

(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2020-112606

(P2020-112606A)

(43) 公開日 令和2年7月27日(2020.7.27)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G02F 1/225 (2006.01)	G02F 1/225	2K102
B82Y 20/00 (2011.01)	B82Y 20/00	

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 16 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2019-1417 (P2019-1417)</p> <p>(22) 出願日 平成31年1月8日 (2019.1.8)</p> <p>(出願人による申告) 平成27年度、国立研究開発法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業、チーム型研究 (CREST)、「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクス基盤技術」、「磁性-金属-半導体異種材料集積による待機電力ゼロ型フォトニックルータの開発」、「待機電力ゼロ型フォトニックルータに向けた各要素デバイスと異種材料集積チップの開発」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願</p>	<p>(71) 出願人 304021417 国立大学法人東京工業大学 東京都目黒区大岡山2丁目12番1号</p> <p>(74) 代理人 110001807 特許業務法人磯野国際特許商標事務所</p> <p>(72) 発明者 雨宮智宏 東京都目黒区大岡山二丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内</p> <p>(72) 発明者 田中真琴 東京都目黒区大岡山二丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内</p> <p>(72) 発明者 荒井滋久 東京都目黒区大岡山二丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内</p>
---	---

最終頁に続く

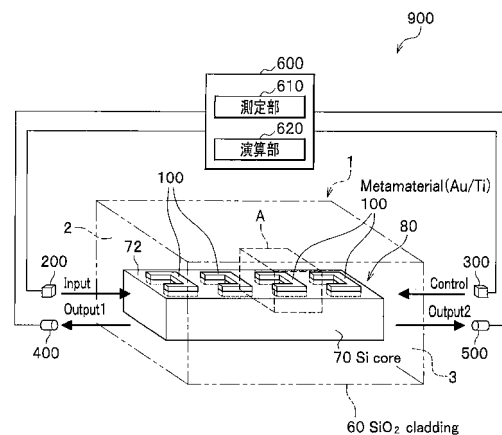
(54) 【発明の名称】 光機能デバイスの制御方法および制御装置

(57) 【要約】

【課題】 容易に所望の物性が得られる光機能デバイスの制御方法および制御装置を提供する。

【解決手段】 制御装置 900 は、光機能デバイス 1 に対して、一方向から信号波 (Input) を入射する信号波入射部 200 と、信号波と対向する制御波 (Control) を、光機能デバイス 1 に対して入射する制御波入射部 300 とを備えている。メタマテリアルを有する光機能デバイス 1 に対して、一方向から信号波を入力し、信号波とは、同じ方向または他の方向から信号波と同じ波長の制御波を光機能デバイスに対して入射する。そして、信号波と制御波とによって生じる合成波の腹または節の部分に合致するように複数のメタマテリアルからなる光アンテナ 100 がそれぞれ配置されている。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

メタマテリアルを有する光機能デバイスに対して、信号波を入力し、前記信号波と同じ波長の制御波を前記光機能デバイスに対して入射して、前記信号波と前記制御波とによる合成波の腹または節の部分に、前記メタマテリアルが配置されていることを特徴とする光機能デバイスの制御方法。

【請求項 2】

前記制御波は、前記光機能デバイスのうち、前記信号波が入射する一方の端面とは反対側に位置する他方の端面から信号波と同じ波長で、かつ反対方向に対向させて入射することを特徴とする請求項 1 に記載の光機能デバイスの制御方法。

10

【請求項 3】

前記制御波は、前記光機能デバイスのうち、前記信号波が入射する一方の端面と、同一の端面若しくは異なる端面から信号波と同じ波長で、かつ同一の方向若しくは異なる方向から入射することを特徴とする請求項 1 に記載の光機能デバイスの制御方法。

【請求項 4】

前記合成波の波長のうち、半周期の長さの整数倍毎に、複数の前記メタマテリアルが配置されていることを特徴とする請求項 1 ~ 3 のうち何れか一項に記載の光機能デバイスの制御方法。

【請求項 5】

前記制御波の位相を連続させて変更することを特徴とする請求項 1 ~ 4 のうち何れか一項に記載の光機能デバイスの制御方法。

20

【請求項 6】

前記信号波および前記制御波の入力による前記光機能デバイスからの反射光および透過光を計測することにより測定し、測定された測定値から、演算により前記光機能デバイスの透磁率 μ および誘電率 ϵ を求めることを特徴とする請求項 1 ~ 5 のうち何れか一項記載の光機能デバイスの制御方法。

【請求項 7】

前記演算は、前記光機能デバイスからの反射光および透過光の強さと、前記信号波および前記制御波の位相差とを予め設定された数式に代入することにより行われることを特徴とする請求項 6 に記載の光機能デバイスの制御方法。

30

【請求項 8】

メタマテリアルを有する光機能デバイスと、前記光機能デバイスに対して、一方向から信号波を入射する信号波入射部と、前記信号波とは、同じ方向または他の方向から前記信号波と同じ波長の制御波を前記光機能デバイスに対して入射する制御波入射部と、前記制御波入射部から入射される制御波の位相を制御して、前記信号波と前記制御波とによる合成波の腹または節の部分の位置を変更する制御部と、を備え、合成波の腹または節の部分に、前記メタマテリアルを配置することを特徴とする光機能デバイスの制御装置。

【請求項 9】

前記信号波と前記制御波とによって生じる前記光機能デバイスの反射光および透過光を測定する測定部と、前記測定部によって測定された測定値を予め設定された数式に代入して、前記光機能デバイスの透磁率 μ または誘電率 ϵ を求める演算部と、をさらに備えることを特徴とする請求項 8 に記載の光機能デバイスの制御装置。

40

【請求項 10】

制御波入射部は、前記信号波が入射する一方の端面とは反対側に位置する他方の端面から、信号波と同じ波長の制御波を 180 度反対方向に対向させて入射させる、ことを特徴とする請求項 8 または 9 に記載の光機能デバイスの制御装置。

【請求項 11】

50

制御波入射部は、信号波が入射する一方の端面と、同一の端面若しくは異なる端面から信号波と同じ波長で、かつ同一の方向若しくは異なる方向から制御波を入射させる、ことを特徴とする請求項 8 または 9 に記載の光機能デバイスの制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光機能デバイスの制御方法および制御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

自然界に無い新しい性質を有する材料として人工的に生み出されたのが「メタマテリアル」と呼ばれる微小金属パターンによる物質である。 10

「メタマテリアル」を実際に光機能デバイスとして利用するには、所望の特性をもつメタマテリアルを用いることが必要である。

しかし、メタマテリアルは一旦構造を決めると、その物性を変化させることは極めて難しい。

この問題の解決に向けた研究動向として、以下に示す「形状変化型」と「周囲変化型」との2つのアプローチが提案されており、現在、様々な試みがなされている。

「形状変化型」としては、非特許文献 1 に記載のある MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) などの技術を用いて、図 1 1 に模式的に示すメタマテリアルで形成された光アンテナ 1 0 0 a の構造を仮想線で示す光アンテナ 1 0 0 b のように変化させる方法がある。 20

構造を変化させる方法は、形状変化に伴う光アンテナ 1 0 0 a ~ 1 0 0 b の特性変化を視覚的かつ容易に予想できる。このため、精度良く所望のデバイス動作を得ることができる。

しかしながら、構造を変化させる方法では、複雑な MEMS 構造を作り込む必要がある。また、特性を変化させる速度が MEMS のスピードに律則される。このため、高速動作させる必要があるデバイスには適さないといった問題点がある。

一方、「周囲変化型」は、光アンテナ 1 0 0 の周囲環境を変化させる方法である。具体的には、図 1 2 に示すように、光アンテナ 1 0 0 の周囲に半導体や酸化物などの機能性材料 1 1 0 を配置し、その特性を変化させて光アンテナ 1 0 0 の特性の制御を行うものである。 30

周囲環境を変化させる方法では、機能性材料 1 1 0 として適当な物質を選択すれば、十分な高速動作を得ることができるといった利点がある（非特許文献 2 参照）。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献 1】Nature Nanotechnology . 8, 252 (2013).

【非特許文献 2】Optics Express 19, 3973 (2011).) (Nature Photon. 5, 499 (2011)) (Science 325, 1518 (2009)).

【発明の概要】 40

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、周囲環境を変化させる方法では、各種材料の特性変化を鑑みたメタマテリアルの設計は難易度が高く、精度良くデバイス特性を得ることが難しい。

【0005】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、容易に所望の物性が得られる光機能デバイスの制御方法および制御装置を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

前記した課題を解決するため、本発明による請求項 1 に係る光機能デバイスの制御方法 50

は、メタマテリアルを有する光機能デバイスに対して、一方向から信号波を入力し、信号波とは、同じ方向または他の方向から信号波と同じ波長の制御波を光機能デバイスに対して入射して、信号波と制御波とによる合成波の腹または節の部分に、メタマテリアルが配置されていることを特徴としている。

その他の手段については、発明を実施するための形態中にて説明する。

【発明の効果】

【0007】

本発明によれば、容易に所望の物性が得られる光機能デバイスの制御方法および制御装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

10

【0008】

【図1】本実施形態の光機能デバイスの制御方法に用いる制御装置で、メタマテリアルの構造を変化させる方法を示した模式図である。

【図2】本実施形態の光機能デバイスの制御装置で、メタマテリアルによって構成された光アンテナを有するユニットセルを拡大した図1中A部の模式図である。

【図3】本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、メタマテリアルを装荷したSi導波路の構成を説明する模式的な斜視図である。

【図4】本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、合成波の腹がメタマテリアル装荷部に合致する場合を示す波形図である。

【図5】本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、合成波の節がメタマテリアル装荷部に合致する場合を示す波形図である。

20

【図6】本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、位相差が π に近づくにつれて透磁率が1に近づく様子を示すグラフである。

【図7】本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、分散曲線の一例を示すグラフである。

【図8】本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、群屈折率変化の一例を示すグラフである。

【図9】本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、合成波の腹がメタマテリアル装荷部にあたる場合を示す模式図である。

【図10】本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、合成波の節がメタマテリアル装荷部にあたる場合を示す模式図である。

30

【図11】従来の光アンテナの特性を変えるため、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) などの技術を用いてメタマテリアルの構造を変化させる方法を示した模式図である。

【図12】従来の光アンテナの特性を変えるため、メタマテリアルの周囲環境を変化させる方法を示した模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0009】

以下、本発明の実施形態について図面を参照して詳細に説明する。

図1は、本発明の一実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置の構成の応用例の一つを示す図である。

40

本発明は、信号波とは異なる制御波を入射して、メタマテリアルを有する光機能デバイス1の特性を変化させる光機能デバイス1の制御方法およびその制御装置である。

すなわち、光機能デバイス1に対して信号波とは、同じ方向または異なる方向、例えば多方向から制御波を入射する。これらの信号波と制御波とにより合成される合成波の波長に合わせて、複数の光アンテナ100の位置を周期的に配置する。これにより、メタマテリアル装荷部と合成波(定在波)の腹または節の部分とが合致する。

そして、制御波の位相を調整して、信号波と制御波との位相差を変更することにより、合成波の腹または節の位置を移動させて、光機能デバイス1の透磁率 μ (または誘電率)を容易に連続的に変更することができる。

50

【 0 0 1 0 】

〔 制御装置 〕

まず、光アンテナ 1 0 0 を有する光機能デバイス 1 の制御方法を具現化した制御装置 9 0 0 の構成について説明する。

図 1 に示すようにメタ材料を有する光機能デバイス 1 は、光アンテナ 1 0 0 が設けられた直線状の光導波路 8 0 を設けている。そして、制御装置 9 0 0 は、光導波路 8 0 の物性である透磁率 μ (または誘電率) を容易に連続的に変更する制御を行う。

制御装置 9 0 0 は、光機能デバイス 1 に対して、一方向から信号波 (Input) を入射する光源としての信号波入射部 2 0 0 と、信号波と同じ波長の制御波 (Control) を入射する光源としての制御波入射部 3 0 0 とを備えている。

10

本実施形態では、制御波入射部 3 0 0 は、信号波が入射する一方の端面 2 とは反対側に位置する他方の端面 3 から、信号波と同じ波長の制御波を 1 8 0 度反対方向に対向させて入射する。光機能デバイス 1 の光導波路 8 0 では、信号波の光軸と制御波の光軸とが一致して、合成波を生じる。

【 0 0 1 1 】

このように構成された制御装置 9 0 0 では、信号波と制御波とによる合成波の腹の部分に合致する位置となるように、制御対象となる光機能デバイス 1 のメタ材料である光アンテナ 1 0 0 が配置される。光機能デバイス 1 は、複数の光アンテナ 1 0 0 を合成波の半波長と同じ間隔を置いて複数配置されている。また、光アンテナ 1 0 0 の形状が合成波の波長で共振する共振周波数となるように形成されている。これにより、複数の光アンテナ 1 0 0 に同時に合成波の腹または節の部分を合致させて、共振させることができる。

20

本実施形態の合成波の波長は、1 5 2 0 ~ 1 5 8 0 nm の範囲となるように設定されている。そして、複数の光アンテナ 1 0 0 は、合成波の波長のうち半周期の長さの整数倍毎に等間隔となるように一列に配置されている。

【 0 0 1 2 】

このうち、信号波入射部 2 0 0 は、内部に光源を有していて、光機能デバイス 1 の一方の端面 2 に対向して配置されている。そして、信号波入射部 2 0 0 は、信号波入射部 2 0 0 に設けられた光源の発光により、一方の端面 2 から信号光を光導波路 8 0 内に入射する。

【 0 0 1 3 】

また、制御波入射部 3 0 0 は、内部に光源を有していて、光機能デバイス 1 の他方の端面 3 に対向して配置されている。そして、制御波入射部 3 0 0 は、制御波入射部 3 0 0 に設けられた光源の発光により、他方の端面 3 から制御光を光導波路 8 0 内に入射する。

30

【 0 0 1 4 】

さらに、制御装置 9 0 0 は、制御部 6 0 0 を備えている。制御部 6 0 0 は、信号波入射部 2 0 0 と、制御波入射部 3 0 0 とをそれぞれ接続している。なお、信号波入射部 2 0 0 および制御波入射部 3 0 0 の光源を同一の光源を用いるように構成してもよい。

制御部 6 0 0 は、制御波入射部 3 0 0 から入射される制御波の位相を制御して、信号光と同じ波長でかつ同位相 (= 0 °) から逆位相 (= 1 8 0 °) まで連続して変更することが可能となるように構成されている。

40

そして、制御部 6 0 0 は、制御波の位相を変更することにより、信号波と制御波とが合成された合成波の腹または節の部分の位置を変更することができる。

制御部 6 0 0 は、位相を変更する際、制御光の波長を連続させて変更して、同位相から逆位相まで連続させて変更させるように構成してもよい。この場合、波長が多少変動しても、波長の変動量と比べて充分、光アンテナ 1 0 0 を大きく設定することにより、波長の変動の影響を受けにくくなるように設定されている。

【 0 0 1 5 】

制御部 6 0 0 は、測定部 6 1 0 と、演算部 6 2 0 とを備えている。また、制御部 6 0 0 は、プログラム等を保持する図示しない記憶部等をさらに備えてもよく、一部をネットワーク上に配置してもよい。

50

このうち、測定部 610 には、第 1 受光部 400 が接続されている。第 1 受光部 400 は、入力波と制御波とによって生じる合成波（定在波）により変化した光機能デバイス 1 の作用に基づく反射光（Output 1）を一方の端面 2 から出射される光によって測定する。

また、測定部 610 には、光機能デバイス 1 を挟んで、第 1 受光部 400 と対向するように設けられた第 2 受光部 500 が接続されている。第 2 受光部 500 は、入力波と制御波とによって生じる合成波により変化した光機能デバイス 1 の作用に基づく透過光（Output 2）を他方の端面 3 から出射される光によって測定する。

【0016】

さらに、演算部 620 は、プロセッサおよびメモリ等を用いて構成されている。演算部 620 は、測定部 610 で測定された測定値から、光機能デバイス 1 の透磁率 μ または誘電率 ϵ を求める演算を行うように構成されている。反射光および透過光を用いた透磁率 μ および誘電率 ϵ の求め方については後述する。

【0017】

[光機能デバイス]

図 1 に示すように、光機能デバイス 1 は、複数の光アンテナ 100 を前記した一定間隔で整列させた光導波路 80 を備えている。

光導波路 80 は、二酸化ケイ素（ SiO_2 ）で構成されるクラッド 60 に囲まれていて、光を伝搬するシリコンコア 70 を有している。シリコンコア 70 は、光導波路 80 内の信号光の主進行方向に長い長方形形状を呈している。

【0018】

そして、光導波路 80 内のシリコンコア 70 の上面部 72 には、負のグースヘンシェンシフトを示すメタマテリアルである光アンテナ（リング状共振器）100 が複数個、前記したように等間隔で配列されている。

光アンテナ 100 は、等間隔の配置および合成波の腹の部分の位置の変更により、最も効率よくスローライト効果を発揮する状態（リリース状態：図 4）にもなり、かつ、スローライト効果がほとんど発揮されない状態（トラップ状態：図 5）にもなる。

このうち、トラップ状態では、グループインデックスの反射率がほぼ一定となり、メタマテリアルの光アンテナ 100 が設けられていないシリコンコアのみの光導波路 80 を計測した状態に近づく（図 8 参照）。

【0019】

[光アンテナ]

図 2 に示すように、本実施形態の光アンテナ 100 は、コ字型（円形環状で構成する場合は C 字型）の金属（Au/Ti）、すなわち、矩形環状のメタマテリアルで構成されている。

光アンテナ 100 の矩形環状体の幅は、例えば $q = 50 \text{ nm}$ である。また、高さ（厚さ）は、例えば $d = 50 \text{ nm}$ である。このように、矩形環状体の縦横比が例えば $1 : 1$ （ $x : x$ ）となるように構成されている。光アンテナ 100 は、構成する金属の材質によって、共振周波数の特性に大きな影響を及ぼさない。

これに対して、光アンテナ 100 では、矩形環状体の縦横の長さ（ l, w ）、すなわち、大きさ（外形寸法）と、切欠きの長さとは、共振周波数の特性に影響を及ぼす。ここでは、各光アンテナ 100 の外形寸法や切欠きの幅を揃えることで、共振周波数の特性に大きく影響を与えないようにしている。

【0020】

また、縦横の長さ（ l, w ）は、後述する入光する信号光および逆位相の制御光の波長に比べて、各光アンテナ 100 の特性に乖離が生じないように充分短く設定されている。たとえば、本実施形態の光アンテナ 100 の縦横の長さ（ l, w ）は、 $150 \times 150 \text{ nm}$ 程度である。これにより、波長が多少変動しても、制御光の波長（例えば、約 $1520 \sim 1580 \text{ nm}$ 、中心波長 1550 nm 程度）と比べて充分小さく、かつ、波長の変動と比べて充分の大きいため、スローライト効果への影響が少ない。

【0021】

10

20

30

40

50

図 1 に示すように、光導波路 8 0 のうち、横長の直方体形状の両端に位置する一方の端面 2 からは、信号波入射部 2 0 0 の信号光が入射し、他方の端面 3 からは、制御波入射部 3 0 0 の制御光が入射する。

そして、光アンテナ 1 0 0 の作用による反射波 (Output 1) および透過波 (Output 2) は、各一方の端面 2 と他方の端面 3 とからそれぞれ放出される。

制御装置 9 0 0 の信号波入射部 2 0 0 側には、光機能デバイス 1 で反射した光 (Output 1) を受光する第 1 受光部 4 0 0 が設けられている。また、制御波入射部 3 0 0 側には、光機能デバイス 1 を通過した光 (Output 2) を受光する第 2 受光部 5 0 0 が設けられている。

そして、端面 2 から放出された光は、第 1 受光部 4 0 0 に入光して測定される。また、端面 3 から放出された光は、第 2 受光部 5 0 0 に入光して測定される。

10

【 0 0 2 2 】

本実施形態の制御部 6 0 0 は、制御光の波長を信号光の波長と同じとするとともに、制御光の位相を変更する制御を行っている。このため、位相を調整された制御光は、信号光との合成波によって生じる振幅の腹と節との位置を変化させることができる。

また、信号光および制御光は、光デバイス 1 の特性を変化させる。反射光および透過光は、変化した光デバイス 1 の特性を反映している。

そこで、第 1 受光部 4 0 0 に入光した反射波と、第 2 受光部 5 0 0 に入光した透過光との測定値を S パラメータ = 出力光 / 入射光として用いて、演算部 6 2 0 は、光機能デバイス 1 の透磁率 μ および誘電率 を演算する。

20

【 0 0 2 3 】

[透磁率 μ および誘電率 の演算]

次に、S パラメータ = 出力光 / 入射光から、透磁率 μ および誘電率 を導く演算について、数式 1 ~ 数式 5 を参照しつつ説明する。

数式 1 ~ 数式 5 では、演算に必要とされるパラメータは、出力光の強度 S_{11} である反射光のスペクトルと、出力光の強度 S_{21} である透過光のスペクトルと、制御光および信号光の位相差 である。

以下、演算部 6 2 0 による演算について詳述する。

まず、複素屈折率 n を求めるため、強度 S_{11} , S_{21} , ならびに位相差 を数式 1 に代入する。

30

【 数 1 】

$$n = \frac{1}{kd} \sin^{-1} \left\{ \frac{2i(S_{11} + e^{i\phi})}{\alpha S_{21}} \right\}$$

$$= \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left\{ \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2(1 + e^{i\phi})(1 - e^{i\phi})}{2S_{21}(1 + e^{i\phi}S_{11})} \right\}$$

n :複素屈折率 ϕ :位相差 d :有効膜厚 k :波数

40

【 0 0 2 4 】

数式 1 で使用される は、次の数式 3 で求められる。

【 数 3 】

$$\alpha = \frac{\mu}{n} (1 + e^{i\phi})^2 - \frac{n}{\mu} (1 - e^{i\phi})^2$$

次に、複素インピーダンス Z を求めるため、強度 S_{11} , S_{21} , ならびに位相差 を数式 2 に代入する。

【数 2】

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - (1 - e^{i\theta})^2 S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - (1 + e^{i\theta})^2 S_{21}^2}}$$

Z:複素インピーダンス

【0025】

得られた複素屈折率 n と複素インピーダンス Z とから数式 4 を用いて、誘電率 ε が求められる。 10

【数 4】

$$\varepsilon = \frac{n}{Z}$$

 ε :誘電率

得られた複素屈折率 n と複素インピーダンス Z とから数式 5 を用いて、透磁率 μ が求められる。 20

【数 5】

$$\mu = nZ$$

 μ :透磁率

このように、本実施形態の制御装置 900 は、演算部 620 にて、測定部 610 の第 1 受光部 400 および第 2 受光部 500 で測定された光量と、制御光および信号光の位相差とを、予め記憶部に記憶されている数式 1 ~ 数式 5 に代入して上記演算を行うことにより、光機能デバイス 1 の誘電率 ε と透磁率 μ とを求めることができる。

【実施例】

図 3 は、本光機能デバイスの制御方法を用いてメタ材料を装荷した一次元のシリコン (Si) 導波路 700 を有する一実施例の構成を示すものである。 30

シリコン導波路 700 は、実施形態で示した光機能デバイス 1 の反対側に位置する他方の端面 3 に、位相遷移装置 (Phase Shifter) 800 を装着している。

位相遷移装置 (Phase Shifter) 800 は、制御光の位相を調整するため、図 3 に示すようにシリコンコア 70 のうち、制御波入射部 300 からの入射光が入射される端面 3 に、縦列に加えられている。このため、シリコン導波路 700 は、位相遷移装置 800 内の光導波路と直線上に並べられて、内部を通過する光の光軸が一致するように配置される。

【0026】

【特性の制御】

信号波入射部 200 および制御波入射部 300 の各光源の発光により、信号光は、一方の端面 2 から、制御光は、位相遷移装置 800 を通過して、他方の端面 3 から、それぞれシリコン導波路 700 内に入射する。制御光は、位相遷移装置 800 を通過する際、信号光と同じ波長でかつ逆位相となるように調整される。 40

【0027】

位相遷移装置 800 は、光機能デバイス 1 と同様に構成された位相遷移部 101 と、位相遷移部 101 のクラッド 60 の上に設けられた加熱装置 (ヒーター) 105 と、加熱装置 105 に接続される電源 103 と、スイッチ制御部 104 とを備えている。このうち、スイッチ制御部 104 は、制御部 600 等と接続されている。スイッチ制御部 104 は、デューティ制御等により通電流量を可変させてもよい。

【0028】

50

加熱装置 105 は、電源 103 からの電力供給を受けて、発熱する発熱体（例えば、ニクロム線（登録商標）等）によって構成されている。

そして、スイッチ制御部 104 が開かれて、加熱装置 105 の発熱体が通電により発熱すると、位相遷移部 101 のクラッド 60 を介してシリコンコア 70 に設けられた光アンテナ 100 が加熱される。

光アンテナ 100 は、加熱による温度上昇に応じて、通過する制御光の位相を変更することが出来る。

【0029】

[制御光の調整]

制御装置 900 では、制御部 600 が、前記したように制御光の位相を調整することで合成波の節（node）および腹（antinodes）の位置を変化させ、それに伴って光とメタマテリアルの相互作用強度を動的に制御し、メタマテリアルの特性（誘電率と透磁率 μ ）とを変化させる。

10

光機能デバイス 1 内では、一方の端面 2 から入射された信号波と、他方の端面 3 から入射された制御波とが合成されて合成波が形成される。

この際、位相遷移部 101 の加熱により他方の端面 3 から入射される制御波は、位相遷移部 101 の加熱により、光の位相が変更されている。このため、合成波の腹と節との位置を調整することができる。

【0030】

図 4 に示すように、制御光の位相が信号光と同じであった場合、合成波の腹がメタマテリアルの中心に合致する。このため、信号光には、メタマテリアルが持つ光学特性が強く現れる。

20

たとえば、位相が $+0$ [rad] で、合成波の腹がメタマテリアル装荷部に合致する場合、光アンテナ 1 の共振によりスローライト効果が強くなる。

【0031】

一方、図 5 に示すように、制御光の位相が信号光に対してずれていた場合、合成波の節がメタマテリアル装荷部の中心にあたるので、光アンテナ 1 の共振は、減少もしくは、共振しなくなり、光の特性は純粋な Si 導波路を強く反映したものになる。

たとえば、位相が $+$ [rad] で、合成波の節がメタマテリアル装荷部にあたる場合、スローライト効果が弱くなる。

30

このように、位相操作を加えた制御光を用いて、合成波の節の位置を調節する。これによりメタマテリアルとの相互作用量を操作することが可能となり、メタマテリアルの特性（誘電率と透磁率 μ ）を動的に制御することができる。

【0032】

図 6 は、本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置を用いて、シミュレーションした結果を示し、位相差が に近づくと透磁率が 1 に近づく様子を示すグラフである。

図 6 では、位相差が に近づくと透磁率が 1 に近づいている。このため、制御光の位相を調整することによってメタマテリアルの制御が行えることが確認された。

40

【0033】

図 7 は、本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、分散曲線の一例を示すグラフである。

図 7 では、メタマテリアルが共振して屈折率が直線にならず、分散している。

すなわち、メタマテリアルは、共振（ $3.6 \sim 3.9 / c$ 付近参照）すると、屈折率が分散して波長に依存しない特性を有していることが分かる。

また、光機能デバイス 1 の一方の端面 2 から信号波入射部 200 の入光する信号光とは、逆位相の制御光が他方の端面 3 から光機能デバイス 1 内に入光すると、スローライト効果が減少して、共振周波数付近での不連続性が消失して、直線的になる（白抜き丸印参照）。

50

【0034】

詳しくは、図7の左上に示される斜めのライトライン(LightLine(SiO_2))は、二酸化ケイ素の分散曲線を表す。また、図7の右下に示される斜めのライトライン(LightLine(Si))は、シリコンの分散曲線を表す。光導波路は、シリコンと酸化シリコンとによって形成されているため、これらの物質が混ざり合った物質の屈折率にて光は進む。

そして、ライトラインでは、ある光の波長を決めると、屈折率も一意に決まる。

【0035】

これに対して、メタ材料を有する光機能デバイス1では、ある波長の光に対しては、屈折率が分散して波長に依存しない群屈折率を取るという特性を有している。

その周波数に依存する屈折率が1.5~3.5等で固定されると、直線として表される。

10

すなわち、ここでは、反対側から半波長位相をずらした制御光を入射して、群屈折率の変化を弱める。

これにより、図7中白抜き丸印に示すように、共振周波数付近での不連続性が消失して、直線的な分散曲線となる。

【0036】

図8は、図7のデータを群屈折率変化として示すグラフである。この図8では、縦軸は、グループインデックスであり、また横軸は、波長である。グループインデックスは、高ければ高いほど、スローライト効果が強いことを示している。

ここでは、光機能デバイス1に入射した信号光により1.6~1.7(nm)に群屈折率が集まっていることがわかる(リリース状態)。

20

また、例えば、制御光が反対側の他方の端面3から、光機能デバイス1内に入光すると、メタ材料による群屈折率変化が弱まり、白抜き丸印に示すようにグループインデックスは、ほぼ一定となることが分かる(トラップ状態)。

この状態は、メタ材料が設けられていない光導波路の特性と近似する。

【0037】

図9は、本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、合成波の腹がメタ材料装荷部に合致する状態を示す模式図である。

図9では、実線で描かれた丸印4は、合成波の腹に相当し、光アンテナ100の位置と合致する。二点鎖線で描かれた丸印5は、合成波の節に相当し、隣接する光アンテナ100,100の間の位置に存在している。

30

このため、図9に示す状態では、メタ材料によるスローライト効果が最も強く発揮される(リリース状態)。

【0038】

この状態では、合成波の節に相当し、二点鎖線の丸印5は、光アンテナ100を配置する必要が無い。そのため、従来のように密集させて光アンテナ100を配置することによりスローライト効果を向上させるものに比して、配置効率が良好である。

【0039】

図10は、本実施形態に係る光機能デバイスの制御方法および制御装置で、合成波の節がメタ材料装荷部に合致する状態を示す模式図である。

40

図10では、二点鎖線の丸印5が合成波の節に相当し、各光アンテナ100の位置と合致する。そして、実線の丸印4は、合成波の腹に相当し、光アンテナ100,100の間の位置に存在している。

このため、図10に示す状態では、メタ材料によるスローライト効果がほとんど発揮されない(トラップ状態)。

【0040】

上述してきたように、本実施形態の光機能デバイスの制御方法および制御装置では、制御光を用いることで、デバイス自体(光アンテナ100)に手を加えることなく、高速動作が可能となる。このため、従来のMEMSのようなスピードに律則されるといった制約がない。

50

さらに、電氣的に制御光の位相を瞬時に変えることができるので、高速でスローライト効果の強弱を変更可能である。

【0041】

また、全てのメタマテリアルに対して汎用性がある。このため、従来の周囲環境を変化させる方法のように、各種材料の特性変化を鑑みながらメタマテリアルを設計し、精度良くデバイス特性を得るために高度な技術が必要とならない。

そして、制御光の位相を変更することにより、連続的に光アンテナ100の特性を制御することが可能となる。このため、容易に良好な精度の制御を行なえる光機能デバイスの制御方法および制御装置が提供される。

【0042】

しかも、本実施形態の光機能デバイスの制御方法および制御装置では、デバイス自体（光アンテナ100）に手を加えることなく、「周囲変化型」と同等若しくはそれ以上の高速動作が可能となる。また、従来のMEMSなどの「形状変化型」の技術のように、特性変化の速度がMEMSのスピードに律則されるといった制約がなく、高速動作させる必要があるデバイスとして用いて好適である。

ここでは、加熱装置105を用いて制御光の位相を変更しているが特にこれに限らず、たとえば、制御光の位相を連続して制御できるものであれば、例えば電氣的に位相を変更する等、どのような構成で位相を変更してもよく、この場合、さらに高速に位相差を変更して、光アンテナ100の特性を制御することが可能となる。

【0043】

また、合成波によるメタマテリアルの制御は、メタマテリアルを有する光機能デバイス1に対して汎用性がある。このため、従来の周囲環境を変化させる方法のように、各種材料の特性変化を鑑みながらメタマテリアルを設計し、精度良くデバイス特性を得るために高度技術が必要とされない。

【0044】

そして、導波路光学系では、将来の超高速・大容量光ネットワークを実現するために、高効率かつ低遅延で処理可能な光パケットスイッチが求められている。

一般に、光ファイバ遅延線を利用した光バッファを採用し、異なる経路から同時に到着する光パケットの衝突を避けるものも知られている。このような方式では、遅延時間を本発明のように連続的に変化させることが出来ない。

このため、固定時管長の光バッファ装置を採用しているが、このような光バッファ装置は、装置そのものが大型化するという問題がある。

これに対して本発明の光機能デバイスの制御方法および制御装置900を導波路光学系に用いることにより、連続した光のトラップとリリースとが可能となり、小型で高効率な光バッファとして用いて好適である。

【0045】

以上、図面を参照して、本発明の実施の形態を詳述してきたが、具体的な構成は、この実施の形態に限らず、本発明の要旨を逸脱しない程度の設計の変更は、本発明に含まれる。上述した実施形態は、本発明を理解しやすく説明するために例示したものであり、必ずしも説明した全ての構成を備えるものに限定されるものではない。すなわち、ある実施形態の構成の一部を他の実施形態の構成に置き換えることが可能である。また、ある実施形態の構成に他の実施形態の構成を加えることも可能である。さらに、各実施形態の構成の一部について削除し、若しくは他の構成の追加・置換をすることが可能である。上記実施形態に対して可能な変形は、たとえば以下のようなものである。

【0046】

すなわち、実施形態および実施例では、光機能デバイス1の反対側の他方の端面3から、一つの制御光を信号光と対向するように入射しているが特にこれに限られない。

たとえば、制御光は、異なる光源によって複数の方向から入射するように構成されてもよく、入射角度や光量が特に限定されるものではなく、信号波と制御波とによる合成波の腹または節の部分にメタマテリアルが配置されていれば、制御光の入射される方向が2次

10

20

30

40

50

元若しくは3次元の何れの方法から入射されてもよい。

【0047】

そして、メタマテリアルの間隔は半波長ごとでなくてもよく、定在波が信号波および制御波の合成波で出来るものであれば、一波長、 1.5 波長、もしくは二波長以上等であってもよく、合成波の腹と一致する位置に配置されていけばよい。

この場合、メタマテリアルを合成波の波長に合わせることで、ON, OFF制御が行えるため、配列されるメタマテリアルの数を従来に比して減少させる。

【0048】

また、上記実施形態において説明した各処理のうち、自動的に行われるものとして説明した処理の全部または一部を手動的に行うこともでき、あるいは、手動的に行われるものとして説明した処理の全部または一部を公知の方法で自動的に行うこともできる。この他、上述文書中や図面中に示した処理手順、制御手順、具体的名称、各種のデータやパラメータを含む情報については、特記する場合を除いて任意に変更することができる。

10

【0049】

さらに、図示した各装置の各構成要素は機能概念的なものであり、必ずしも物理的に図示の如く構成されていることを要しない。すなわち、各装置の分散・統合の具体的な形態は図示のものに限られず、その全部または一部を、各種の負荷や使用状況などに応じて、任意の単位で機能的または物理的に分散・統合して構成することができる。

【0050】

そして、上記の各構成、機能、処理部、処理手段等は、それらの一部または全部を、例えば集積回路で設計する等によりハードウェアで実現してもよい。また、上記の各構成、機能等は、プロセッサがそれぞれの機能を実現するプログラムを解釈し、実行するためのソフトウェアで実現してもよい。各機能を実現するプログラム、テーブル、ファイル等の情報は、記憶部としてのメモリや、ハードディスク、SSD (Solid State Drive) 等の記録装置、または、IC (Integrated Circuit) カード、SD (Secure Digital) カード、光ディスク等の記録媒体に保持することができる。

20

【符号の説明】

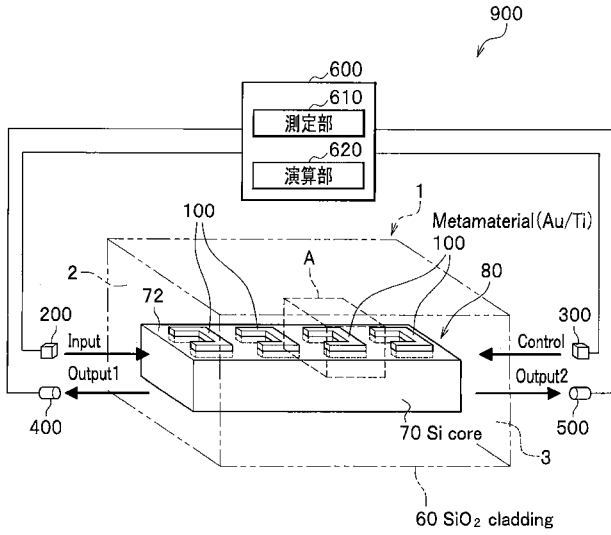
【0051】

- 1 光機能デバイス
- 2 一方の端面
- 3 他方の端面
- 60 クラッド
- 70 シリコンコア
- 72 上面部
- 80 光導波路
- 100 光アンテナ
- 101 位相遷移部
- 105 加熱装置
- 200 信号波入射部
- 300 制御波入射部
- 400 第1受光部
- 500 第2受光部
- 600 制御部
- 610 測定部
- 620 演算部
- 700 シリコン導波路
- 800 位相遷移装置
- 900 制御装置

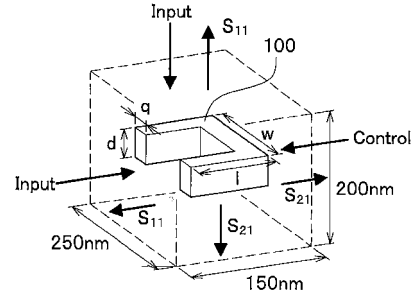
30

40

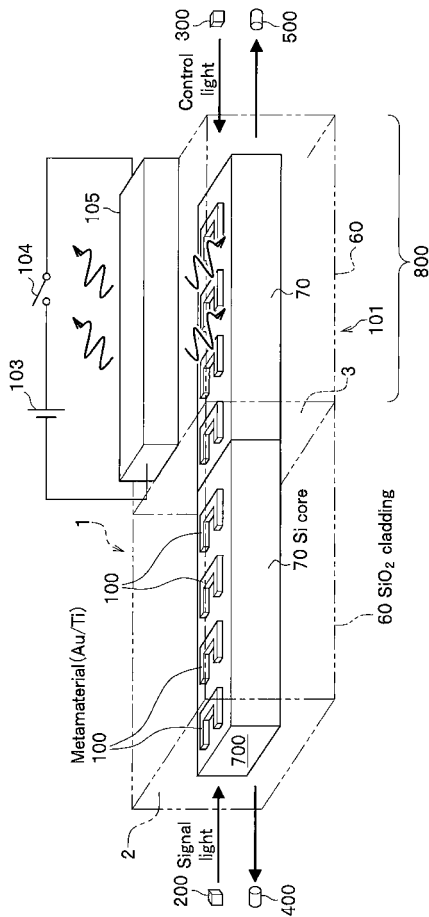
【 図 1 】



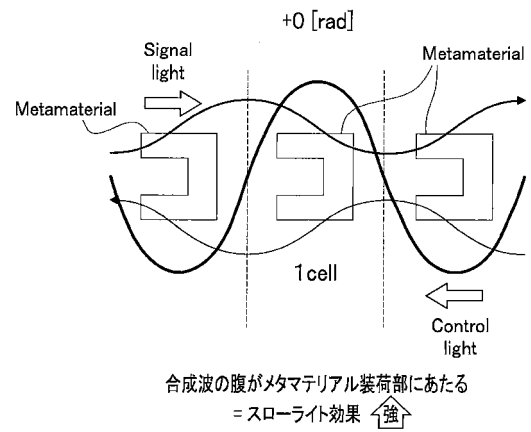
【 図 2 】



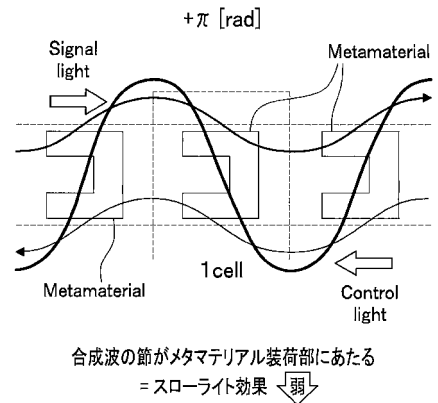
【 図 3 】



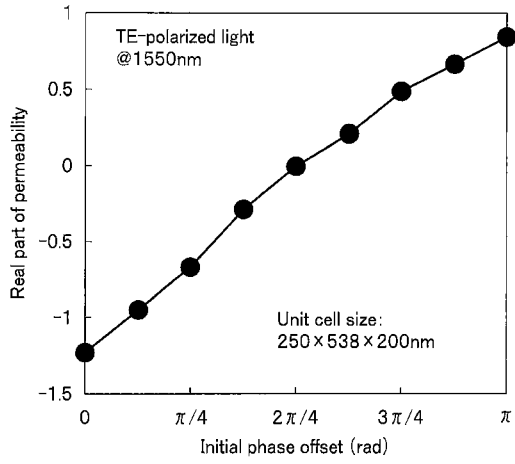
【 図 4 】



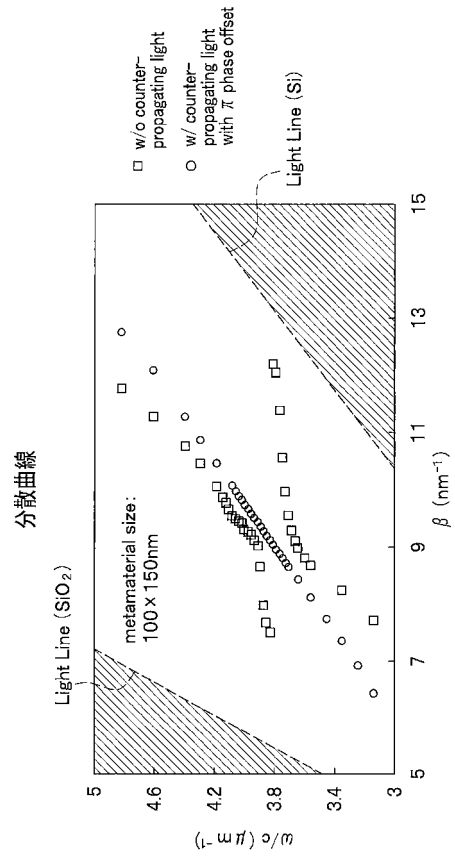
【 図 5 】



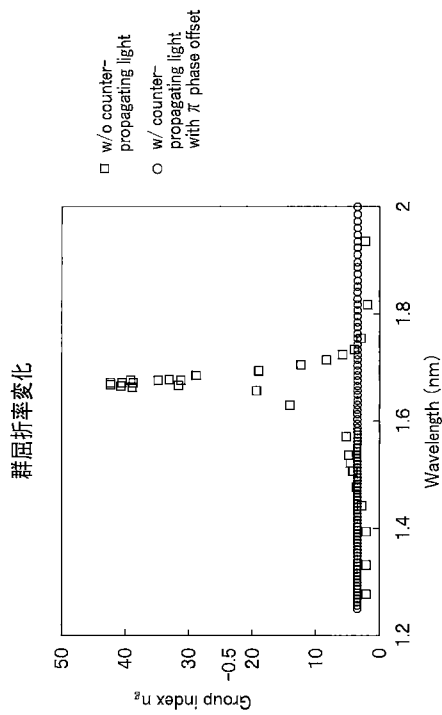
【 図 6 】



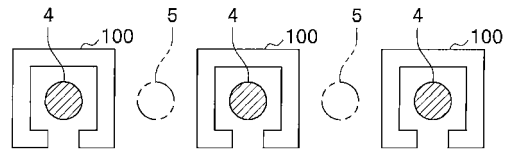
【 図 7 】



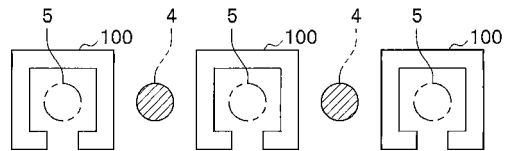
【 図 8 】



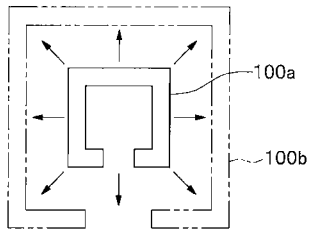
【 図 9 】



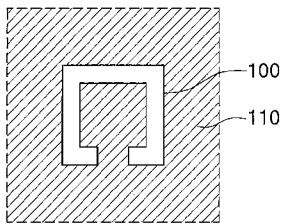
【 図 10 】



【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2K102 AA28 BA00 BB00 BB04 BC01 BC10 DA01 DA08 DA11 DB02
DC07 DD03 DD07 EA05 EA21 EA25