

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6217963号
(P6217963)

(45) 発行日 平成29年10月25日(2017.10.25)

(24) 登録日 平成29年10月6日(2017.10.6)

(51) Int.Cl. F I
H O 1 P 3/20 (2006.01) H O 1 P 3/20

請求項の数 10 (全 9 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2013-102527 (P2013-102527) (22) 出願日 平成25年5月14日 (2013.5.14) (65) 公開番号 特開2014-222861 (P2014-222861A) (43) 公開日 平成26年11月27日 (2014.11.27) 審査請求日 平成28年4月12日 (2016.4.12)</p> <p>特許法第30条第2項適用 2012年度日本物理学会 北陸支部定例学術講演会講演予稿集 (平成24年12月 1日) C-p3</p>	<p>(73) 特許権者 504145320 国立大学法人福井大学 福井県福井市文京3丁目9番1号 (73) 特許権者 390013815 学校法人金井学園 福井県福井市学園3丁目6番1号 (74) 代理人 100110814 弁理士 高島 敏郎 (72) 発明者 谷 正彦 福井県福井市文京3丁目9番1号 国立大 学法人福井大学内 (72) 発明者 左近 知也 福井県福井市文京3丁目9番1号 国立大 学法人福井大学内</p>
---	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電磁波の位相速度制御方法及び位相速度制御構造

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

電磁波照射手段から照射された $30\text{GHz} \sim 10\text{THz}$ の電磁波の位相速度を制御する方法であって、

少なくとも前記電磁波が伝搬する表面が表面プラズモン結合を生じさせる金属で形成された平行平板導波路と、この平行平板導波路に前記電磁波を導入する導入手段とを準備し、

前記平行平板導波路の幅を前記電磁波の波長以下とし、

前記電磁波が伝搬する前記平行平板導波路の表面粗さを変化させることで前記電磁波に対する前記平行平板導波路の有効屈折率を変化させ、これにより前記導入手段から前記平行平板導波路に導入した電磁波の位相速度を制御すること、
 を特徴とする電磁波の位相速度制御方法。

【請求項2】

前記有効屈折率と前記表面粗さとの関係が、縦軸を有効屈折率、横軸を表面粗さとした両対数グラフにデータフィッティングの結果をプロットしたときに単調増加のグラフで表わされるものであることを特徴とする請求項1に記載の電磁波の位相速度制御方法。

【請求項3】

前記単調増加のグラフが直線的であることを特徴とする請求項2に記載の電磁波の位相速度制御方法。

【請求項4】

前記導入手段は、レンズ又は少なくとも電磁波が伝搬する表面が前記電磁波との間で表面プラズモン結合を生じさせる金属で形成され出口の幅が前記電磁波の波長以下の寸法に形成された先細状の溝であることを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載の電磁波の位相速度制御方法。

【請求項 5】

前記先細状の溝が V 溝で、前記 V 溝の頂部の角度は、前記 V 溝に入射される電磁波の集束角に基づいて決定されることを特徴とする請求項 4 に記載の電磁波の位相速度制御方法。

【請求項 6】

電磁波照射手段から照射された 30 GHz ~ 10 THz の電磁波の位相速度を制御する構造であって、

10

少なくとも前記電磁波が伝搬する表面が表面プラズモン結合を生じさせる金属で形成された平行平板導波路と、

この平行平板導波路に前記電磁波を導入する導入手段とを有し、

前記平行平板導波路の幅を前記電磁波の波長以下とし、

前記平行平板導波路の表面の表面粗さが、前記平行平板導波路の有効屈折率に対して予め設定された関係で形成され、前記表面粗さを変化させることで前記平行平板導波路に導入した電磁波の位相速度を制御すること、
を特徴とする電磁波の位相速度制御構造。

【請求項 7】

前記表面粗さが、前記有効屈折率に対して、縦軸を有効屈折率、横軸を表面粗さとした両対数グラフにデータフィッティングの結果をプロットしたときに単調増加のグラフで表される関係で設定されていることを特徴とする請求項 6 に記載の電磁波の位相速度制御構造。

20

【請求項 8】

前記単調増加のグラフが直線的であることを特徴とする請求項 7 に記載の電磁波の位相速度制御構造。

【請求項 9】

前記導入手段は、レンズ又は少なくとも電磁波が伝搬する表面が前記電磁波との間で表面プラズモン結合を生じさせる金属で形成され、出口の幅が前記電磁波の波長以下の寸法に形成された先細状の溝であることであることを特徴とする請求項 6 ~ 8 のいずれかに記載の電磁波の位相速度制御構造。

30

【請求項 10】

前記先細状の溝が V 溝で、前記 V 溝の頂部の角度は、前記 V 溝に入射される電磁波の集束角に基づいて決定されていることを特徴とする請求項 9 に記載の電磁波の位相速度制御構造。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電磁波の位相速度の制御が可能な方法及びその構造に関し、特に、周波数 30 GHz ~ 30 THz、波長 10 mm ~ 10 μm の周波数領域の電磁波の位相速度制御方法及びそのための構造に関する。

40

【背景技術】

【0002】

この種の周波数領域の中では、特にテラヘルツ波帯の電界強度を検出することで非破壊的に検査等を行う技術が近年開発され、例えば、X 線装置に代わる安全な透視検査装置を構成してイメージングを行う技術などへの利用が進んでいる。また、物質内部の吸収スペクトルや複素誘電率を求めて分子の結合状態などの物性を調べる分光技術、キャリア濃度や移動度、導電率などの物性を調べる計測技術、生体分子の解析技術などへの利用も進められている（例えば、特許文献 1, 2, 3 参照）。

【先行技術文献】

50

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2011-33700号公報

【特許文献2】特開2010-204488号公報

【特許文献3】特開2011-203718号公報

【特許文献4】特開平8-102604号公報（段落0002の記載参照）

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

ところで、表面プラズモンを生じさせる金属で形成された板を平行に配置して導波路とした金属平行平板導波路は、電磁波をほとんど損失無く伝搬させることができ、かつ、周波数に依存した位相速度変化（分散）がないことが知られている（例えば、特許文献4参照）。そのため、金属平行平板導波路は、広帯域の電磁波の導波路として適しており、テラヘルツ波帯の電磁波を伝搬させる導波路としての応用も期待されている。

10

金属平行平板導波路中の電磁波（TEMモード）の位相速度は、金属平行平板導波路内の屈折率で決まるため、位相速度を制御するにはある屈折率を持った誘電率の材料（誘電体）で金属平行平板導波路内を満たす必要がある。

しかし、テラヘルツ領域では誘電体は有限の吸収損失を持つため、損失の小さい誘電率の材料はその種類が限定され、位相速度を任意に制御することが難しいという問題がある。

20

【0005】

本発明は、上記の課題に鑑みてなされたもので、金属平行平板導波路内の電磁波、特にテラヘルツ波帯の電磁波の位相速度を任意に制御することが可能な方法及び構造の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

上記課題を解決するために本発明は、電磁波照射手段から照射された30GHz～10THzの電磁波の位相速度を制御する方法であって、表面プラズモン結合を生じさせるとともに、前記電磁波の有効屈折率を増大させる平行平板導波路と、この平行平板導波路に前記電磁波を導入する導入手段とを準備し、前記平行平板導波路の幅を前記電磁波の波長以下とし、前記導入手段から前記平行平板導波路に導入した電磁波の位相速度を、前記電磁波が伝搬する前記平行平板導波路の表面粗さによって制御する構成としてある。

30

前記有効屈折率と前記表面粗さとの関係は、縦軸を有効屈折率、横軸を表面粗さとした両対数グラフにデータフィッティングの結果をプロットしたときに一次関数として表わされるものとすることができる。

【0007】

前記導入手段は前記電磁波を平行平板導波路に集束させて導入することができるのであればよく、レンズであってもよいし、少なくとも前記電磁波が伝搬する表面が前記電磁波との間で表面プラズモン結合を生じさせる金属で形成され出口の幅が前記電磁波の波長以下の寸法に形成された先細状の溝としてもよい。このような溝は、例えば二つの金属ブロックを対向配置することで形成することができる。

40

前記平行平板導波路に前記電磁波を導入することができるのであれば、前記先細状の溝の形状は問わず、例えばV溝とすることができる。この場合、前記V溝の頂部の角度は、前記V溝に入射される前記電磁波の集束角に基づいて決定するとよい。

【発明の効果】

【0008】

本発明は上記のように構成されているので、導波路の表面粗さを変化させるだけで電磁波の屈折率を変化させることができ、簡単に位相速度の制御が可能である。また、その構造も簡単かつコンパクトにすることが可能である。

50

【発明を実施するための最良の形態】

【0009】

以下、本発明の好適な実施形態を、図面を参照しながら詳細に説明する。

図1に、本発明の位相速度制御構造の一実施形態を概略平面図で示す。

この実施形態の位相速度制御構造は、図1に示すように、金属ブロック1に、形成されたV形の溝（V溝2a）と、このV溝2aの先端に形成された平行溝2bからなる導波路2とを有する。この実施形態では、V溝2aが電磁波を集束させて平行溝2bに導入する導入手段を構成し、平行溝2bが電磁波に対する有効屈折率を増大させる平行平板導波路を構成する。

【0010】

テラヘルツ波（以下「THz波」と記載する）をV溝2a内の金属の表面プラズモンと結合させ、V溝2aの先端に集束させることでTHz波を増強することができる。この原理は、例えば、OPTICS EXPRESS Vol.20, No.8 8355 (9 April 2012) に掲載されたK. Iwaszczukらによる "Terahertz field enhancement to the MV/cm regime in a tapered parallel plate waveguide" 等で知られている。

表面プラズモン結合を生じさせるものであれば、金属の種類は特に問わないが、金（Au）や銀（Ag）を好適に用いることができる。アルミニウムや鉄などで形成された金属製のブロックにV溝2aを形成し、V溝2aの内面に金（Au）や銀（Ag）等の金属をメッキ又は蒸着等してもよいし、樹脂やセラミック等の非金属材料のブロックにV溝2a

【0011】

V溝2aの頂部の角度（図1中、符号で示す角度）はできるだけ小さいほうがよいとされるが、V溝2aの角度を入射するTHz波のビーム集束角に合わせることで、V溝2aの頂部の角度が大きくても効率よくTHz波を集束させることができる。最適なV溝2aの頂部の角度は、THz波のビーム集束角を目安に最適値を実験等で求めることができ、例えば、THz波のビーム集束角が18°の場合には、V溝2aの頂部の角度は20°程度とすることができる。

【0012】

V溝2aの先端に狭幅の平行溝2bを設け、集束させたTHz波をこの平行溝2b内で伝搬させることで、増強したTHz波をサンプル等に導くことができる。平行溝2bの幅は狭いほど増強効果を高めることができ、THz波の波長よりも狭くするのが好ましい。例えば、THz波の波長が300μmの場合には、幅Dは300μm以下とするのが好ましい。

【0013】

平行溝2bの内表面もV溝2aの内表面と同様に、表面プラズモンとの結合を生じさせる金属で形成されている。

平行溝2bの内表面の表面粗さを、表面粗さ測定器で測定した結果を図2に示す。

基準長さ0.8mmにおける十点平均粗さRzを以下の式で求めた。

【0014】

【数1】

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_{pi} + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_{vi}$$

【0015】

ここで、Y_{pi}は高い方から5番目までの山頂の高さ、Y_{vi}は深い方から5番目までの谷底の深さである。評価長さは、基準長さの三倍とした。

【0016】

図3は、本発明の位相速度制御構造の効果を測定するための実験装置の一例である。

図3の実験装置では、全長 $L_1 = 35 \text{ mm}$ 、平行溝2bの長さ $L_2 = 5 \text{ mm}$ のアルミ製の金属ブロック1を用いた。また、THz波発生用励起光源としてフェムト秒レーザー装置を用いた。平行溝2bの幅は任意に設定できるが、以下の測定では $10 \mu\text{m}$ に設定した。

フェムト秒レーザー装置3から照射されたレーザー光は、ビームスプリッター31によって直進方向と90度に屈曲する方向に分割され、分割側のポンプ光はミラー32a, 32b, 32c, 32d, レンズ33を経てダイポール型光伝導アンテナ34に入射されTHz波として出力される。このTHz波は、ミラー32e及び楕円ミラー35から金属ブロック1のV溝2aへ導入される。平行溝2bから出射されたTHz波は、楕円ミラー36からミラー38hを経て検出側のダイポール型光伝導アンテナ37に入射される。

一方、直進方向のレーザー光は、ミラー38a、遅延ステージのミラー38b, 38c, ミラー38d~38g及びレンズ39を経てダイポール型光伝導アンテナ37に入射され、THz波が検出される。

【0017】

平行溝2bの表面粗さ R_z を種々に変化させて、周波数と振幅透過率との関係を調べた。振幅透過率は、導波路透過後の振幅/自由空間透過後の振幅で表される。

図4は、図3の実験装置を用いて得られた周波数と振幅透過率との関係を示すグラフである。

このグラフから平行溝2bの表面が粗いほど、つまり表面粗さ R_z が大きいほど、高周波側の透過率が小さいことがわかる。

【0018】

また、平行溝2bの表面粗さ R_z を種々に変化させて、平行溝2bでの位相シフトについて調べた。位相シフト (rad) は、以下の式で求めることができる。

【0019】

【数2】

$$\Delta\varphi = k\Delta L = \frac{(n_{\text{eff}} - 1)\omega\Delta L}{c}$$

【0020】

ここで、 k は波数、 L は平行溝2bの長さ、 n_{eff} は有効屈折率、 ω は周波数、 c は真空中の光速である。

ここで、有効屈折率 n_{eff} は以下の式で求めることができる。

【0021】

【数3】

$$n_{\text{eff}} = \frac{n(R_z)}{n_0(R_z = 1\mu\text{m})} = 1 + \frac{\Delta\varphi}{\omega \cdot \Delta L / c}$$

【0022】

ここで、 $n(R_z)$ は表面粗さパラメータ R_z に依存した平行溝2bのTHz波に対する屈折率を表し、 n_0 は表面が完全に平坦で、理論上の粗さが $R_z = 0$ の場合 ($n_0(R_z = 0)$ の場合)の平行平板導波路の屈折率を表す。この場合、 $n_0(R_z = 0)$ は真空若しくは空気の屈折率に一致して $n_0 = 1.0$ となるが、実際には表面を完全に平坦(つまり $R_z = 0$)とはできず、 $R_z = 1 \mu\text{m}$ が限界である。しかし、 $R_z = 1 \mu\text{m}$ の場合でも、THz波の位相速度はほぼ真空の光速度、すなわち有効屈折率が1.0に近いことが実験で確認されているため、上記の式では $n_0(R_z = 1 \mu\text{m})$ として表している。

10

20

30

40

50

図5は、図3の実験装置を用いて得られた位相シフトと周波数との関係を示すグラフである。

このグラフから、各周波数成分において位相シフトが見られ、平行溝2bの表面粗さRzが大きいほど、位相シフトが大きいことがわかる。

【0023】

さらに、平行溝2bの表面粗さRzを種々に変化させて、THz波に対する平行溝2bの屈折率を調べた。

図6は、図3の実験装置を用いて得られた有効屈折率 n_{eff} と周波数との関係を示すグラフである。

このグラフから、平行溝2bの表面粗さRzが大きいほど、THz波に対する平行溝2bの有効屈折率が大きいことがわかる。

【0024】

図7は、有効屈折率 n_{eff} と表面粗さRzとの関係を示すグラフである。

ここで、

【0025】

【数4】

$$n_{eff} = Rz^a + b$$

20

【0026】

(a, bは定数)をモデル関数としてフィッティングを行った。

R^2 値はフィットの良さを示す指標で、

【0027】

【数5】

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p - 1)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n - 1)}$$

30

y_i :測定値

\hat{y}_i :フィッティングの推定値

\bar{y} : y_i の平均値

n :標本数(=4)

p :独立変数の数(=2)

【0028】

で表される。有効屈折率 n_{eff} と表面粗さRzとの関係について、測定データ及びデータフィッティングにより得られた理論曲線を、縦軸を有効屈折率、横軸を表面粗さとした両対数のグラフにプロットすると、表面粗さが大きくなるに従って有効屈折率が増加する単調増加のグラフとなる。図7は、0.5THzの場合の結果を示しているが、各プロットがほぼ直線上に並ぶ関係にある。

40

少なくとも0.3THz~2.5THzのTHz波、平行溝2bの表面粗さRzが $1\mu\text{m}$ ~ $25\mu\text{m}$ の範囲内では、表面粗さRzが大きくなるほど有効屈折率 n_{eff} が大きくなる単調増加の関係になり、両者の間には一定の関係、つまり、表面粗さに対して有効屈折率が一意的に決定される関係が成立する。そのため、所望の有効屈折率を得るには表面粗さをどの程度にすればよいかの推測が可能になる。

【0029】

50

本発明の好適な実施形態について説明したが、本発明は上記の説明に限定されるものではない。

例えば、THz波を伝搬させる平行溝 2 b は直線状に限らず、一部又は全部が湾曲していてもよい。

また、平行平板導波路である平行溝 2 b に電磁波を集束して入力させる導入手段は、V溝に限らずロート状の溝又はその他先細の溝であればよく、また、溝以外にレンズによって集束させるようにしてもよい。

【産業上の利用可能性】

【0030】

本発明は、ミリ波帯、マイクロ波帯及びテラヘルツ波帯を含む領域（周波数 30 GHz ~ 30 THz : 10 mm ~ 10 μm）の電磁波に好適に適用が可能である。また、本発明は各種センシング装置やイメージング装置などに適用が可能である。

10

【図面の簡単な説明】

【0031】

【図1】本発明の位相速度制御構造の一実施形態にかかり、その構成を説明する概略平面図である。

【図2】平行溝の内表面の表面粗さを測定した結果である。

【図3】本発明の位相速度制御構造の効果を測定するための実験装置の一例である。

【図4】図3の実験装置を用いて得られた周波数と振幅透過率との関係を示すグラフである。

20

【図5】図3の実験装置を用いて得られた位相シフトと周波数との関係を示すグラフである。

【図6】図3の実験装置を用いて得られた有効屈折率 n_{eff} と周波数との関係を示すグラフである。

【図7】有効屈折率 n_{eff} と表面粗さ R_z との関係について、測定データ及びデータフィッティングにより得られた理論曲線を両対数のグラフにプロットした結果を示すグラフである。

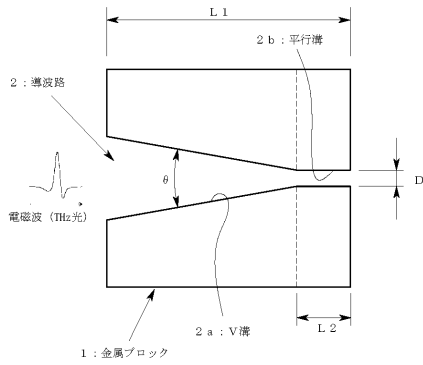
【符号の説明】

【0032】

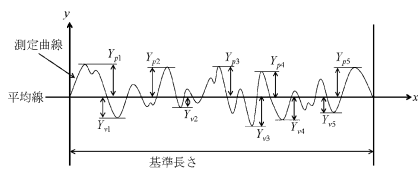
- 1 金属ブロック（位相速度制御構造）
- 2 導波路
- 2 a V溝（導入手段）
- 2 b 平行溝（平行平板導波路）

30

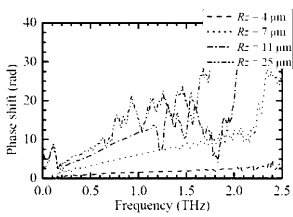
【図1】



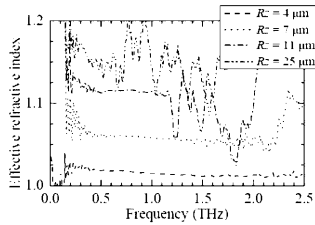
【図2】



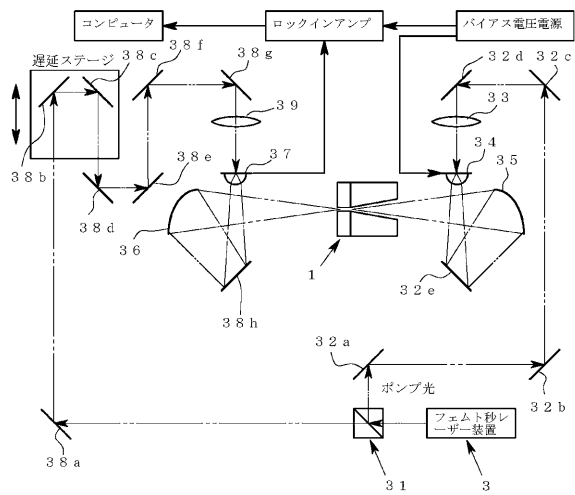
【図5】



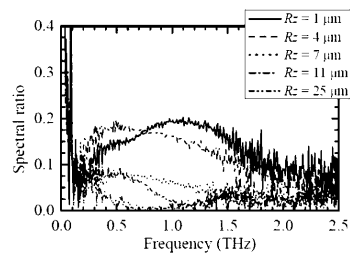
【図6】



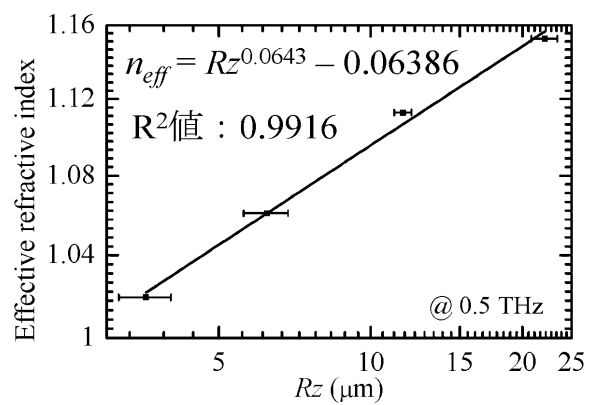
【図3】



【図4】



【図7】



フロントページの続き

- (72)発明者 竹嶋 大貴
福井県福井市文京3丁目9番1号 国立大学法人福井大学内
- (72)発明者 都築 聡
福井県福井市文京3丁目9番1号 国立大学法人福井大学内
- (72)発明者 山本 晃司
福井県福井市文京3丁目9番1号 国立大学法人福井大学内
- (72)発明者 栗原 一嘉
福井県福井市文京3丁目9番1号 国立大学法人福井大学内
- (72)発明者 古屋 岳
福井県福井市文京3丁目9番1号 国立大学法人福井大学内
- (72)発明者 桑島 史欣
福井県福井市学園3丁目6番1号 学校法人金井学園内

審査官 橘 均憲

- (56)参考文献 米国特許出願公開第2013/0107356 (US, A1)
特開2002-064312 (JP, A)
米国特許出願公開第2010/0135626 (US, A1)
竹嶋 大貴 Daiki Takeshima Daiki Takeshima, 平行平板導波路を用いたテラヘルツ波位相速度の表面粗さ依存性 Dependence of terahertz phase velocities of the surface roughness of the parallel plate waveguide, <第60回>応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 日本, 公益社団法人 応用物理学会, 2013年 3月11日, 04-203
Jiangquan Zhang, et al., Adiabatic compression of parallel-plate metal waveguides for sensitivity enhancement of waveguide THz time-domain spectroscopy, Applied Physics Letter, 米国, American institute of Physics, 2005年, 86/6, 061109-3, URL, <http://dx.doi.org/10.1063/1.1863439>

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01P3/00 - 3/20