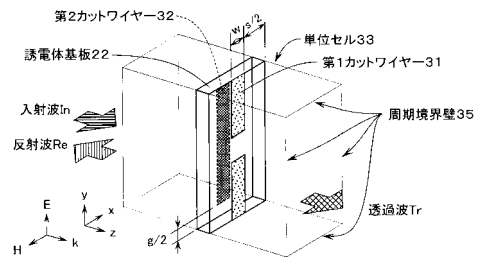
【 図 1 3 】



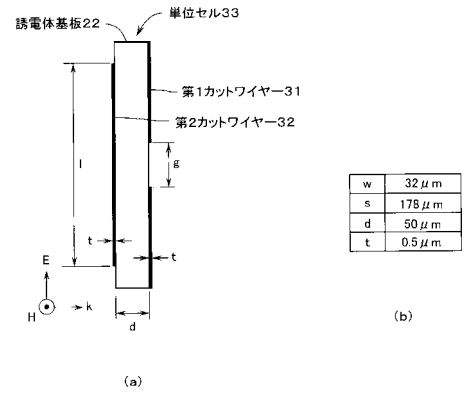
【 図 1 4 】

r	2.41 mm
p	20 μm
n_1	5.00
n_{81}	0
n_{121}	-5.92

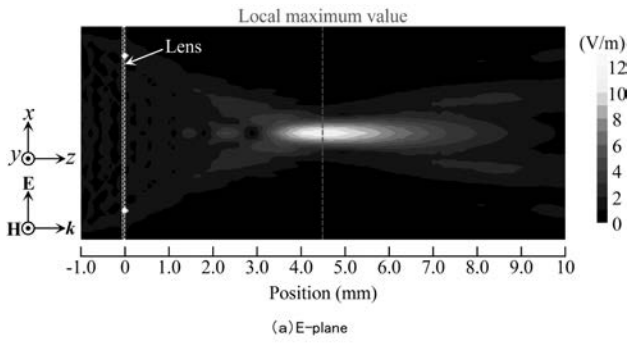
【 図 1 5 】



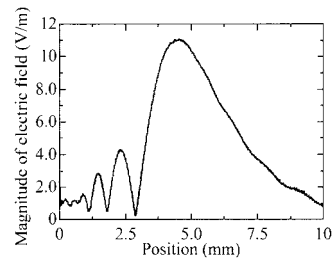
【 図 1 6 】



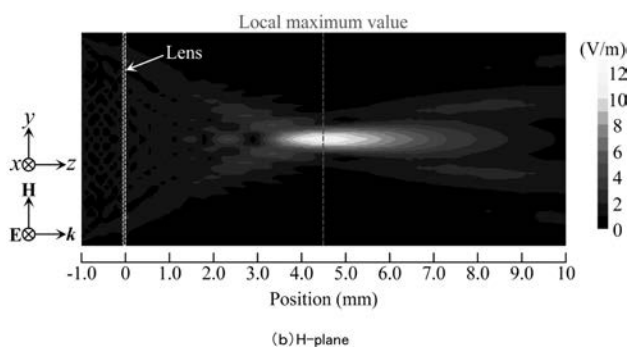
【 図 1 7 】



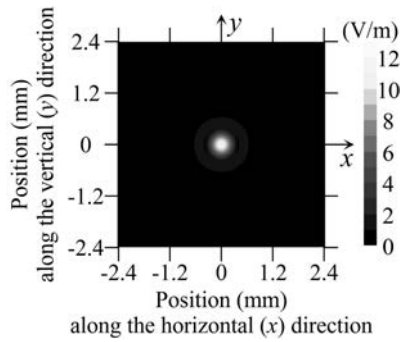
【 図 1 8 】



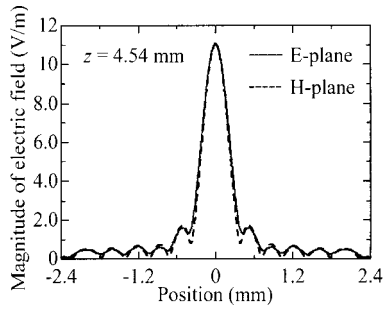
【 図 1 9 】



【 図 1 9 】



【 図 2 0 】



【 図 2 1 】

