

(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2016-51911  
(P2016-51911A)

(43) 公開日 平成28年4月11日(2016.4.11)

(51) Int.Cl.		F I		テーマコード (参考)
HO1Q 15/02 (2006.01)		HO1Q 15/02		5J011
HO1P 1/00 (2006.01)		HO1P 1/00	Z	5J020
GO2B 1/00 (2006.01)		GO2B 1/00		

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 28 頁)

(21) 出願番号 特願2014-174289 (P2014-174289)  
(22) 出願日 平成26年8月28日 (2014. 8. 28)

(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) 5J011 CA04  
5J020 BB05

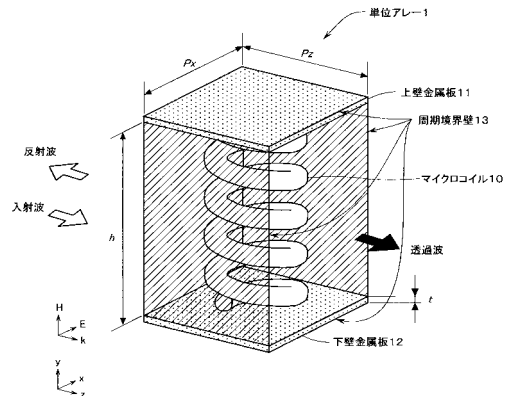
(54) 【発明の名称】 金属スリットアレー

(57) 【要約】

【課題】 マイクロコイルを平行平板内に装荷した金属スリットアレーによりメタマテリアルを実現する。

【解決手段】 金属製の矩形状とされた上壁金属板11および下壁金属板12が対向配置されて平行平板を構成している。上壁金属板11と下壁金属板12の間には1つの金属製のマイクロコイル10が配置されて単位アレー1が構成されている。この単位アレー1を、平面内に所定間隔で配置することにより金属スリットアレーを構成する。金属スリットアレーでは、平行平板による誘電率が負の誘電率を呈するテラヘルツ波帯の周波数において、マイクロコイル10による透磁率が負となることから、金属スリットアレーがメタマテリアルとして機能するようになる。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

金属製の平板状とされた上壁と、該上壁に所定間隔を持って対面するよう配置された金属製の平板状とされた下壁とからなる平行平板と、該平行平板内に装荷されたマイクロコイルとからなる単位アレーを備え、

該単位アレーが、同じ平面内に所定間隔で複数配置されて金属スリットアレーが構成されており、

前記平行平板による誘電率が負の誘電率を呈するテラヘルツ波帯の周波数において、前記マイクロコイルによる透磁率が負となることを特徴とする金属スリットアレー。

## 【請求項 2】

前記テラヘルツ波帯の周波数の波長を  $\lambda$  としたときに、前記上壁と前記下壁の一辺の長さが約  $0.06\lambda \sim 0.07\lambda$  とされていることを特徴とする請求項 1 記載の金属スリットアレー。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

この発明は、マイクロコイルを平行平板内に装荷したメタマテリアルとして機能する金属スリットアレーに関する。

## 【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電磁波用のレンズに適用することができる。テラヘルツ電磁波は、周波数が  $0.1 \sim 10 \text{ THz}$ （波長が  $30 \mu\text{m} \sim 3000 \mu\text{m}$ ）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、テラヘルツ電磁波は、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ー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。テラヘルツ電磁波の発生は、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 100 Gbps 級の超高速無線通信を可能とすることができる。

## 【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、 $1.4 \text{ THz}$  で分解能  $400 \text{ nm}$ （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  $0.3 \text{ THz}$  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  $n = -1$  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。

このようなメタマテリアルの一例としては、カットを持つ大小二つのリングを組合せた負の透磁率を示す分割リング共振器と、負の誘電率を示す金属ワイヤーとからなる単位セルをマトリクス状に並べたメタマテリアルが知られている（特許文献 1 参照）。この場合、大小二つのリングのカットの位置は、例えば逆の位置とされるがこれに限られるもので

10

20

30

40

50

はない。この単位セルを、勾配屈折率を有するように1つの軸に沿って配置するようにして負の屈折を実現することができる。

ところで、金属板を所定間隔離隔して平行に配置した金属平行平板においては、カットオフ周波数以下の周波数において負の誘電率を示すことが知られている。また、誘電体共振器は共振周波数の近傍において負の透磁率を示すことが知られている。そこで、非特許文献1に示すように、金属平行平板内に円板状の誘電体共振器を装荷して、金属平行平板により負の誘電率を、誘電体共振器により負の透磁率を実現する。これにより、円板状の誘電体共振器を装荷した金属平行平板では、所定の周波数において負の屈折が実現され、TEモードの電磁波が伝播するようになる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2011-254482号公報

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 55, N O. 6, JUNE 2007 P.1280-1287 Tetsuya Ueda他2名著 「Demonstration of Negative Refraction in a Cutoff Parallel-Plate Waveguide Loaded With 2-D Square Lattice of Dielectric Resonators」

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

誘電体共振器が共振周波数において負の透磁率を示すように、分割リング共振器も共振周波数の近傍において負の透磁率を示す。そして、分割リング共振器と金属ワイヤーとからなる単位セルによりメタマテリアルを実現することは行われていた。また、金属平行平板と誘電体共振器とを組み合わせることは行われていた。

本発明は、従来は実現されていなかったマイクロコイルを平行平板内に装荷した金属スリットアレーによりメタマテリアルを実現することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0008】

上記目的を達成するために、請求項1にかかる発明は、金属製の平板状とされた上壁と、該上壁に所定間隔を持って対面するよう配置された金属製の平板状とされた下壁とからなる平行平板と、該平行平板内に装荷されたマイクロコイルとからなる単位アレーを備え、該単位アレーが、同じ平面内に所定間隔で複数配置されて金属スリットアレーが構成されており、前記平行平板による誘電率が負の誘電率を呈するテラヘルツ波帯の周波数において、前記マイクロコイルによる透磁率が負となることを最も主要な特徴としている。

また、請求項2にかかる発明は、請求項1にかかる発明において、前記周波数の波長をとしたときに、前記上壁と前記下壁の一辺の長さが約0.06 ~ 約0.07 とされていることを主要な特徴としている。

【発明の効果】

【0009】

請求項1, 2にかかる発明によれば、金属製の平板状とされた上壁と、該上壁に所定間隔を持って対面するよう配置された金属製の平板状とされた下壁とからなる平行平板と、該平行平板内に装荷されたマイクロコイルとから単位アレーが構成され、該単位アレーが、同じ平面内に所定間隔で複数配置されて金属スリットアレーが構成される。そして、平行平板による誘電率が負の誘電率を呈するテラヘルツ波帯の周波数において、マイクロコイルによる透磁率が負となることから、金属スリットアレーがメタマテリアルとして機能するようになる。

これにより、本発明にかかる金属スリットアレーは、負の屈折率を実現することができる。

10

20

30

40

50

## 【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】本発明の金属スリットアレーを構成する本発明の第1実施例の単位アレーの構成を示す斜視図である。

【図2A】本発明の第1実施例の単位アレーを構成するマイクロコイルの構成を示す正面図である。

【図2B】本発明の第1実施例の単位アレーを構成するマイクロコイルの構成を示す側面図である。

【図3】本発明の第1実施例の単位アレーの解析パラメータの一例を示す図表である。

【図4】本発明の第1実施例の単位アレーの透過電力の周波数特性を示す図である。

10

【図5】本発明の第1実施例の単位アレーの屈折率の周波数特性を示す図である。

【図6】本発明の第1実施例の単位アレーの誘電率の周波数特性を示す図である。

【図7】本発明の第1実施例の単位アレーの透磁率の周波数特性を示す図である。

【図8】本発明の第1実施例の単位アレーの周波数に対する波数を示す図である。

【図9A】本発明の第1実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの構成を示す図である。

【図9B】本発明の第1実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーの構成を示す図である。

【図9C】本発明の第1実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの解析パラメータの一例を示す図表である。

20

【図10A】本発明の第1実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図10B】本発明の第1実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図10C】本発明の第1実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図10D】本発明の第1実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図10E】本発明の第1実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

30

【図10F】本発明の第1実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図11】本発明の第2実施例の単位アレーの解析パラメータの一例を示す図表である。

【図12】本発明の第2実施例の単位アレーの透過電力の周波数特性を示す図である。

【図13】本発明の第2実施例の単位アレーの屈折率の周波数特性を示す図である。

【図14】本発明の第2実施例の単位アレーの誘電率の周波数特性を示す図である。

【図15】本発明の第2実施例の単位アレーの透磁率の周波数特性を示す図である。

【図16】本発明の第2実施例の単位アレーの周波数に対する波数を示す図である。

【図17】本発明の第2実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの解析パラメータの一例を示す図表である。

40

【図18A】本発明の第2実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図18B】本発明の第2実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図18C】本発明の第2実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するプリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図19】本発明の第3実施例の単位アレーの解析パラメータの一例を示す図表である。

【図20】本発明の第3実施例の単位アレーの透過電力の周波数特性を示す図である。

【図21】本発明の第3実施例の単位アレーの屈折率の周波数特性を示す図である。

【図22】本発明の第3実施例の単位アレーの誘電率の周波数特性を示す図である。

50

【図 2 3】本発明の第 3 実施例の単位アレーの透磁率の周波数特性を示す図である。

【図 2 4】本発明の第 3 実施例の単位アレーの周波数に対する波数を示す図である。

【図 2 5】本発明の第 3 実施例の単位アレーの透過電力の周波数特性を拡大して示す図である。

【図 2 6】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの解析パラメータの一例を示す図表である。

【図 2 7 A】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図 2 7 B】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

10

【図 2 7 C】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図 2 7 D】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図 2 7 E】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図 2 7 F】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図 2 7 G】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

20

【図 2 7 H】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図 2 7 I】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【図 2 7 J】本発明の第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレーを利用するブリズムの周波数別の伝播特性を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

本発明の金属スリットアレーを構成する本発明の第 1 実施例の単位アレーの構成を示す斜視図を図 1 に、本発明の第 1 実施例の単位アレーを構成するマイクロコイルの構成を示す正面図を図 2 A に、側面図を図 2 B に示す。

30

これらの図に示す本発明の金属スリットアレーを構成する本発明の第 1 実施例の単位アレー 1 は、図示するように断面矩形の周期境界壁 1 3 の上壁の面に配置された金属製の矩形状とされた上壁金属板 1 1 と、下壁の面に配置された金属製の矩形状とされた下壁金属板 1 2 とからなる平行平板を備えている。上壁金属板 1 1 と下壁金属板 1 2 とは間隔（高さ） $h$  をもって互いに対面して平行平板を構成しており、この平行平板によりウェーブガイドが構成されている。上壁金属板 1 1 と下壁金属板 1 2 との間には 1 つの金属製のマイクロコイル 1 0 が配置されている。第 1 実施例の単位アレー 1 では、図 1 に示すように横軸が  $z$  軸とされ、 $z$  軸に直交すると共に上壁金属板 1 1 および下壁金属板 1 2 の幅方向の軸が  $x$  軸とされ、 $z$  軸に直交すると共に平行平板の高さ方向の軸が  $y$  軸とされている。この第 1 実施例の単位アレー 1 に入射する電磁波、例えば、テラヘルツ電磁波は、その電界成分  $E$  が  $x$  軸方向となり、その磁界成分  $H$  が  $y$  軸方向となつて、進行方向  $k$  は  $z$  軸方向とされている。

40

【0012】

本発明にかかる第 1 実施例の単位アレー 1 において、上壁金属板 1 1 と下壁金属板 1 2 は同じ大きさとされており、図 1 に示すように、その  $x$  軸方向である幅は  $P_x$ 、 $z$  軸方向の長さは  $P_z$ 、厚さは  $t$  とされており、平行平板の高さ（上壁金属板 1 1 と下壁金属板 1 2 との  $y$  軸方向の間隔）は  $h$  とされている。

単位アレー 1 において、上壁および下壁の  $xz$  面と、ハッチングで示した左壁および右壁の  $yz$  面とで構成されている導波路 1 本分に相当する構造とされている周期境界壁 1 3

50

を仮想し、1個分抜き出した単位アレー1の解析モデルで、金属スリットアレーを設計することができる。なお、単位アレー1における上壁金属板11と下壁金属板12からなる平行平板は、カットオフ周波数以下の周波数において負の誘電率を示すようになる。

【0013】

上壁金属板11と下壁金属板12との間に装荷されたスパイラル状のマイクロコイル10は、図2A、図2Bに示すように、直径が $r_3$ の金属細線を外径が $r_2$ （内径が $r_1$ ）になるようピッチ $p$ の間隔でスパイラル状に巻回して作成されている。マイクロコイル10の高さは、平行平板の高さ $h$ と同様の高さとされる。マイクロコイル10は、共振すると負の透磁率を示すようになる。そこで、第1実施例の単位アレー1を $y$ 軸方向および $x$ 軸方向に所定の周期で配置、すなわち、 $xy$ 面である平面内に周期的に単位アレー1を多数配列することにより所定のテラヘルツ波帯において負の屈折率を呈する金属スリットアレーを構成することができる。これにより、金属スリットアレーでテラヘルツ波帯に用いられる負の屈折率を呈するプリズムやレンズ等を構成することができる。

10

【0014】

本発明にかかる第1実施例の単位アレー1をテラヘルツ波帯に適用する場合の解析パラメータの一例を図3に示す。この場合の、負の屈折率が得られる目標とする周波数を $0.3\text{ THz}$ としている。図3に示す解析する際の解析パラメータでは、上壁金属板11および下壁金属板12の $P_x$ が約 $62\ \mu\text{m}$ 、 $P_z$ も約 $62\ \mu\text{m}$ とされ、平行平板の間隔（高さ） $h$ が約 $159.5\ \mu\text{m}$ とされる。この場合、平行平板からなるウェーブガイドの真空中のカットオフ周波数 $f_c$ は約 $0.97\text{ THz}$ となる。また、上壁金属板11および下壁金属板12の厚さ $t$ が約 $0.25\ \mu\text{m}$ とされる。さらに、スパイラル状のマイクロコイル10を構成する金属細線の直径 $r_3$ が約 $10\ \mu\text{m}$ 、金属細線を巻回する内径 $r_1$ が約 $30\ \mu\text{m}$ 、その外径 $r_2$ が約 $50\ \mu\text{m}$ とされる。

20

【0015】

このような解析パラメータとされた第1実施例の単位アレー1において、電界成分 $E$ が幅（ $x$ 軸）方向、磁界成分 $H$ が高さ（ $y$ 軸）方向とされて長さ（ $z$ 軸）方向に進行するTEモードの入射波が入力された際に、単位アレー1を $z$ 軸方向に伝播して出力される透過波の透過係数 $S_{21}$ と、反射する反射波の反射係数 $S_{11}$ との周波数特性を解析した。解析は有限要素法電磁界シミュレータANSYS社HFSS Ver.14.1.1を用いた。解析結果である図4の透過電力の周波数特性を参照すると、カットオフ周波数 $f_c$ より低い約 $0.27\text{ THz}$ および約 $0.75\text{ THz}$ において、破線で示す透過係数 $S_{21}$ が約80%以上となって単位アレー1をTEモードの入射波がほぼ透過するようになるが、上記の周波数を中心とする所定範囲を除く $0.1\text{ THz} \sim 1\text{ THz}$ における $0.75\text{ THz}$ 未満では、実線で示す反射係数 $S_{11}$ がほぼ100%となってほぼ全てが反射する。また、 $0.75\text{ THz}$ を超える $1.0\text{ THz}$ までの周波数では透過係数 $S_{21}$ が約5%～約20%となる。

30

【0016】

また、上記解析パラメータとされた際の単位アレー1の屈折率 $n$ の周波数特性の解析結果を図5に示す。図5を参照すると、実線で示す屈折率 $n$ の実部（ $\text{Re}(n)$ ）は、 $0.2\text{ THz} \sim 0.25\text{ THz}$ においてはほぼ0となり、約 $0.25\text{ THz}$ で急激に上昇し約 $0.25\text{ THz} \sim 0.27\text{ THz}$ の範囲で約 $+1.0 \sim +1.1$ の正となる。そして、約 $0.27\text{ THz}$ において急激に下降して $-1.1$ の負となり、約 $0.27\text{ THz}$ を超えると0に近づいていき、約 $0.3\text{ THz}$ において0となる。約 $0.3\text{ THz} \sim 0.35\text{ THz}$ においてはほぼ0となる。

40

破線で示す屈折率 $n$ の虚部（ $\text{Im}(n)$ ）は $0.2\text{ THz}$ において約 $+1.0$ の正となり、約 $0.25\text{ THz}$ において急激に上昇して約 $+2.5$ の正となる。約 $0.25\text{ THz}$ を超えると急激に下降して約 $0.27\text{ THz}$ において0となる。そして、約 $0.27\text{ THz} \sim 0.3\text{ THz}$ までは0となり、約 $0.3\text{ THz}$ を超えると $0 \sim +3$ の正となる。

すなわち、単位アレー1は、約 $0.27\text{ THz} \sim 0.3\text{ THz}$ までの周波数範囲において負の屈折率 $n$ となることわかる。

【0017】

50

上記解析パラメータとされた際の単位アレー 1 の比誘電率  $\epsilon$  の周波数特性の解析結果を図 6 に示す。図 6 を参照すると、実線で示す比誘電率  $\epsilon$  の実部 ( $\text{Re}(\epsilon)$ ) は約 0.2 THz において約 -290 の負となり周波数が上がるに従い次第に上昇するが約 0.25 THz で約 -400 の負に急激に下降する。そして、約 0.25 THz を超えると急激に上昇し約 0.27 THz において 0 となる。約 0.27 THz を超えると約 -80 の負まで下降し、その負の値が約 0.35 THz までほぼ維持される。

破線で示す比誘電率  $\epsilon$  の虚部 ( $\text{Im}(\epsilon)$ ) は 0.2 THz ~ 0.25 THz までは 0 となり、約 0.25 THz において急激に上昇して約 +200 の正となる。約 0.25 THz を超えると急激に下降して約 0.27 THz において 0 となる。そして、約 0.27 THz ~ 約 0.35 THz までは 0 となる。

すなわち、単位アレー 1 は、約 0.27 THz ~ 約 0.3 THz までの周波数範囲において負の比誘電率  $\epsilon$  となることがわかる。

#### 【0018】

上記解析パラメータとされた際の単位アレー 1 の比透磁率  $\mu$  の周波数特性の解析結果を図 7 に示す。図 7 を参照すると、実線で示す比透磁率  $\mu$  の実部 ( $\text{Re}(\mu)$ ) は約 0.2 THz ~ 約 0.27 THz までは 0 ~ 約 +1 の正となるが、約 0.27 THz を超えると急激に下降し約 -23 の負となる。そして、約 0.27 THz を超えると急激に上昇して 0 となり、その 0 の値が約 0.35 THz までほぼ維持される。

破線で示す比透磁率  $\mu$  の虚部 ( $\text{Im}(\mu)$ ) は 0.2 THz ~ 0.25 THz までは 0 となり、約 0.25 THz において若干下降して約 -1 の負となる。約 0.25 THz を超えると緩慢に下降するが、約 0.27 THz において急激に下降して約 -12 の負となる。そして、約 0.27 THz を超えると急激に上昇して 0 となり、その 0 の値が約 0.35 THz までほぼ維持される。

すなわち、単位アレー 1 は、約 0.27 THz において負の比透磁率  $\mu$  となることがわかる。

#### 【0019】

上記解析パラメータとされた際の単位アレー 1 の周波数に対する波数の解析結果を図 8 に示す。図 8 を参照すると、波数は 0.2 THz ~ 0.25 THz までは 0 となり、約 0.25 THz を超えると急激に上昇して波数は約 62 となり、この波数の値が約 0.27 THz まで維持される。約 0.27 THz を超えると波数は急激に下降し約 0.3 THz において 0 となる。

すなわち、単位アレー 1 は、約 0.25 THz ~ 約 0.27 THz において解像度を高めることができることがわかる。

#### 【0020】

次に、本発明にかかる第 1 実施例の単位アレー 1 を利用したプリズム 20 の構成を図 9 A に示し、このプリズム 20 の構成の概要を図 9 B に示し、このプリズム 20 の解析パラメータを図 9 C に示す。

プリズム 20 は図 9 A に示すように、ウェーブガイド 23 と、第 2 領域 22 と、金属スリットアレー 2 と、第 1 領域 21 とから構成されている。ウェーブガイド 23 と、第 2 領域 22 と、第 1 領域 21 とは、比誘電率  $\epsilon$  が約 20 の誘電体とされている。直方体状の第 2 領域 22 の一面にウェーブガイド 23 がインピーダンス整合されて接続され、ウェーブガイド 23 を介して第 2 領域 22 にテラヘルツ波帯の入射波が入射され、第 2 領域 22 内を伝播していく。第 2 領域 22 の入射する面と対向する面に金属スリットアレー 2 の一面が接続されて、第 2 領域 22 内を伝播した入射波が金属スリットアレー 2 に入射する。金属スリットアレー 2 は、図 9 B に示すように一面に対向する面が斜面とされており、一面の幅が  $a$ 、一面から斜面までの長い方の長さが  $b$ 、一面から斜面までの短い方の長さが  $d$  とされている。この場合、金属スリットアレー 2 の斜面における法線 21 a とのなす角である  $\theta$  が金属スリットアレー 2 への入射角となる。金属スリットアレー 2 は、図 9 B に示すように単位アレー 1 を行方向および列方向に所定間隔  $c$  で配列することにより構成されている。そして、配列する単位アレー 1 の行方向の数を下から上に向かって減らしてい

10

20

30

40

50

くことにより、一面に対向する面が斜面とされた金属スリットアレー 2 を構成している。

#### 【0021】

このプリズム 20 において負の屈折率が得られる目標とする周波数を  $0.3 \text{ THz}$  とした時の解析パラメータを図 9C に示す。図 9C に示す解析パラメータでは、入射角が  $45^\circ$ 、金属スリットアレー 2 の幅  $a$  が  $310 \mu\text{m}$ 、その一面から斜面までの長い方の長さ  $b$  が  $325 \mu\text{m}$ 、その短い方の長さ  $d$  が  $46 \mu\text{m}$ 、単位アレー 1 を行方向および列方向に配置する所定間隔  $c$  が  $62 \mu\text{m}$ 、第 2 領域 22 の長さが  $400 \mu\text{m}$  とされている。この解析パラメータでは、単位アレー 1 は行方向に最大 5 個配列できる寸法とされている。ここで、配列される単位アレー 1 の数について一例を述べると、図 1 に示す単位アレー 1 を図 1 に示す  $x$  軸方向へ 200 個程度配列すると共に、 $y$  軸方向に 50 個程度配列する。これにより、 $xy$  面の一平面上に配列された  $200 \times 50$  個の単位アレー 1 からなるアレー群が構成され、このアレー群を  $z$  軸方向に 10 群程度並べることにより金属スリットアレーを構成することが考えられる。このような構成の金属スリットアレーでは単位アレー 1 の数が多すぎて、解析する際の時間が膨大となってしまう。また、配列される単位アレー 1 の数は上記した数に限られるものではなく、大幅に少なくなることも大幅に増えることも考えられる。そこで、単位アレー 1 の数を解析時間が膨大にならない数となるように、解析パラメータを設定している。単位アレー 1 の数を減らして解析しても、解析結果は単位アレー 1 の数が多い場合とほぼ同様の解析結果が得られる。

10

#### 【0022】

この第 1 実施例の単位アレー 1 からなる金属スリットアレー 2 を利用するプリズム 20 におけるテラヘルツ波の伝播特性を、有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS Ver.14.1.1 を用い解析した。解析結果を図 10A ~ 図 10F に示す。なお、図 10A において入射するテラヘルツ波の周波数は  $275 \text{ GHz}$  とされ、図 10B において入射するテラヘルツ波の周波数は  $280 \text{ GHz}$  とされ、図 10C において入射するテラヘルツ波の周波数は  $285 \text{ GHz}$  とされ、図 10D において入射するテラヘルツ波の周波数は  $290 \text{ GHz}$  とされ、図 10E において入射するテラヘルツ波の周波数は  $300 \text{ GHz}$  とされ、図 10F において入射するテラヘルツ波の周波数は  $400 \text{ GHz}$  とされている。

20

図 10A ~ 図 10F において、入射角は  $45^\circ$  とされており、出射するテラヘルツ波の角度が法線 21a より時計回りの角度とされている場合は、図 9A に示すように正の屈折率になり、出射するテラヘルツ波の角度が法線 21a より反時計回りの角度とされている場合は、図 9A に示すように負の屈折率となる。図 10A ~ 図 10F を参照すると、図 10A ~ 図 10E の伝播特性では出射するテラヘルツ波の角度が法線 21a より反時計回りの角度とされていることから、 $275 \text{ GHz} \sim 300 \text{ GHz}$  の周波数帯において、プリズム 20 は負の屈折率を呈していることが分かる。また、図 10F に示す伝播特性では出射するテラヘルツ波の角度が法線 21a より反時計回りの角度とされておらず、 $400 \text{ GHz}$  においてはプリズム 20 は負の屈折率を呈していないことが分かる。

30

#### 【0023】

次に、本発明にかかる第 2 実施例の単位アレーについて説明する。第 2 実施例の単位アレーは、図 1 に示す第 1 実施例の単位アレー 1 の構成と同様とされており、第 1 実施例の単位アレー 1 と解析パラメータが異なるようにされている。ここでは、第 2 実施例の単位アレーの構成の説明は省略する。第 2 実施例の単位アレーをテラヘルツ波帯に適用する場合の解析パラメータの一例を図 11 に示す。この場合の、負の屈折率が得られる目標とする周波数を  $0.3 \text{ THz}$  としている。図 11 に示すように解析する際の解析パラメータは、上壁金属板 11 および下壁金属板 12 の  $P_x$  が約  $74 \mu\text{m}$ 、 $P_z$  が約  $60 \mu\text{m}$  とされ、平行平板の間隔（高さ） $h$  が約  $159.5 \mu\text{m}$  とされる。この場合、平行平板からなるウェーブガイドの真空中のカットオフ周波数  $f_c$  は約  $0.97 \text{ THz}$  となる。また、上壁金属板 11 および下壁金属板 12 の厚さ  $t$  が約  $0.25 \mu\text{m}$  とされる。さらに、スパイラル状のマイクロコイル 10 を構成する金属細線の直径  $r_3$  が約  $10 \mu\text{m}$ 、金属細線を巻回する内径  $r_1$  が約  $30 \mu\text{m}$ 、その外径  $r_2$  が約  $50 \mu\text{m}$  とされる。

40

#### 【0024】

50



このような解析パラメータとされた第2実施例の単位アレーにおいて、電界成分Eが幅(x軸)方向、磁界成分Hが高さ(y軸)方向とされて長さ(z軸)方向に進行するTEモードの入射波が入力された際に、第2実施例の単位アレーをz軸方向に伝播して出力される透過波の透過係数 $S_{21}$ と、反射する反射波の反射係数 $S_{11}$ との周波数特性を解析した。解析は有限要素法電磁界シミュレータANSYS社HFSS Ver.14.1.1を用いた。解析結果である図12の透過電力の周波数特性を参照すると、カットオフ周波数 $f_c$ より低い約0.255THzにおいて、破線で示す透過係数 $S_{21}$ がほぼ100%となって第2実施例の単位アレーをTEモードの入射波がほぼ透過するようになるが、上記の周波数を中心とする所定範囲を除く0.2THz~0.3THzにおいては、実線で示す反射係数 $S_{11}$ がほぼ100%となってほぼ全てが反射するようになる。

10

## 【0025】

また、上記解析パラメータとされた際の第2実施例の単位アレーの屈折率 $n$ の周波数特性の解析結果を図13に示す。図13を参照すると、実線で示す屈折率 $n$ の実部( $Re(n)$ )は、0.2THz~約0.237THzにおいてはほぼ0となる。そして、約0.237THzで急激に下降し約0.237THz~約0.263THzの範囲で約-0.004~-0.012の負となるが、この範囲における約0.259THz~約0.260THzの範囲で約+0.007の正となる。そして、約0.263THzにおいて急激に上昇して+0.04の正となり、約0.271THz~約0.3THzにおいて0となる。

破線で示す屈折率 $n$ の虚部( $Im(n)$ )は0.2THzにおいて約+0.01の正となり、約0.237THzにおいて急激に上昇して約+0.032の正となる。約0.237THzを超えると急激に下降して約0.252THzにおいて0となる。そして、約0.252THz~約0.272THzまでは0となり、約0.272THzを超えると0~+0.03の正となる。

20

すなわち、第2実施例の単位アレーは、約0.237THz~約0.259THzまでの周波数範囲、および、約0.260THz~約0.263THzまでの周波数範囲において負の屈折率 $n$ となることわかる。

## 【0026】

上記解析パラメータとされた際の第2実施例の単位アレーの比誘電率 $\epsilon$ の周波数特性の解析結果を図14に示す。図14を参照すると、実線で示す比誘電率 $\epsilon$ の実部( $Re(\epsilon)$ )は約0.2THzにおいて約-0.23の負となり周波数上がるに従い次第に上昇するが約0.238THzで約-0.5の負に急激に下降する。そして、約0.238THzを超えると急激に上昇し約0.253THzにおいて0となる。約0.253THzを超えると約-0.9の負まで下降し、その負の値が約0.3THzまでほぼ維持される。

30

破線で示す比誘電率 $\epsilon$ の虚部( $Im(\epsilon)$ )は0.2THz~0.238THzまでは0となり、約0.238THzにおいて急激に下降して約-0.18の負となる。約0.238THzを超えると急激に上昇して約0.253THzにおいて0となる。そして、約0.253THz~約0.3THzまでは0となる。

すなわち、第2実施例の単位アレーは、約0.253THzを除く約0.2THz~約0.3THzまでの周波数範囲において負の比誘電率 $\epsilon$ となることわかる。

40

## 【0027】

上記解析パラメータとされた際の第2実施例の単位アレーの比透磁率 $\mu$ の周波数特性の解析結果を図15に示す。図15を参照すると、実線で示す比透磁率 $\mu$ の実部( $Re(\mu)$ )は約0.2THz~約0.253THzまでは0~約+0.003の正となるが、約0.253THzを超えると急激に下降し約-0.018の負となる。そして、約0.253THzを超えると急激に上昇して0となり、その0の値が約0.3THzまでほぼ維持される。

破線で示す比透磁率 $\mu$ の虚部( $Im(\mu)$ )は0.2THz~0.237THzまでは0となり、約0.237THzにおいて若干上昇して約+0.001の正となる。約0.

50

237 THzを超えると緩慢に上昇するが、約0.254 THzにおいて急激に上昇して約+0.013の正となる。そして、約0.254 THzを超えると急激に下降して0となり、その0の値が約0.3 THzまでほぼ維持される。

すなわち、第2実施例の単位アレーは、約0.253 THzにおいて負の比透磁率 $\mu$ となることがわかる。

#### 【0028】

上記解析パラメータとされた際の第2実施例の単位アレーの周波数に対する波数の解析結果を図16に示す。図16を参照すると、波数は0.2 THz~0.24 THzまでは0となり、約0.24 THzを超えると急激に上昇して波数は約6.1となり、この波数の値が約0.257 THzまでは維持される。約0.257 THzを超えると波数は急激に

10

下降し約0.275 THzにおいて0となる。

すなわち、第2実施例の単位アレーは、約0.24 THz~約0.275 THzにおいて解像度を高めることができることがわかる。

#### 【0029】

次に、本発明にかかる第2実施例の単位アレーを利用したプリズム30は、第1実施例の単位アレー1に替えて第2実施例の単位アレーを用いた金属スリットアレー3を備える構成とされ、プリズム30の構成は図9Aに示すプリズム20と同様となり、金属スリットアレー3の構成は図9Bに示す金属スリットアレー2と同様となる。そこで、プリズム30および金属スリットアレー3の説明は省略する。

このプリズム30において負の屈折率が得られる目標とする周波数を0.3 THzとした時の解析パラメータを図17に示す。図17に示す解析パラメータでは、入射角が39°、金属スリットアレー2の幅aが370 $\mu$ m、その一面から斜面までの長い方の長さbが320.7 $\mu$ m、その短い方の長さdが45 $\mu$ m、第2実施例の単位アレーを行方向および列方向に配置する所定間隔cが62 $\mu$ m、第2領域22の長さsが400 $\mu$ mとされている。この解析パラメータにおいて、第2実施例の単位アレーが行方向に最大5個配列できる寸法とされている理由は、上述した通りである。

20

#### 【0030】

この第2実施例の単位アレーからなる金属スリットアレー3を利用するプリズム30におけるテラヘルツ波の伝播特性を、有限要素法電磁界シミュレータANSYS社HFSS Ver.14.1.1を用い解析した。解析結果を図18A~図18Cに示す。なお、図18Aにおいて入射するテラヘルツ波の周波数は270 GHzとされ、図18Bにおいて入射するテラヘルツ波の周波数は275 GHzとされ、図18Cにおいて入射するテラヘルツ波の周波数は280 GHzとされている。

30

図18A~図18Cにおいて、入射角は39°とされており、出射するテラヘルツ波の角度が法線31aより時計回りの角度とされている場合は、正の屈折率になり、出射するテラヘルツ波の角度が法線31aより反時計回りの角度とされている場合は、負の屈折率となる。図18A~図18Cを参照すると、図18A~図18Cの伝播特性では出射するテラヘルツ波の角度が法線31aより反時計回りの角度とされていることから、270 GHz~280 GHzの周波数帯においてはプリズム30は負の屈折率を呈していることが分かる。

40

#### 【0031】

さらに、本発明にかかる第3実施例の単位アレーについて説明する。第3実施例の単位アレーは、図1に示す第1実施例の単位アレー1の構成と同様とされており、第1実施例の単位アレー1および第2実施例の単位アレーと解析パラメータが異なるようにされている。ここでは、第3実施例の単位アレーの構成の説明は省略する。第3実施例の単位アレーをテラヘルツ波帯に適用する場合の解析パラメータの一例を図19に示す。この場合、負の屈折率が得られる目標とする周波数を0.3 THzとしている。図19に示すように解析する際の解析パラメータは、上壁金属板11および下壁金属板12のPxが約69.1 $\mu$ m、Pzが約56 $\mu$ mとされ、平行平板の間隔(高さ)hが約148.8 $\mu$ mとされる。この場合、平行平板からなるウェーブガイドの真空中のカットオフ周波数fcは

50

約  $1.01 \text{ THz}$  となる。また、上壁金属板 11 および下壁金属板 12 の厚さ  $t$  が約  $0.25 \mu\text{m}$  とされる。さらに、スパイラル状のマイクロコイル 10 を構成する金属細線の直径  $r_3$  が約  $9.4 \mu\text{m}$ 、金属細線を巻回する内径  $r_1$  が約  $28 \mu\text{m}$ 、その外径  $r_2$  が約  $46.8 \mu\text{m}$  とされる。

#### 【0032】

このような解析パラメータとされた第3実施例の単位アレーにおいて、電界成分  $E$  が幅 ( $x$  軸) 方向、磁界成分  $H$  が高さ ( $y$  軸) 方向とされて長さ ( $z$  軸) 方向に進行する TE モードの入射波が入力された際に、第3実施例の単位アレーを  $z$  軸方向に伝播して出力される透過波の透過係数  $S_{21}$  と、反射する反射波の反射係数  $S_{11}$  との周波数特性を解析した。解析は有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS Ver.14.1.1 を用いた。解析結果である図 20 の透過電力の周波数特性を参照すると、カットオフ周波数  $f_c$  より低い約  $0.27 \text{ THz}$  および約  $0.79 \text{ THz}$  において、破線で示す透過係数  $S_{21}$  がほぼ  $100\%$  となって第3実施例の単位アレーを TE モードの入射波がほぼ透過するようになるが、上記の周波数を中心とする所定範囲を除く  $0.2 \text{ THz} \sim 1.0 \text{ THz}$  においては、実線で示す反射係数  $S_{11}$  がほぼ  $100\%$  となってほぼ全てが反射するようになる。

10

#### 【0033】

また、上記解析パラメータとされた際の第3実施例の単位アレーの屈折率  $n$  の周波数特性の解析結果を図 21 に示す。図 21 を参照すると、実線で示す屈折率  $n$  の実部 ( $\text{Re}(n)$ ) は、 $0.2 \text{ THz} \sim$  約  $0.205 \text{ THz}$  においてはほぼ 0 となる。そして、約  $0.205 \text{ THz}$  で急激に下降し約  $0.205 \text{ THz} \sim$  約  $0.265 \text{ THz}$  の範囲で約  $-4 \sim -12$  の負となるが、この範囲における約  $0.255 \text{ THz} \sim$  約  $0.260 \text{ THz}$  の範囲で約  $+6 \sim +7$  の正となる。そして、約  $0.265 \text{ THz}$  において急激に上昇して  $+4$  の正となり、約  $0.28 \text{ THz} \sim$  約  $0.4 \text{ THz}$  において 0 となる。

20

破線で示す屈折率  $n$  の虚部 ( $\text{Im}(n)$ ) は  $0.2 \text{ THz}$  において約  $+10$  の正となり、約  $0.205 \text{ THz}$  において急激に上昇して約  $+28$  の正となる。約  $0.205 \text{ THz}$  を超えると急激に下降して約  $0.24 \text{ THz}$  において 0 となる。そして、約  $0.24 \text{ THz} \sim$  約  $0.28 \text{ THz}$  までは 0 となり、約  $0.28 \text{ THz}$  を超えると  $0 \sim +9$  の正となる。

すなわち、第3実施例の単位アレーは、約  $0.205 \text{ THz} \sim$  約  $0.25 \text{ THz}$  までの周波数範囲、および、約  $0.26 \text{ THz} \sim$  約  $0.265 \text{ THz}$  までの周波数範囲において負の屈折率  $n$  となることがわかる。

30

#### 【0034】

上記解析パラメータとされた際の第3実施例の単位アレーの比誘電率  $\epsilon$  の周波数特性の解析結果を図 22 に示す。図 22 を参照すると、実線で示す比誘電率  $\epsilon$  の実部 ( $\text{Re}(\epsilon)$ ) は約  $0.2 \text{ THz}$  において約  $-310$  の負となり周波数が上がるに従い次第に上昇するが約  $0.255 \text{ THz}$  で約  $-550$  の負に急激に下降する。そして、約  $0.255 \text{ THz}$  を超えると急激に上昇し約  $0.27 \text{ THz}$  において 0 となる。約  $0.27 \text{ THz}$  を超えると約  $-100$  の負まで下降し、その負の値が約  $0.35 \text{ THz}$  までほぼ維持される。

破線で示す比誘電率  $\epsilon$  の虚部 ( $\text{Im}(\epsilon)$ ) は  $0.2 \text{ THz} \sim 0.255 \text{ THz}$  までは 0 となり、約  $0.255 \text{ THz}$  において急激に下降して約  $-210$  の負となる。約  $0.255 \text{ THz}$  を超えると急激に下降して約  $0.27 \text{ THz}$  において 0 となる。そして、約  $0.27 \text{ THz} \sim$  約  $0.35 \text{ THz}$  までは 0 となる。

40

すなわち、第3実施例の単位アレーは、約  $0.27 \text{ THz}$  を除く約  $0.2 \text{ THz} \sim$  約  $0.35 \text{ THz}$  までの周波数範囲において負の比誘電率  $\epsilon$  となることがわかる。

#### 【0035】

上記解析パラメータとされた際の第3実施例の単位アレーの比透磁率  $\mu$  の周波数特性の解析結果を図 23 に示す。図 23 を参照すると、実線で示す比透磁率  $\mu$  の実部 ( $\text{Re}(\mu)$ ) は約  $0.2 \text{ THz} \sim$  約  $0.273 \text{ THz}$  までは  $0 \sim$  約  $+1.5$  の正となるが、約  $0.273 \text{ THz}$  を超えると急激に下降し約  $-1.9$  の負となる。そして、約  $0.273 \text{ THz}$  を超えると急激に上昇して 0 となり、その 0 の値が約  $0.35 \text{ THz}$  までほぼ維持される

50

。

破線で示す比透磁率  $\mu$  の虚部 ( $\text{Im}(\mu)$ ) は  $0.2 \text{ THz} \sim 0.251 \text{ THz}$  までは 0 となり、約  $0.251 \text{ THz}$  において若干上昇して約 +0.7 の正となる。約  $0.251 \text{ THz}$  を超えると緩慢に上昇するが、約  $0.272 \text{ THz}$  において急激に上昇して約 +4.6 の正となる。そして、約  $0.272 \text{ THz}$  を超えると急激に下降して 0 となり、ほぼ 0 の値が約  $0.35 \text{ THz}$  までほぼ維持される。

すなわち、第 3 実施例の単位アレーは、約  $0.273 \text{ THz}$  において負の比透磁率  $\mu$  となることがわかる。

#### 【0036】

上記解析パラメータとされた際の第 3 実施例の単位アレーの周波数に対する波数の解析結果を図 24 に示す。図 24 を参照すると、波数は  $0.2 \text{ THz} \sim 0.252 \text{ THz}$  までは 0 となり、約  $0.252 \text{ THz}$  を超えると急激に上昇して波数は約 6.2 となり、この波数の値が約  $0.273 \text{ THz}$  までは維持される。約  $0.273 \text{ THz}$  を超えると波数は急激に下降し約  $0.294 \text{ THz}$  において 0 となる。

すなわち、第 3 実施例の単位アレーは、約  $0.252 \text{ THz} \sim 0.294 \text{ THz}$  において解像度を高めることができることがわかる。

#### 【0037】

上記解析パラメータとされた際の第 3 実施例の単位アレーの透過電力の周波数特性において、一部の周波数帯域だけを拡大して図 25 に示す。図 25 の解析結果を参照すると、カットオフ周波数  $f_c$  より低い約  $0.272 \text{ THz}$  において、破線で示す透過係数  $S_{21}$  が約 9.6% となって第 3 実施例の単位アレーを TE モードの入射波がほぼ透過するようになる。なお、透過係数  $S_{21}$  は約  $0.27 \text{ THz}$  において約 10% となり約  $0.272 \text{ THz}$  において約 9.6% まで急激に上昇する。また、約  $0.2745 \text{ THz}$  において透過係数  $S_{21}$  は約 10% となり、約  $0.272 \text{ THz}$  の約 9.6% から急激に下降することが分かる。

#### 【0038】

次に、本発明にかかる第 3 実施例の単位アレーを利用したプリズム 60 は、第 1 実施例の単位アレー 1 に替えて第 3 実施例の単位アレーを用いた金属スリットアレー 6 を備える構成とされ、プリズム 60 の構成は図 9A に示すプリズム 20 と同様となり、金属スリットアレー 6 の構成は図 9B に示す金属スリットアレー 2 と同様となる。そこで、プリズム 60 および金属スリットアレー 6 の説明は省略する。

このプリズム 60 において負の屈折率が得られる目標とする周波数を  $0.3 \text{ THz}$  とした時の解析パラメータを図 26 に示す。図 26 に示す解析パラメータでは、入射角  $\theta$  が  $39^\circ$ 、金属スリットアレー 2 の幅  $a$  が  $345.5 \mu\text{m}$ 、その一面から斜面までの長い方の長さ  $b$  が  $289.6 \mu\text{m}$ 、その短い方の長さ  $d$  が  $37.5 \mu\text{m}$ 、第 3 実施例の単位アレーを行方向および列方向に配置する所定間隔  $c$  が  $62 \mu\text{m}$ 、第 2 領域 22 の長さ  $s$  が  $373.3 \mu\text{m}$  とされている。この解析パラメータにおいて、第 3 実施例の単位アレーが行方向に最大 5 個配列できる寸法とされている理由は、上述した通りである。

#### 【0039】

この第 3 実施例の単位アレーからなる金属スリットアレー 6 を利用するプリズム 60 におけるテラヘルツ波の伝播特性を、有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS Ver.14.1.1 を用い解析した。解析結果を図 27A ~ 図 27J に示す。なお、図 27A において入射するテラヘルツ波の周波数は  $280 \text{ GHz}$  とされ、図 27B において入射するテラヘルツ波の周波数は  $290 \text{ GHz}$  とされ、図 27C において入射するテラヘルツ波の周波数は  $300 \text{ GHz}$  とされ、図 27D において入射するテラヘルツ波の周波数は  $310 \text{ GHz}$  とされ、図 27E において入射するテラヘルツ波の周波数は  $320 \text{ GHz}$  とされ、図 27F において入射するテラヘルツ波の周波数は  $350 \text{ GHz}$  とされ、図 27G において入射するテラヘルツ波の周波数は  $400 \text{ GHz}$  とされ、図 27H において入射するテラヘルツ波の周波数は  $600 \text{ GHz}$  とされ、図 27I において入射するテラヘルツ波の周波数は  $800 \text{ GHz}$  とされ、図 27J において入射するテラヘルツ波の周波数は  $1000 \text{ GHz}$  とされ

10

20

30

40

50

ている。

【0040】

図27A～図27Jにおいて、入射角は $39^\circ$ とされており、出射するテラヘルツ波の角度が法線61aより時計回りの角度とされている場合は、正の屈折率になり、出射するテラヘルツ波の角度が法線61aより反時計回りの角度とされている場合は、負の屈折率となる。図27A～図27Jを参照すると、図27B～図27Dの伝播特性では出射するテラヘルツ波の角度が法線61aより反時計回りの角度とされていることから、 $290\text{GHz} \sim 310\text{GHz}$ の周波数帯においてはプリズム60は負の屈折率を呈していることが分かる。また、図27E～図27Jの伝播特性では出射するテラヘルツ波の角度が法線21aより反時計回りの角度とされておらず、 $320\text{GHz} \sim 400\text{GHz}$ においてはプリズム60は負の屈折率を呈していないことが分かる。なお、周波数が $300\text{GHz}$ とされた図27Cに示す伝播特性では、約 $25^\circ$ の負の屈折角が得られており、この屈折角と屈折率の関係よりプリズム60は負の屈折率 $n = -3.0$ を呈している。

10

【産業上の利用可能性】

【0041】

以上説明した本発明の金属スリットアレーは、単位アレーにおけるカットオフ状態の平行平板で負の誘電率を実現し、マイクロコイルの共振により負の透磁率を実現することにより、テラヘルツ波帯において負の誘電率と負の透磁率を呈するメタ材料として機能する。すなわち、平行平板による誘電率が負の誘電率を呈するテラヘルツ波帯の周波数において、マイクロコイルによる透磁率が負となるようにしている。この場合の金属スリットアレーは、使用するテラヘルツ波帯の波長に対して十分大きく、入射波の進行方向を $z$ 軸としたときに $x$ 軸方向および $y$ 軸方向で無限周期構造となる。この無限周期構造においては、例えば、図1に示す $x$ 軸方向へ数十個から数百個程度の単位アレーを配列すると共に、 $y$ 軸方向に数十個から数百個程度の単位アレーを配列する。これにより、 $xy$ 面の一平面上に配列された数百個から数万個の単位アレーからなるアレー群が構成され、このアレー群を $z$ 軸方向に数群から数十群程度並べることにより金属スリットアレーを構成することができる。この場合には、単位アレーが上下に積層されることになるが、この際には、上壁金属板とその上に隣接する単位アレーの下壁金属板（下壁金属板とその下に隣接する単位アレーの上壁金属板）とを、厚さを2倍とした1枚の金属板で構成するのが良い。ここで、上壁金属板および下壁金属板の厚さを $t$ とすると、1枚の金属板の厚さは $2t$ となる。さらに、各実施例の単位アレーでは、1つのマイクロコイルを装荷していたが、金属製の細長い平板状とされた上壁と、該上壁に所定間隔を持って対面するよう配置された金属製の細長い平板状とされた下壁とからなる平行平板を備え、該平行平板内に複数のマイクロコイルを一行に装荷するようにしても良い。

20

30

以上説明した本発明にかかる金属スリットアレーを利用すると、テラヘルツ波帯において負の屈折率を呈する平面状のレンズやプリズムを実現することができる。

【符号の説明】

【0042】

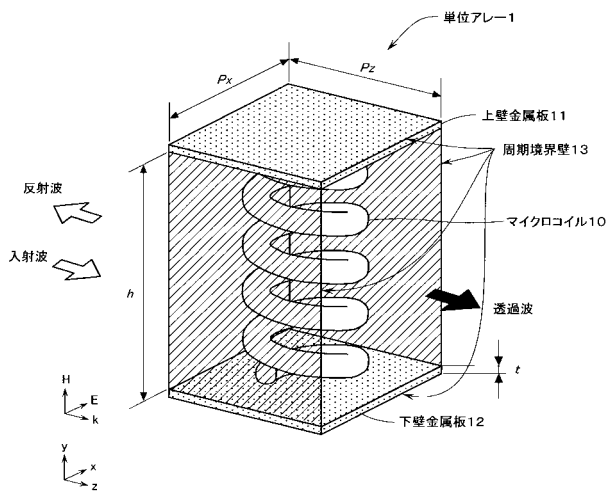
- 1 単位アレー
- 2 金属スリットアレー
- 3 金属スリットアレー
- 6 金属スリットアレー
- 10 マイクロコイル
- 11 上壁金属板
- 12 下壁金属板
- 13 周期境界壁
- 20 プリズム
- 21 第1領域
- 21a 法線
- 22 第2領域

40

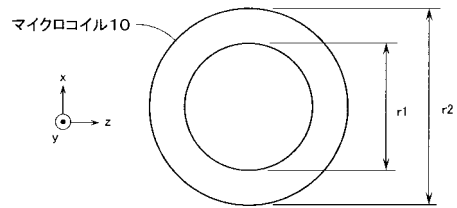
50

- 2 3 ウェーブガイド
- 3 0 プリズム
- 3 1 a 法線
- 6 0 プリズム
- 6 1 a 法線

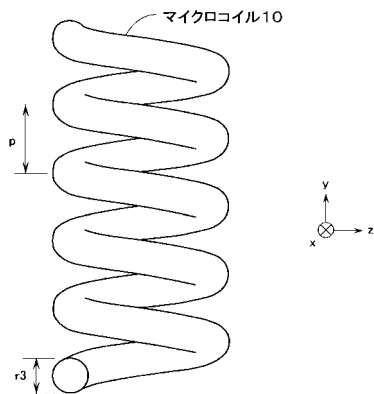
【図 1】



【図 2 A】



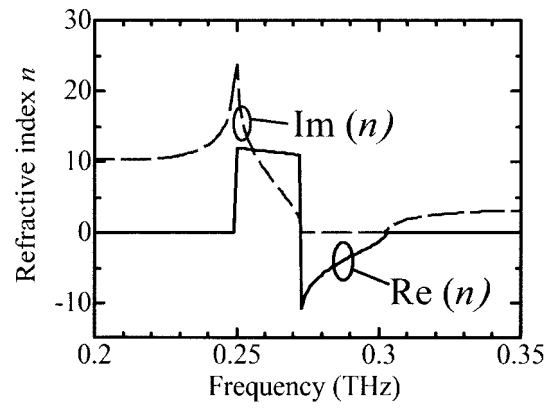
【図 2 B】



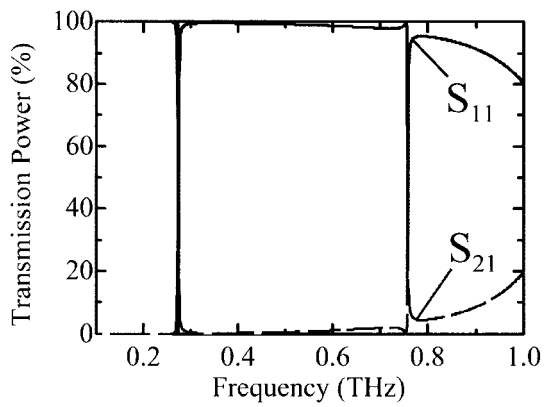
【 図 3 】

$p_x$	62 $\mu\text{m}$
$p_z$	62 $\mu\text{m}$
$h$	159.5 $\mu\text{m}$
$t$	0.25 $\mu\text{m}$
$p$	20 $\mu\text{m}$
$r_1$	30 $\mu\text{m}$
$r_2$	50 $\mu\text{m}$
$r_3$	10 $\mu\text{m}$

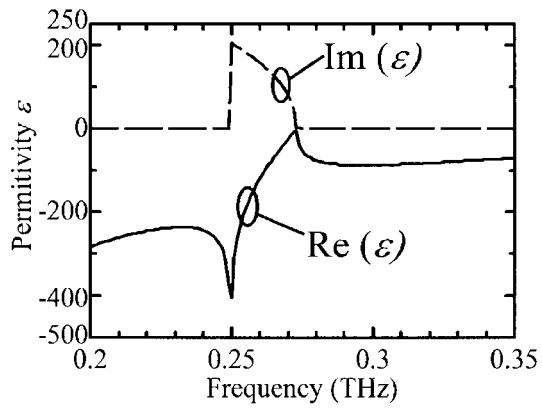
【 図 5 】



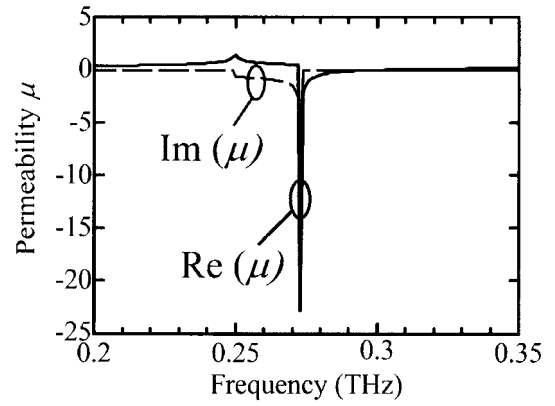
【 図 4 】



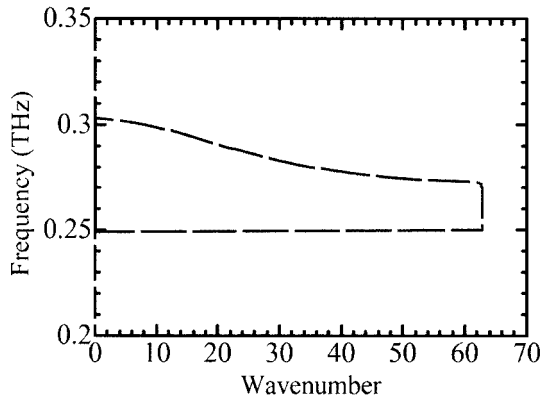
【 図 6 】



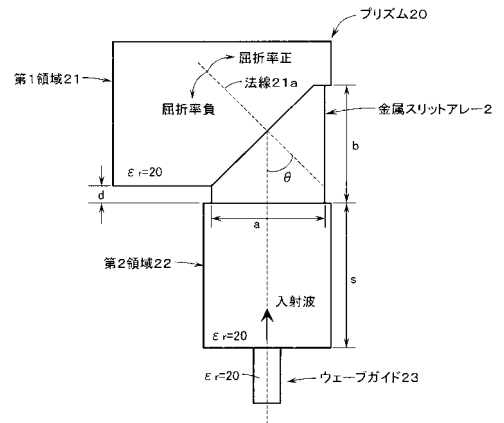
【 図 7 】



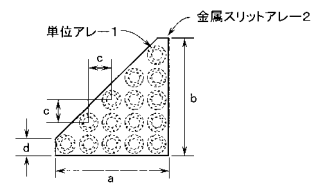
【図 8】



【図 9 A】



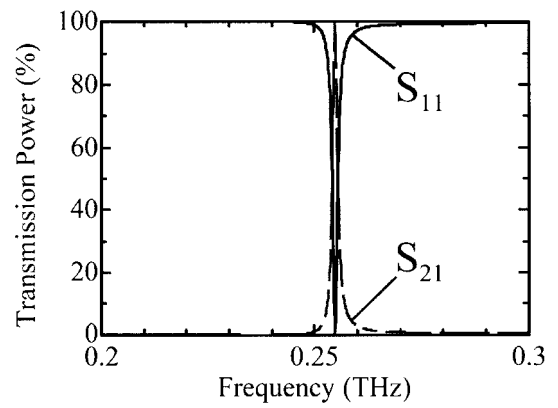
【図 9 B】



【図 9 C】

$\theta$	$45^\circ$
a	$310 \mu\text{m}$
b	$325 \mu\text{m}$
c	$62 \mu\text{m}$
d	$46 \mu\text{m}$
s	$400 \mu\text{m}$

【図 1 2】

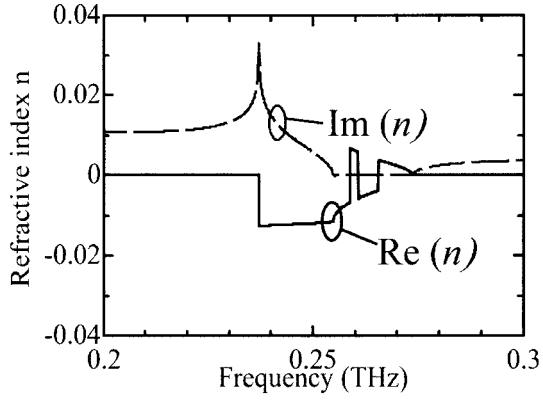


【図 1 1】

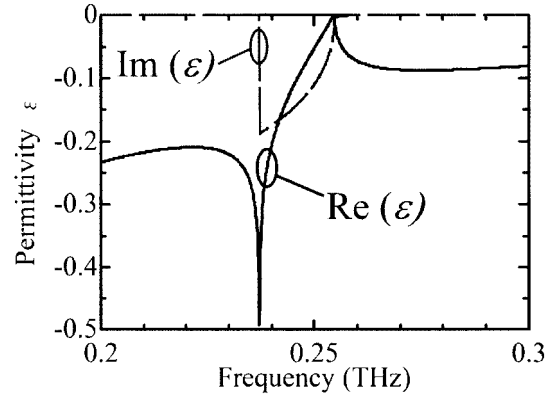
$p_x$	$74 \mu\text{m}$
$p_z$	$60 \mu\text{m}$
$h$	$159.5 \mu\text{m}$
$t$	$0.25 \mu\text{m}$
$p$	$20 \mu\text{m}$
$r_1$	$30 \mu\text{m}$
$r_2$	$50 \mu\text{m}$
$r_3$	$10 \mu\text{m}$



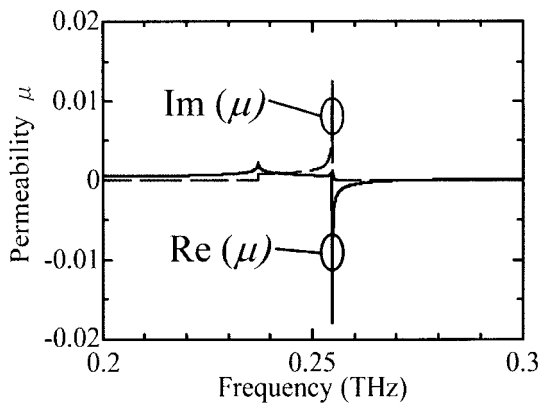
【 図 1 3 】



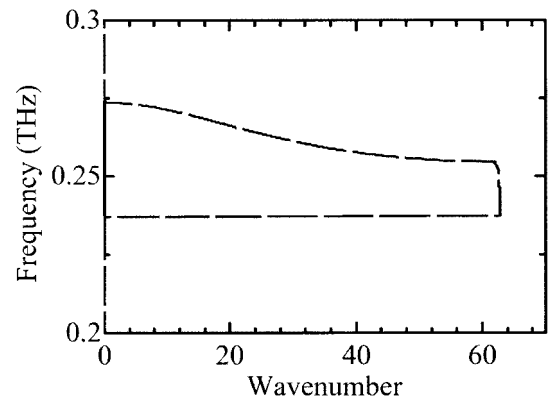
【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



【 図 1 6 】



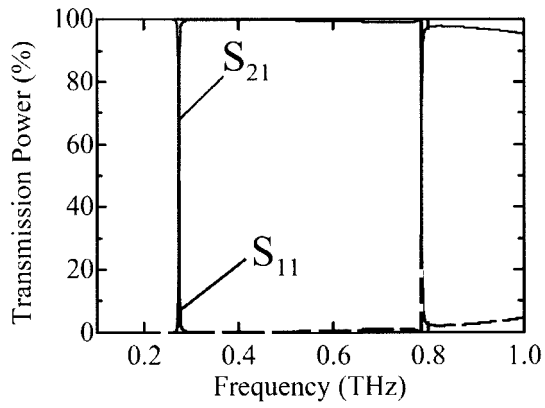
【 図 1 7 】

$\theta$	$39^\circ$
a	$370 \mu\text{m}$
b	$320.7 \mu\text{m}$
c	$62 \mu\text{m}$
d	$45 \mu\text{m}$
s	$400 \mu\text{m}$

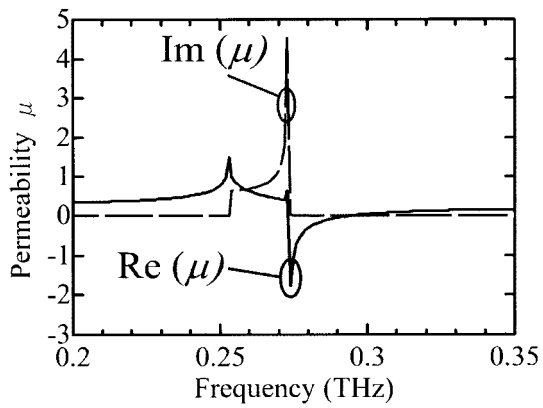
【 図 1 9 】

$p_x$	69.1 $\mu\text{m}$
$p_z$	56 $\mu\text{m}$
$h$	148.8 $\mu\text{m}$
$t$	0.25 $\mu\text{m}$
$p$	18.7 $\mu\text{m}$
$r_1$	28 $\mu\text{m}$
$r_2$	46.8 $\mu\text{m}$
$r_3$	9.4 $\mu\text{m}$

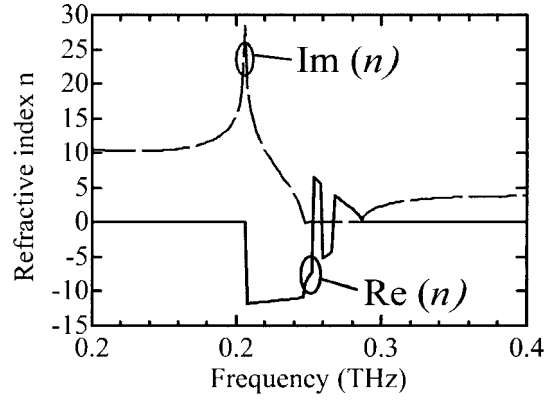
【 図 2 0 】



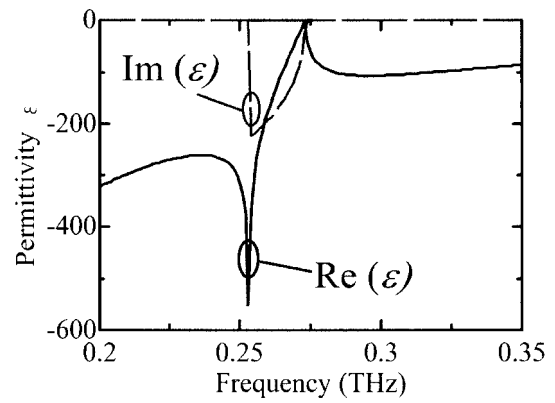
【 図 2 3 】



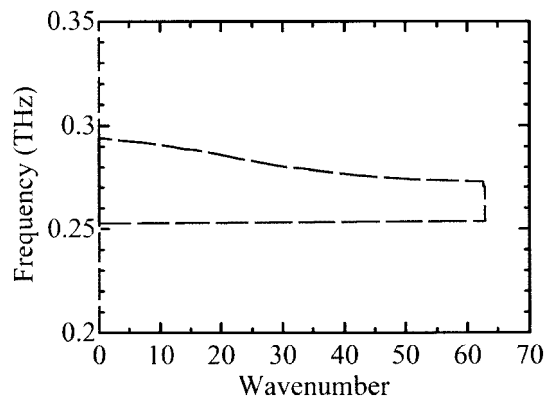
【 図 2 1 】



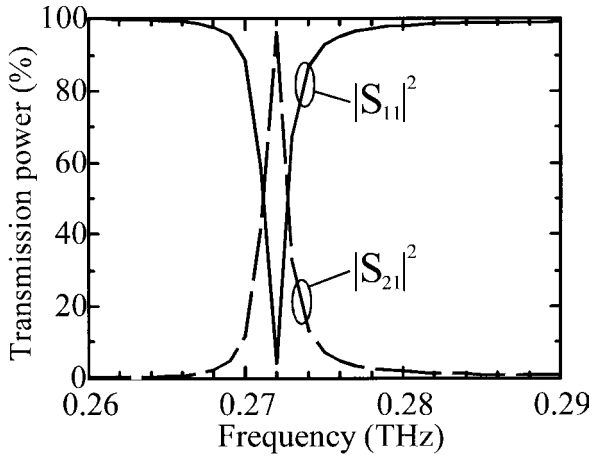
【 図 2 2 】



【 図 2 4 】



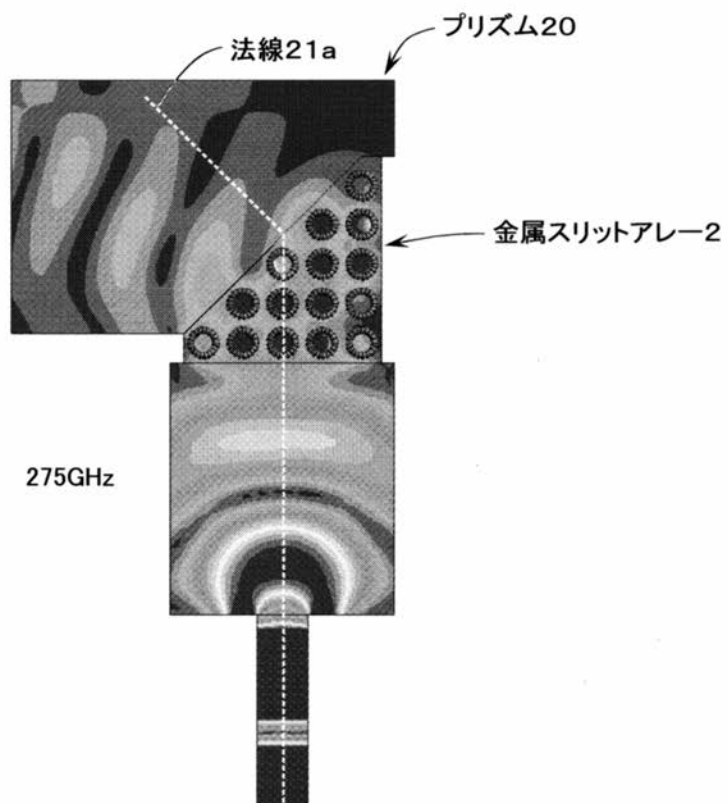
【 図 2 5 】



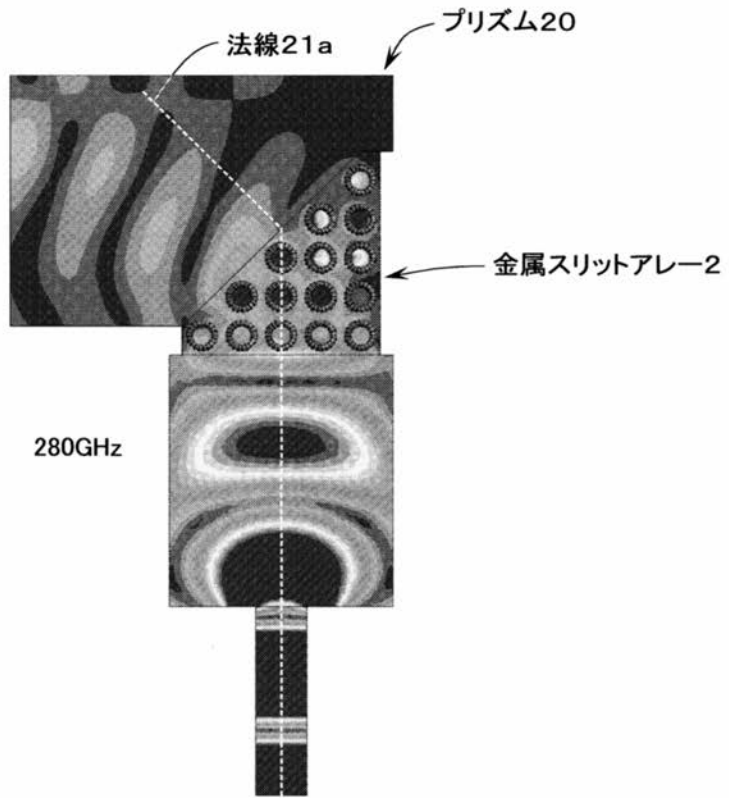
【 図 2 6 】

$\theta$	39°
a	345.5 $\mu\text{m}$
b	289.6 $\mu\text{m}$
c	62 $\mu\text{m}$
d	37.5 $\mu\text{m}$
s	373.3 $\mu\text{m}$

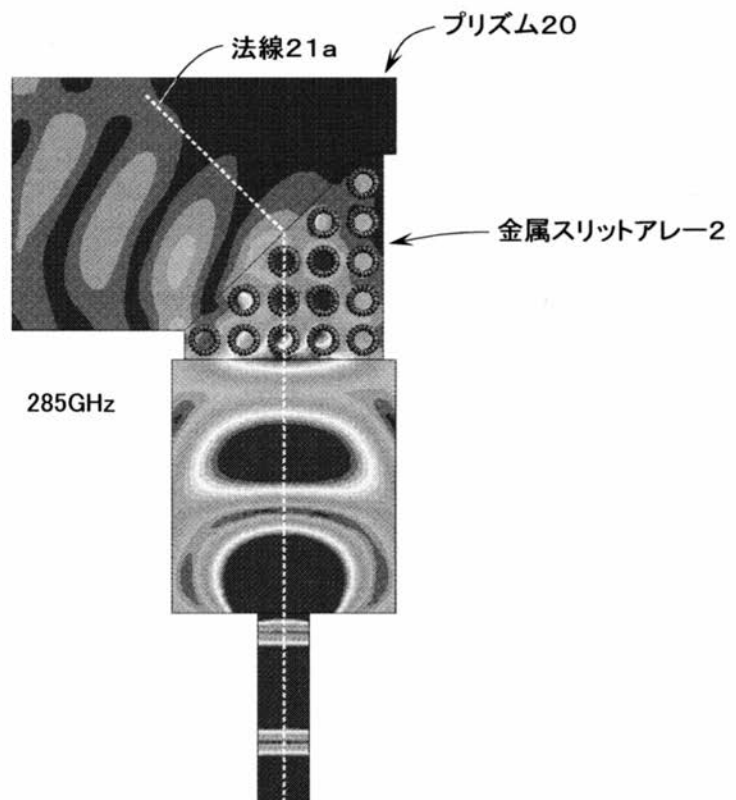
【 図 1 0 A 】



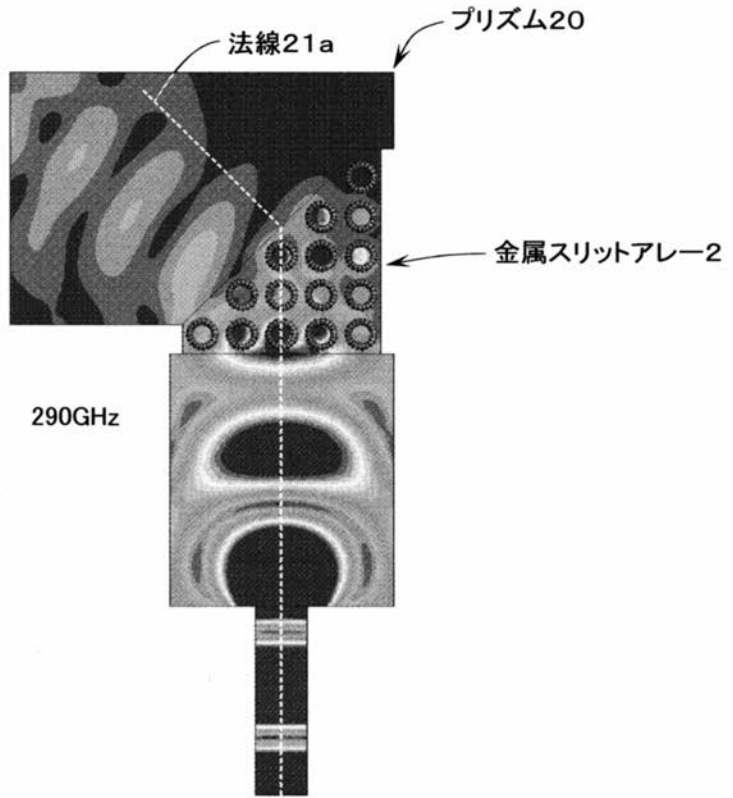
【図10B】



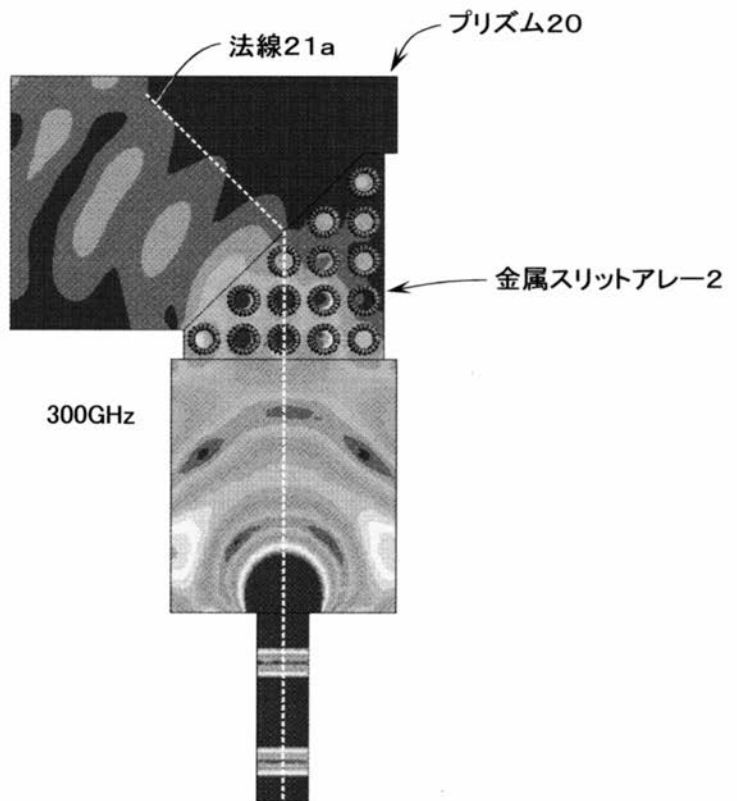
【図10C】



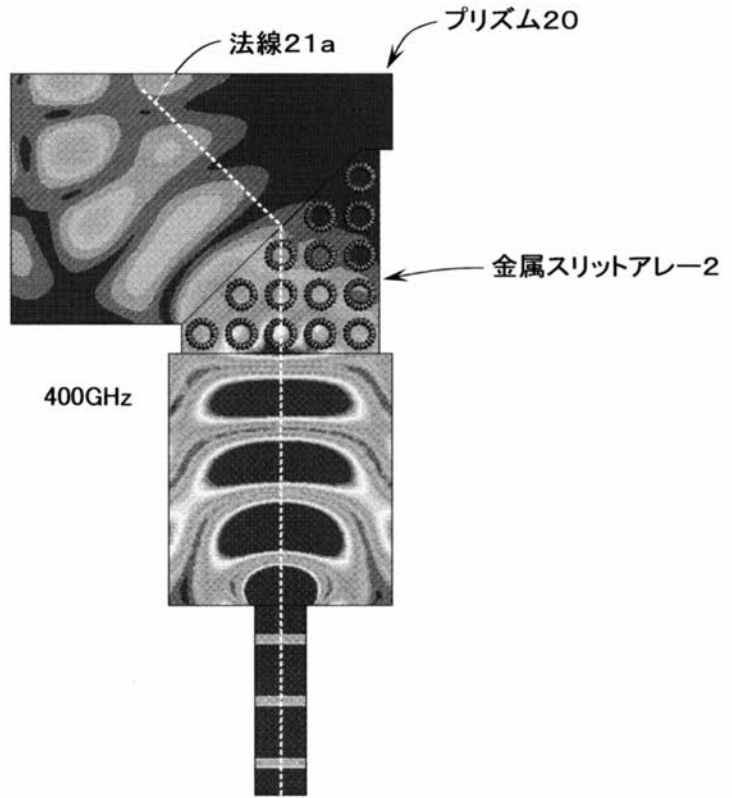
【図10D】



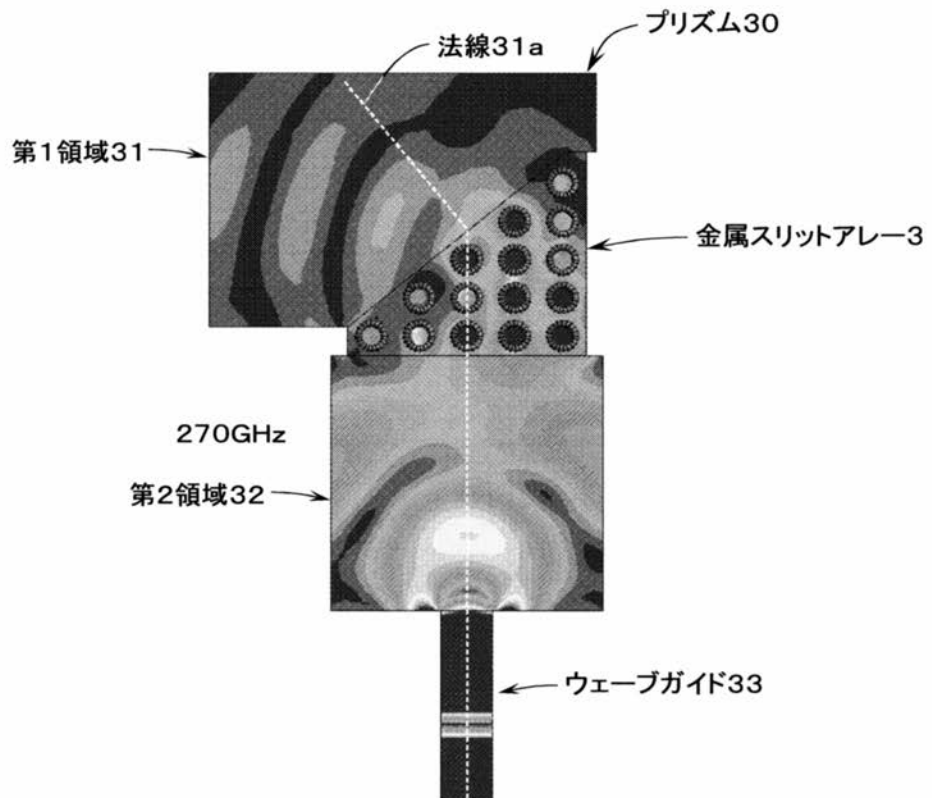
【図10E】



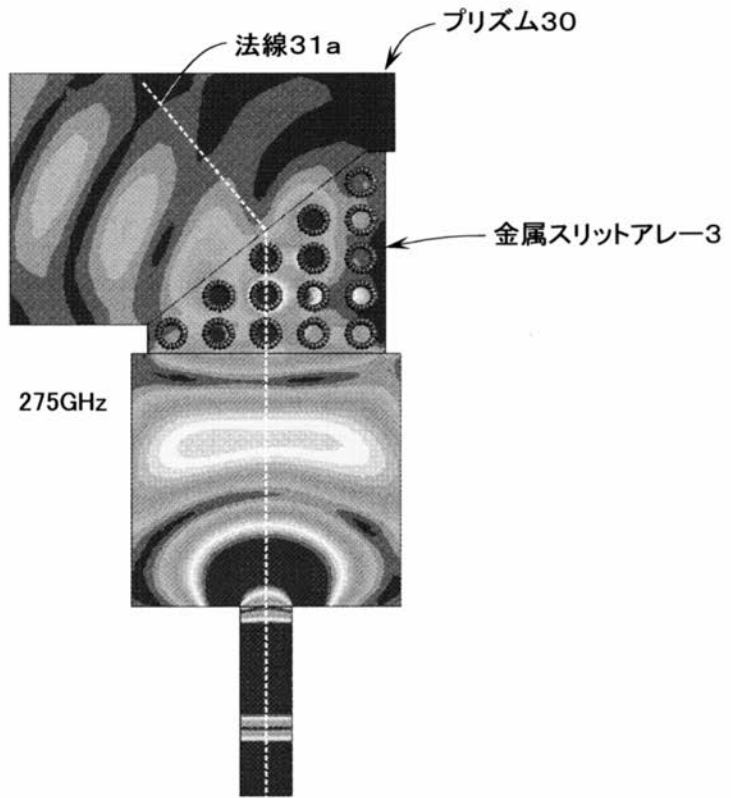
【図10F】



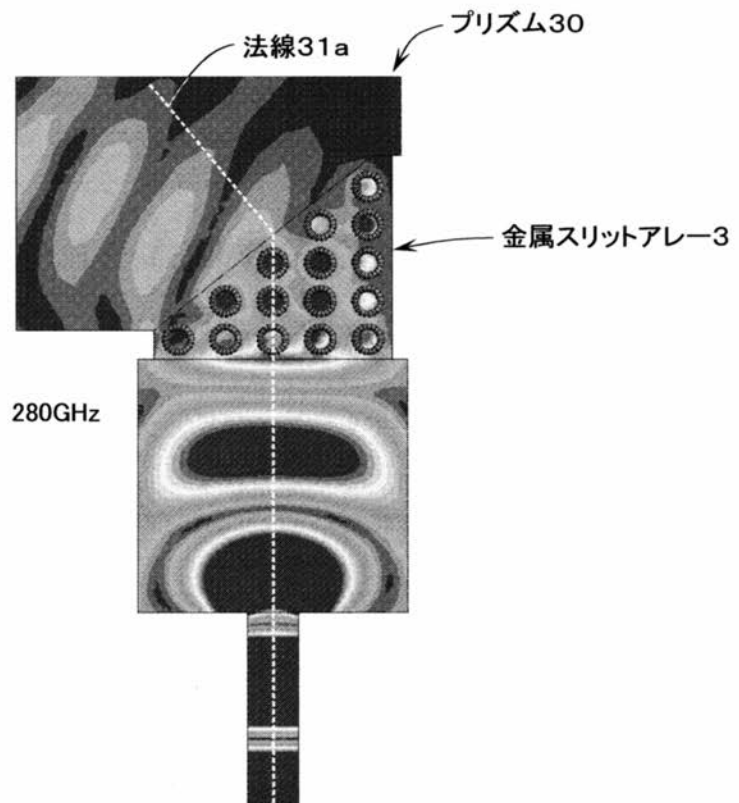
【図18A】



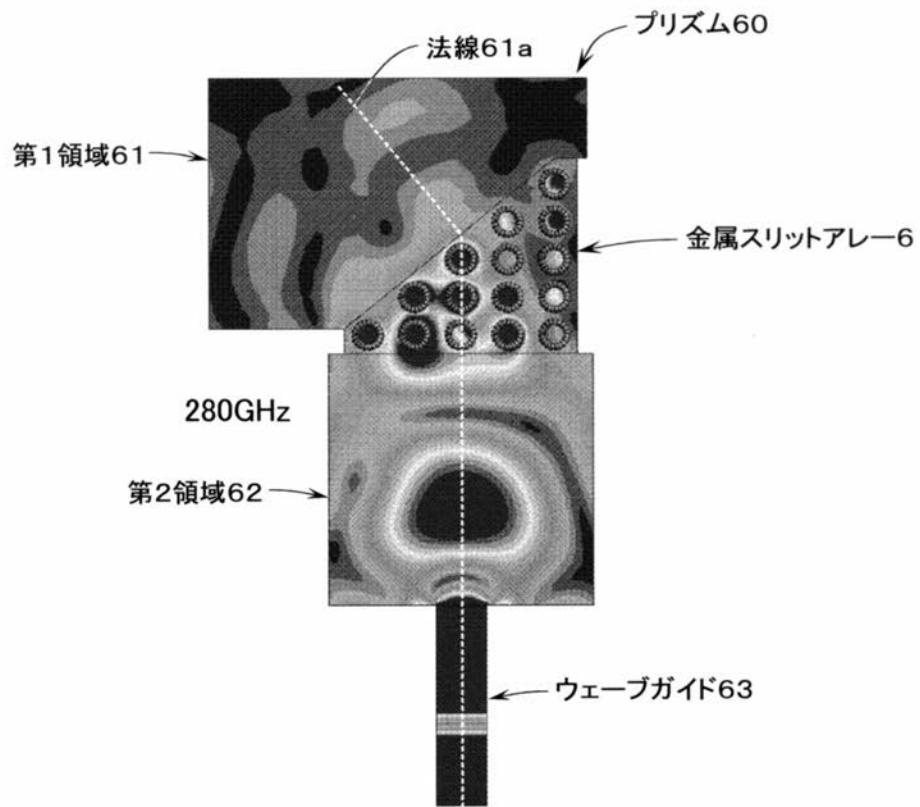
【図18B】



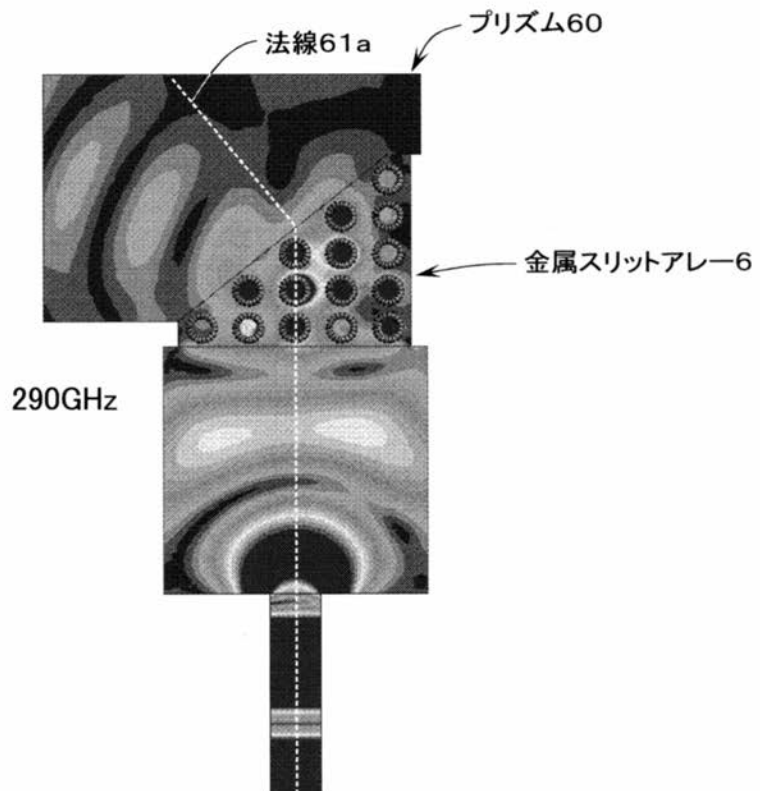
【図18C】



【図27A】

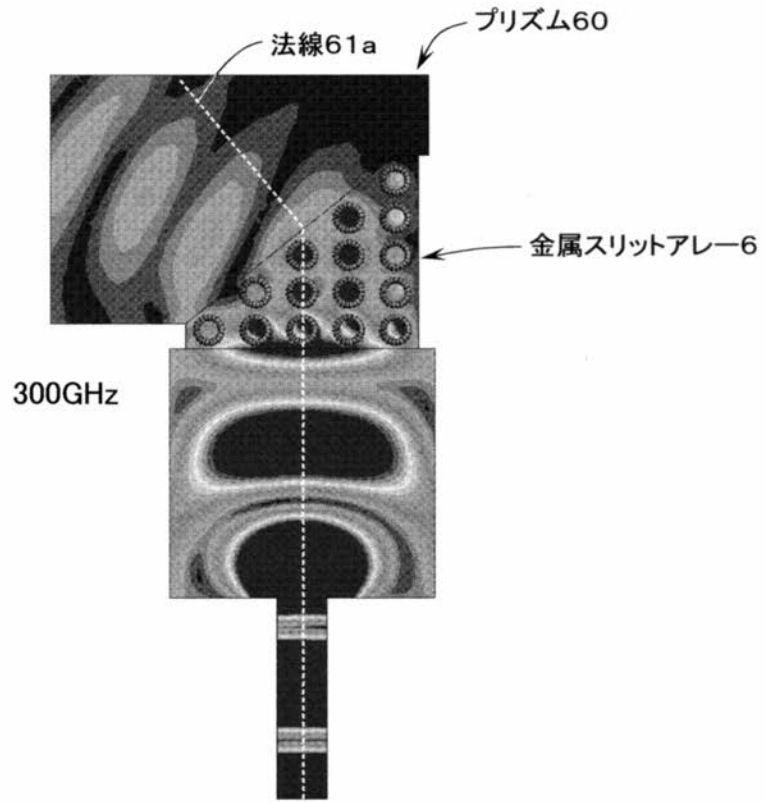


【図27B】

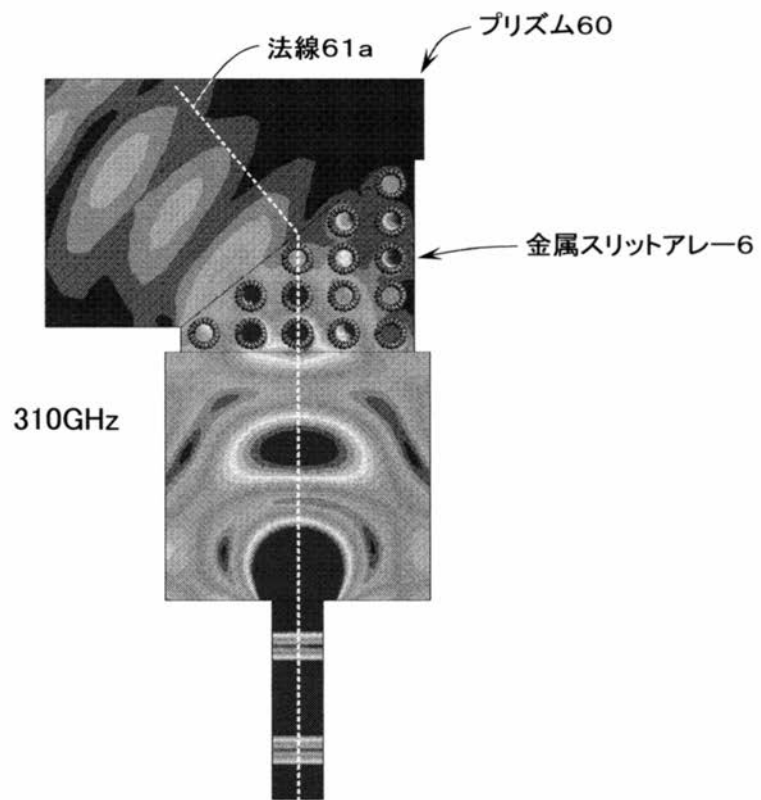




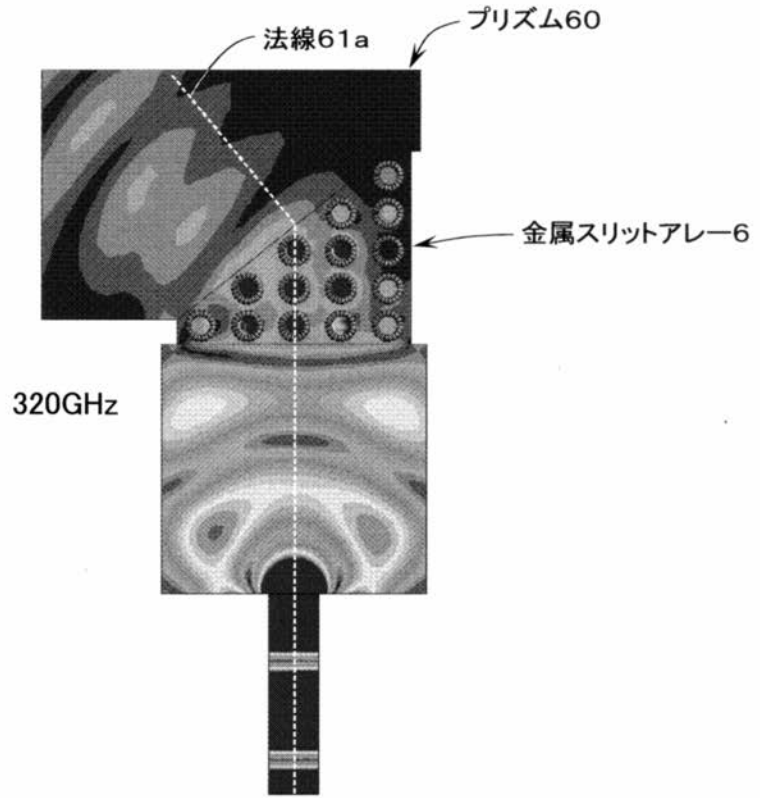
【図27C】



【図27D】



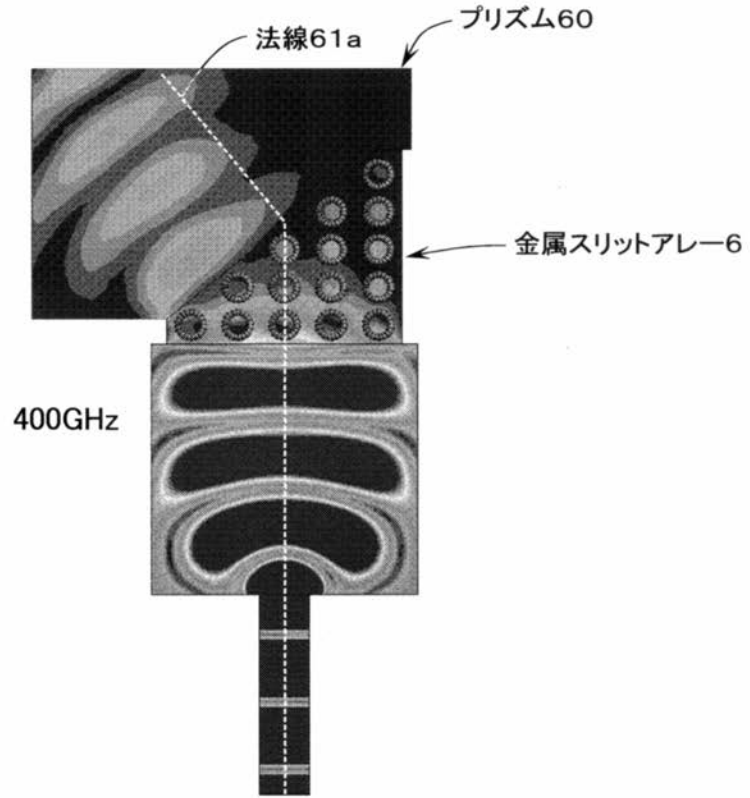
【図27E】



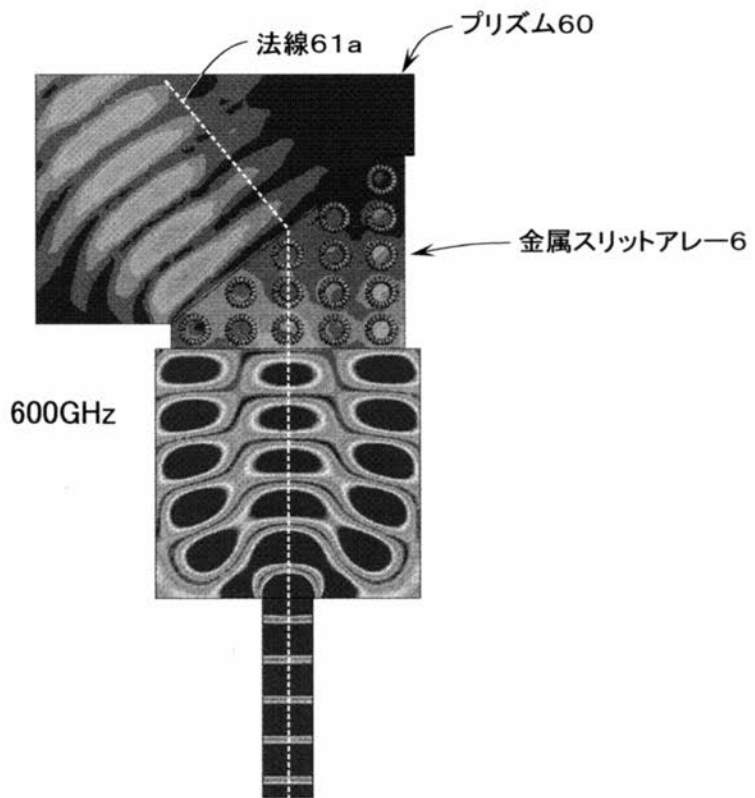
【図27F】



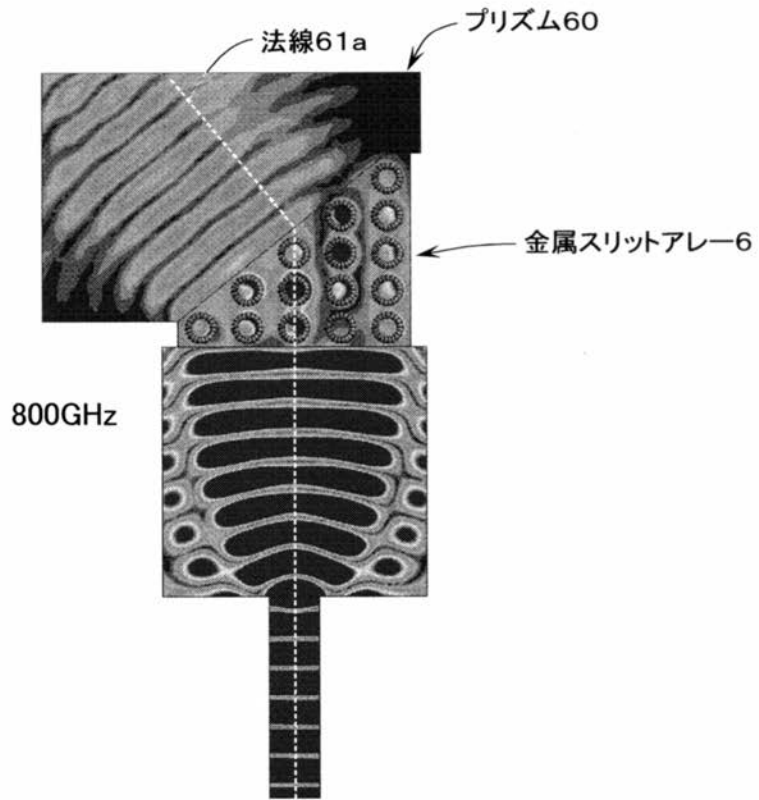
【図 27 G】



【図 27 H】



【図 27 I】



【図 27 J】

