

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4952934号
(P4952934)

(45) 発行日 平成24年6月13日(2012.6.13)

(24) 登録日 平成24年3月23日(2012.3.23)

(51) Int.Cl.

G02F 1/01 (2006.01)

F 1

G02F 1/01

C

請求項の数 3 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2007-259923 (P2007-259923)
 (22) 出願日 平成19年10月3日 (2007.10.3)
 (65) 公開番号 特開2008-112151 (P2008-112151A)
 (43) 公開日 平成20年5月15日 (2008.5.15)
 審査請求日 平成21年12月28日 (2009.12.28)
 (31) 優先権主張番号 特願2006-274550 (P2006-274550)
 (32) 優先日 平成18年10月6日 (2006.10.6)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(73) 特許権者 000005821
 パナソニック株式会社
 大阪府門真市大字門真1006番地
 (74) 代理人 110000899
 特許業務法人 松田国際特許事務所
 (74) 代理人 100092794
 弁理士 松田 正道
 (72) 発明者 浜田 英伸
 大阪府門真市大字門真1006番地 松下
 電器産業株式会社内

審査官 林 祥恵

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】光変調器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

伝搬光が入射する導波路と、

前記導波路に隣接した、少なくとも前記導波路の伝搬方向に周期構造を有する金属層と、

前記金属層の前記導波路が隣接する面とは反対側の面に隣接し、電気光学効果を有する誘電体層とを備え、

前記導波路は、前記伝搬方向に垂直な少なくとも一つの方向についてマルチモード伝搬可能なマルチモード導波路であり、

前記周期構造の周期は、前記伝搬方向に沿った、前記伝搬光の波長の0.5倍より大きくなる1.5倍より小さい2次元周期である光変調器。

【請求項 2】

前記導波路に入射する前記伝搬光は、直線偏光である、請求項1に記載の光変調器。

【請求項 3】

前記伝搬光は、複数の波長で伝搬する波長多重光である、請求項1に記載の光変調器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光通信に使用される光変調器および光変調方法に関する。例えば、光を表面プラズモンとの相互作用で強度変調する光変調器および光変調方法に関する。

【背景技術】

【0002】

光通信における光変調方法として、光源を駆動電流で変調する直接変調方式と、伝搬光を外部物理量で制御された伝送路中の電子や分極などと相互作用させて変調する間接変調方式がある。

【0003】

直接変調方式は、光源の閾値電流と容量の存在により高速変調に限界があるため、高速変調を行わせるためには間接変調方式が用いられる。

【0004】

間接変調方式の代表例として、LiNbO₃やKTPなどの電気光学材料を利用して位相変調した直交偏波を干渉で強度変調に置換する透過型と、表面プラズモン（SP）とフォトンの共鳴を利用して透過光量を変調するモード結合型がある。 10

【0005】

ただし、透過型は、現在の材料では感度を実用レベルにするためには10 μm幅まで電極間隔を狭くするために導波路化が必要である。このような狭い電極間隔を実現するためには製造コストがかかり高価格になってしまって、コスト面においてモード結合型の方が有利である。

【0006】

モード結合型として、金属と絶縁体との界面に印加する高周波電圧によって絶縁体を共振して、金属と絶縁体との界面上に局在する表面プラズモンを発生させ、その絶縁体に隣接して設けられた導波路の伝搬光と結合させることにより伝搬光を変調するものがある（例えば、特許文献1参照）。 20

【0007】

図13は、特許文献1に開示されている表面プラズモン波変調器の側断面図を示している。

【0008】

この表面プラズモン波変調器110は、2つの金属電極118A、118Bと、この間に挟まれている光電材料120と、光電材料120の層に対向する被覆材料114の2つの層と、この2つの被覆材料114の層間に挟まれている単一モードの平らなウエーブガイド112より成る平らな多層構造である。また、金属電極118Aと被覆材料114の間には、薄いバッファ層116（0.1 μm）が設けられている。 30

【0009】

ウエーブガイド112は、ガラスなどの透明な材料で形成されており、その厚さは6 μmと極端に薄いので、その内部に生じる光波のモードは1つのみである。

【0010】

光電材料120は、ウエーブガイド112よりも屈折率の低い光電ポリマーで形成されており、金属電極118A、118Bに印加される電圧によって光電材料120の屈折率が変化する。

【0011】

表面プラズモン波変調器110内には、ウエーブガイド112によるコアモードと、金属電極118Aと光電材料120の層の間の界面における表面プラズモン波界面モードの2つの異なるモードが生じる。ガイドされたコアモードからのエネルギーは、2つのモードの相速度が合致したとき表面プラズモン波界面モードに共振的に結合される。この相合致条件は、電界を加えて光電材料120の屈折率を変化させることによって制御される。 40

【0012】

光波のTM偏光成分が表面プラズモン波界面モードに結合される。したがって、入射光がTM偏光されていれば、そのパワーは上記の相合致条件によって表面プラズモン波界面モードに結合される。したがって、出力パワーレベルは、光電材料120に加えられる電界によって制御される。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

しかしながら、従来の表面プラズモン波変調器では、絶縁体膜（光電材料120）と金属膜との界面上に局在する表面プラズモンを被変調光と共に鳴らすために、絶縁体膜として、被変調光が伝搬する導波路（ウエーブガイド112）よりも低屈折率材料を選択する必要があり、材料選択の幅が狭かった。導波路材料として一般に使用されるガラスや樹脂の屈折率（1.5程度）より低屈折率の絶縁体材料は非常に種類が少なく、また、電気光学定数の大きな高誘電体を使用できないという問題があった。

【0014】

10

以下に、この問題を説明するために、表面プラズモンと導波モードの共鳴による光変調メカニズムについて分散特性を使用して説明する。

【0015】

まず、誘電体層・金属層の2層構造において、誘電体層に光が入射する場合について説明する。

【0016】

図14(a)は、誘電体層・金属層の2層構造に光が入射した場合の断面模式図を示しており、図14(b)は、誘電体層・金属層の2層構造における誘電体層中のフォトンと表面プラズモンの分散特性を示している。

【0017】

20

誘電体層130中を進行するフォトンの分散曲線132の傾きは、図14(b)に示すように誘電体層130の屈折率で決まる直線となる。これに対し、誘電体層130と金属層131との界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線133は、フォトンの分散曲線132よりも常に波数が大きく、プラズマ周波数に漸近する曲線を描き、誘電体層のフォトンの分散曲線132とは交点を持たない。つまり、互いに隣接する誘電体のフォトンと金属界面上に局在する表面プラズモンは原理的に結合できない。

【0018】

次に、低屈折率誘電体層・金属層・高屈折率誘電体層の3層構造において、誘電体層に光が入射する場合について説明する。

【0019】

30

図15(a)は、低屈折率誘電体層・金属層・高屈折率誘電体層の3層構造に光が入射した場合の断面模式図を示しており、図15(b)は、低屈折率誘電体層・金属層・高屈折率誘電体層の3層構造における誘電体層中のフォトンと表面プラズモンの分散特性を示している。

【0020】

図15(b)に示すように、高屈折率誘電体層135から光が入射した場合、高屈折率誘電体層135中を進行するフォトンの分散曲線141と、高屈折率誘電体層135と金属層136との界面上に局在する表面プラズモン138の分散曲線142とは、交点を持たない。また、低屈折率誘電体層134から光が入射した場合を考えると、低屈折率誘電体層134中を進行するフォトンの分散曲線139と、低屈折率誘電体層134と金属層136との界面上に局在する表面プラズモン137の分散曲線140とは、交点を持たない。このように、2層構造の場合と同様に、互いに隣接する誘電体のフォトンと金属界面上に局在する表面プラズモンとは結合できない。

【0021】

40

一方、低屈折率誘電体のフォトンの分散曲線139は、高屈折率誘電体のフォトンの分散曲線141よりも、常に周波数が高く、また、低屈折率誘電体層と金属層との界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線140は、高屈折率誘電体層と金属層との界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線142よりも、常に周波数が高い。したがって、図15(b)に示すように、高屈折率誘電体のフォトンの分散曲線141と、低屈折率誘電体層と金属層との界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線140とは交点を持つ。すなわ

50

ち、3層構造の場合には、高屈折率誘電体のフォトンと、低屈折率誘電体層と金属層との界面上に局在する表面プラズモンが結合できる。

【0022】

図13に示した表面プラズモン波変調器110のウエーブガイド(導波路)112、金属電極118A、光電材料120が、それぞれ、図15(a)に示す3層構造の、高屈折率誘電体層135、金属層136、低屈折率誘電体層134に相当する。表面プラズモン波変調器110では、光電材料120にウエーブガイド112よりも屈折率が低い材料を用いているので、ウエーブガイド112中のフォトンが、光電材料120と金属電極118Aとの界面上に局在する表面プラズモンと結合できる。

【0023】

しかし、表面プラズモン波変調器110において、光電材料120にウエーブガイド112よりも屈折率が高い材料を用いた場合には、ウエーブガイド112中のフォトンの分散曲線が図15(b)の低屈折率誘電体のフォトンの分散曲線139に相当し、金属電極118Aとバッファ層116との界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線、および金属電極118Aと光電材料120との界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線が、それぞれ、図15(b)の低屈折率誘電体層と金属層との界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線140、および高屈折率誘電体層と金属層との界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線142に相当するので、これらの分散曲線は交点を持たない。つまり、この場合には、ウエーブガイド112中を進行してきた光は、金属電極118Aのいずれの面の表面プラズモンとも結合できない。

10

【0024】

したがって、特許文献1の表面プラズモン波変調器110の構成では、光電材料120としてウエーブガイド112よりも屈折率が低い材料を用いなければならない。

【0025】

一方、電気光学定数の大きな材料の方が、屈折率を変化させるのに印加する電圧を小さくでき、制御もしやすくなる。さらに、駆動電源も小さくできるので、小型化ができ、変調速度も速くできる。

【0026】

しかし、一般的に電気光学定数の大きな材料はガラスや樹脂よりも高屈折率材料であるため、特許文献1の表面プラズモン波変調器110の構成では、誘電体層(光電材料120)として電気光学定数の大きな材料を使用できなかった。

30

【0027】

本発明は、上述した従来の課題を解決するもので、金属膜に近接する材料の屈折率に依存せず、表面プラズモンと伝搬光が共鳴できる光変調器を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0028】

上述した課題を解決するために、第1の本発明は、伝搬光が入射する導波路と、前記導波路に隣接した、少なくとも前記導波路の伝搬方向に周期構造を有する金属層と、

前記金属層の前記導波路が隣接する面とは反対側の面に隣接し、電気光学効果を有する誘電体層とを備え、

40

前記導波路は、前記伝搬方向に垂直な少なくとも一つの方向についてマルチモード伝搬可能なマルチモード導波路であり、

前記周期構造の周期は、前記伝搬方向に沿った、前記伝搬光の波長の0.5倍より大きく1.5倍より小さい2次元周期である光変調器である。

【0030】

また、第2の本発明は、上記導波路に入射する前記伝搬光は、直線偏光である、上記第1の本発明の光変調器である。

【0032】

また、第3の本発明は、上記伝搬光は、複数の波長で伝搬する波長多重光である、上記

50

第1の本発明の光変調器である。

【発明の効果】

【0042】

本発明により、金属膜に近接する材料の屈折率に依存せず、表面プラズモンと伝搬光が共鳴できる光変調器を提供できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0043】

以下、本発明の実施の形態を、図面を参照しながら説明する。

【0044】

(実施の形態1)

10

図1(a)は、本発明の実施の形態1のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図であり、図1(b)は、このモード結合型光変調器の分散特性の概要図を示している。

【0045】

本実施の形態1のモード結合型光変調器は、図1(a)に示すように、2次元周期金属層2と、2次元周期金属層2の一方の面に隣接する電気光学効果を有する電気光学材料層3と、2次元周期金属層2のもう一方の面に隣接する導波路1で構成されている。

【0046】

なお、2次元周期金属層2が、本発明の、導波路の伝搬方向に周期構造を有する金属層の一例にあたり、電気光学材料層3が、本発明の、電気光学効果を有する誘電体層の一例にあたる。

20

【0047】

2次元周期金属層2は、面方向(面に平行な方向)に、伝搬光の波長程度の周期の2次元周期構造を有する金属層である。また、導波路1は、入力光5の波長に対して、2次元周期金属層2と電気光学材料層3との界面上に局在する表面プラズモン8と共に鳴可能な共鳴モード7を有する導波路である。また、電気光学材料層3は、LiNbO₃やKTPなどの高屈折率の電気光学材料で形成されており、外部変調電界4が印加される。2次元周期金属層2は、金や銀など、光変調器の金属層として一般的に用いられる材料で形成されている。なお、2次元周期金属層2の周期構造の具体例については、後述する。

【0048】

図14および図15を用いて上記で説明したように、誘電体中の伝搬光と表面プラズモンを共鳴させるためには、誘電体層-金属層-誘電体層の3層構造において、伝搬光が進行する誘電体よりも屈折率の低い誘電体を金属層を介して設ける必要があった。これは、金属層として、図13の表面プラズモン波変調器110の平らな金属電極118Aのように、周期構造を有しないものを用いていたためである。

30

【0049】

そこで、図15に示すような誘電体層-金属層-誘電体層の3層構造において、金属層の面方向に波長程度の周期構造、例えば凹凸や穴などを上述したように周期的に配列して形成すると、高屈折率の誘電体層と金属層間の界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線は、第1ブリルアンゾーン(-a < k < a、ここで、aは上記周期構造の周期である。)で表すことができる。このときのk > 0側(光の伝搬方向)の表面プラズモンの分散曲線42は、図1(b)に示すように、従来の平らな金属層を用いた場合と同様の正の相関関係を表す進行波の0次の分散曲線42aと、負の相関関係を表す後退波の1次の分散曲線42bとなる。

40

【0050】

なお、電気光学材料層3と2次元周期金属層2間の界面上に局在する表面プラズモン8の低周波数領域の正の相関関係の分散曲線の傾きは、電気光学材料層3の屈折率に逆比例し、高周波領域の負の相関関係の分散曲線は、低周波数領域の分散曲線に対して付随的(従属的)に決まる。

【0051】

一方、ガラスや樹脂などの低屈折率材料で構成される導波路1のフォトンの導波モード

50

の分散曲線 4 0 は、図 1 (b) に示すように、各導波モードにおいて、波数と周波数が正の線形の相関関係となる。モード次数に従ってその傾きは小さくなる。フォトンの導波モードの分散曲線 4 0 で示す直線 4 0 a と曲線 4 0 b は、最大の傾きと最小の傾きの導波モードの分散曲線を示している。他の導波モードの分散曲線は、これらの直線 4 0 a と曲線 4 0 b の間に存在する。

【 0 0 5 2 】

図 1 (b) より、フォトンの導波モードの分散曲線 4 0 のうちのフォトンの共鳴モードの分散曲線 4 1 は、電気光学材料層 3 と 2 次元周期金属層 2 間の界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線 4 2 と、伝搬光周波数 0 で共鳴点 4 3 を持つことができる。ここで、フォトンの共鳴モードの分散曲線 4 1 は、表面プラズモンの分散曲線 4 2 のうちの後退波の 1 次の分散曲線との間に共鳴点 4 3 を持つので、伝搬光は、進行方向と逆向きの表面プラズモン 8 と結合することになる。

10

【 0 0 5 3 】

なお、図 1 の表面プラズモン 8 に示す矢印の向きは、表面プラズモンの伝搬方向を示しており、図 1 では伝搬光と同じ「正方向」のみを示しているが、上記したように 2 次元周期金属層 2 に周期構造を形成させていることにより、表面プラズモン 8 は、「正方向」だけではなく、伝搬光と逆向きの「負方向」の向きにも生じる。そして、その「負方向」の向きの表面プラズモン 8 が、伝搬光と結合する。

【 0 0 5 4 】

ただし、伝搬光周波数 0 で表面プラズモン 8 とフォトンが所望の結合ができるように導波路 1 を設計する必要がある。

20

【 0 0 5 5 】

このように、表面プラズモン 8 が伝搬光と共に鳴る（共振する）ことにより、表面プラズモン 8 と結合するフォトンの導波モード（共鳴モード 7 ）は透過量が減るので、電気光学材料層 3 に外部電界を加えて屈折率を変化させることにより表面プラズモンの分散曲線 4 2 を共鳴点 4 3 近傍で変化させ、透過量を変化させることができる。したがって、図 1 (a) に示すように、外部変調電界 4 の電界強度に応じて、導波路 1 を透過した出力光 6 の光量を変化させることができる。

【 0 0 5 6 】

ここで、表面プラズモン 8 は TM モードなので、透過光量が変化するフォトンの共鳴モード 7 は共鳴する TM 波の導波モードのみである。しかし、一般的に必要な光変調度は 10 % 以下であるため、共鳴する波が特定の TM モードのみであっても、光変調度に必要な光量変化は十分に得られる。

30

【 0 0 5 7 】

図 2 は、直線偏光を入力光とした、本実施の形態 1 のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図である。図 1 (a) と同じ構成部分には、同じ符号を用いている。

【 0 0 5 8 】

図 2 に示すように、導波路 1 の伝搬光を直線偏光入力光 9 、例えば TM モードのみにすれば、その出力光 2 0 は、透過光量は減るが変調度は上がる。また、導波路 1 を伝搬する TM モードと TE モードの比を調整することで変調度を調整することも可能である。

40

【 0 0 5 9 】

図 3 は、本実施の形態 1 の他の構成のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図である。図 1 (a) と同じ構成部分には、同じ符号を用いている。

【 0 0 6 0 】

図 3 の光変調器は、電気光学材料層 3 を挟むように、2 次元周期金属層 2 と対向する位置に電極 1 0 を形成している。

【 0 0 6 1 】

このモード結合型光変調器は、2 次元周期金属層 2 と電極 1 0 間に外部変調電圧 1 1 を印加することにより、電気光学材料層 3 に印加される電界を変化させて、伝搬光の光量を変化させる。

50

【0062】

図3のような構成とすることにより、電気光学材料層3を薄くすることで、印加電界を高め、変調度を高めることができる。

【0063】

次に、2次元周期金属層2の周期構造の具体例（2次元周期金属層2a～2f）について説明する。

【0064】

図4(a)、図4(b)は、それぞれ、2次元周期金属層2の周期構造の一例（2次元周期金属層2a、2b）を示す斜視図、およびA-A断面図を示している。また、図4(c)～図4(f)は、その他の周期構造の一例（2次元周期金属層2c～2f）の断面斜視図を示している。図4(c)～図4(f)は、いずれも、図4(a)、図4(b)のA-A位置に相当する断面を含む斜視図を示している。なお、これらのいずれの図も、周期構造を説明するための図であり、周期構造の一部分のみを記載している。10

【0065】

2次元周期金属層2に形成される周期構造は、伝搬光と結合する側の表面プラズモンに影響を与える場所に形成されればよい。したがって、周期構造は、2次元周期金属層2の全面にわたって形成されていてもよいし、表面プラズモンに影響を与える場所であれば、その一部のみに形成されていてもよい。

【0066】

図4(a)は、2次元周期金属層2の表面に凸部を周期的に形成させた例を示しており、図4(b)は、2次元周期金属層2の表面に穴を周期的に形成させた例を示している。20

【0067】

図4(a)、図4(b)ともに、周期構造を正方格子状に形成させた例を示しているが、その他の周期構造であってもよい。ただし、対称性が高い方が表面プラズモンに与える効果が大きいので、正三角格子状や正方格子状に形成するのが望ましい。

【0068】

2次元周期金属層2が薄い場合には、例えば、図4(c)のように凹凸が両面に対応して形成されるような形状にしてもよい。また、図4(b)では、底部を有する穴201が形成された2次元周期金属層2bを示したが、これに限らず例えば、図4(d)に示すように貫通孔202を有する2次元周期金属層2dのような形状にしてもよい。また、図4(e)に示すように、2次元周期金属層2eの内部に、周期的に空洞203を設けた構造にしてもよい。30

【0069】

また、面方向に2次元の周期構造を形成させるのに限らず、光の伝搬方向に周期性があれば、1次元の周期構造であってもよい。例えば、図4(f)のように、光の伝搬方向にのみ周期性を持つような形状であってもよい。

【0070】

また、2次元周期金属層2に形成させる周期構造は、伝搬光と結合する側の表面プラズモンに影響を与えられれば、いずれの面に形成されていてもよいし、もちろん両面に形成されていてもよく、図4(e)のように内部に形成されていてもよい。40

【0071】

また、図1(b)では、伝搬光と結合できるのは表面プラズモンの1次の分散曲線、つまり $0.5 < a / \lambda < 1.0$ （ここで、 λ は光の波長である。）であるとしたが、感度は低下するが2次の分散曲線との結合も可能なので、 $0.5 < a / \lambda < 1.5$ でも良い。また、電気光学材料の屈折率が導波路よりも低い場合は、0次の分散曲線、つまり $a / \lambda < 0.5$ でも良い。

【0072】

従って、これらを総合すると、上記周期構造の周期aは、 $0.1 < a / \lambda < 1.5$ の条件を満たすのが望ましい。言い換えれば、本明細書で説明する「伝搬光の波長程度の周期」とは、伝搬光と結合する側の表面プラズモンに影響を与えられる長さの周期を言うが、50

伝搬光の波長の0.1倍～1.5倍程度の周期とするのが望ましい。

【0073】

表面プラズモンの分散曲線は、周期構造の形状によって変わる。また、2次元周期金属層2の材質や厚さによっても変わる。これらの条件の組み合わせにより、所望の伝搬光の波長に結合させることができる。

【0074】

以上に説明したように、本実施の形態1のモード結合型光変調器は、導波路1と電気光学材料層3の間の金属層を波長程度の周期構造を形成させた2次元周期金属層2としたことにより、電気光学材料層3として、一般的な導波路材料であるガラスや樹脂に比べて高屈折率のLiNbO₃やKTPなどの高い電気光学定数を有する高誘電体を使用できる。
なぜなら本実施の形態によれば、導波路1中の伝搬モードと共に鳴可能な、電気光学材料層3と2次元周期金属層2との界面上に局在する表面プラズモン8の高次モードが励振できるからである。つまり、本実施の形態によれば、電気光学材料層3として、光変調に最適な電気光学材料を選択できる。

【0075】

また、従来のモード結合型の光変調器の構成では、コア自身を高屈折率なLiNbO₃やKTPなどの高い電気光学定数を有する高誘電体とし、これらの高誘電体に直接光を通さなければならなかったが、本実施の形態1の光変調器では、高誘電体に直接光を通す必要が無いので、光学グレードを使用する必要がなく低価格化ができる。

【0076】

(実施の形態2)

図5(a)は、本発明の実施の形態2のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図であり、図5(b)は、このモード結合型光変調器の分散特性の概要図を示している。なお、図1と同じ構成部分には、同じ符号を用いている。

【0077】

本実施の形態2のモード結合型光変調器は、波長多重伝送に用いられる。導波路21の伝搬光に複数の波長を使用し、複数波長(1～n)を有する波長多重入力光12が入力され、複数波長(1～n)を有する出力光23を出力する。

【0078】

波長多重伝送の場合、波長毎に共鳴モード22が異なるため、図5(b)に示すように、フォトンの導波モードの分散曲線40のうちのフォトンの共鳴モードの分散曲線44が複数になるので、フォトンの共鳴モードの分散曲線44は、表面プラズモンの分散曲線42の、多重光の周波数範囲61である共鳴帯45上の複数の位置で交点を持つ。つまり、この場合、複数の波長(周波数)に対してフォトンと表面プラズモンが複数の共鳴点を持つ必要がある。

【0079】

しかし、それらの全ての波長に対して共鳴させることはできない。そのため、共鳴点に一致する波長の変調度は高く、共鳴点から離れるほど波長の変調度は低下するので、多重光間で変調度のバラツキが生じてしまう。このバラツキは、固有モード数を増加させて連続的に固有モードが生じるように導波路21の断面形状を大きく(マルチモード化)したり屈折率を高くするなど設計することで改善することができる。

【0080】

(実施の形態3)

図6(a)は、本発明の実施の形態3のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図であり、図6(b)は、このモード結合型光変調器の分散特性の概要図を示している。なお、図1と同じ構成部分には、同じ符号を用いている。

【0081】

本実施の形態3のモード結合型光変調器の導波路は、複数の固有モードを伝搬するマルチモード(MM)導波路35であり、MM導波路35の入射側にビーム変換部13を備えている。それ以外の構成は、図1に示した実施の形態1のモード結合型光変調器と同様で

10

20

30

40

50

ある。

【0082】

MM導波路35は、固有モード毎に方向が異なる複数の導波モードを有する。したがって、図6(b)に示すように、フォトンの導波モードの複数の分散曲線46のうち、伝搬光周波数0で表面プラズモンの後退波の1次の分散曲線42bと交点を持つ、フォトンの共鳴モードの分散曲線47が1つ存在する。尚、本発明の「マルチモード方向」は、例えば、伝搬方向に垂直な方向に対応している。

【0083】

有限長のMM導波路35内で全ての固有モードを、励振可能な範囲71で励振すれば、波数軸上(k空間上)で連続的に固有モードが得られる。ゆえに、本実施の形態3のモード結合型光変調器では、ビーム変換部13によって、MM導波路35に入力される入力光5のビーム径を、MM導波路35断面に比べて極小にし、空間周波数を多くして全固有モードを励振させている。

【0084】

図5に示す実施の形態2のような波長多重光を伝搬する構成の場合には、ビーム変換部によって入力光を極小にすることによる効果が非常に大きいので、そのような構成の場合にはビーム変換部を設けるのが望ましい。

【0085】

なお、全固有モード励振の場合、モード分散の問題が生じる。0次モードと高次モードの間では群速度分散が大きいので、0次などの低次モードのみを低減すれば、このモード分散の問題を緩和できる。

【0086】

ビーム変換部13によって小さく絞ったビームを、MM導波路35の光軸からずれた位置から入射させたり、MM導波路35の光軸に対して角度ズレさせて入射させることで、0次などの低次モードのみを低減できるので、モード分散の問題を緩和できる。

【0087】

(実施の形態4)

図7は、本発明の実施の形態4のモード結合型光変調器の構成を示す斜視図である。なお、図1と同じ構成部分には、同じ符号を用いている。

【0088】

本実施の形態4のモード結合型光変調器は、その側断面図は図1(a)と同様であるが、図1(a)に示す導波路1の層が、図7に示すように、クラッド15に囲まれたY分岐導波路14となっている。

【0089】

図7に示すように、2次元周期金属層25の一方の面に隣接して電気光学効果を有する電気光学材料層26が配置され、2次元周期金属層25のもう一方の面に隣接して、Y分岐導波路14およびクラッド15が配置されている。

【0090】

実施の形態1の光変調器と同様に、Y分岐導波路14は、ガラスや樹脂などの低屈折率材料で形成されており、電気光学材料層26は、LiNbO₃やKTPなどの高屈折率の電気光学材料で形成されている。

【0091】

Y分岐導波路14に入射した入力光5は、電気光学材料層26と2次元周期金属層25との界面上に局在する表面プラズモン28と結合することにより、外部変調電界4の変化に応じて透過量が変化するとともに、2つに分岐して、Y分岐導波路14の2つの出力部から光量が変調された出力光27が出力される。

【0092】

図7に示すようなY分岐導波路14を使用する場合、近接する2次元周期金属層25と電気光学材料層26の形状も、Y分岐導波路14と同じY字型の形状でよいが、その場合にはY分岐導波路14の形状に加工する工程が必要となるため、本実施の形態4では、図

10

20

30

40

50

7に示すように、Y分岐導波路14の周囲のクラッド15を含んだ単純な四角形の形状としている。

【0093】

2次元周期金属層25および電気光学材料層26の形状は、それぞれ、Y分岐導波路14の部分を含むような形状であれば、これ以外の形状であってもよい。

【0094】

このように、Y分岐導波路14の伝搬光を変調することで、分岐機能と変調機能を同時に持つことが可能となる。

【0095】

なお、Y分岐だけでなく、図7の構成でY分岐導波路14に代えて他の各種の形状の導波路とした場合にも、その導波路固有の機能だけでなく変調機能も持たせることができる。

【0096】

(実施の形態5)

図8は、本発明の実施の形態5のモード結合型光変調器の構成を示す斜視図である。なお、図1と同じ構成部分には、同じ符号を用いている。

【0097】

本実施の形態5のモード結合型光変調器は、その側断面図は図1(a)と同様であるが、図1(a)に示す導波路1の層を、図8に示すように、幅方向の出力ビーム分布を制御できるマルチモード干渉(MMI)導波路16としている。

【0098】

図8に示すように、2次元周期金属層29の一方の面に隣接して電気光学効果を有する電気光学材料層30が配置され、2次元周期金属層29のもう一方の面に隣接して、MMI導波路16が配置されている。

【0099】

MMI導波路16は、一様な所定の屈折率を有しており、導波路幅17と光路長18に特定の関係を持たせることにより、幅方向の出力ビーム分布を制御して、入力光5を2分岐して出力光31を出力できるようにしている。

【0100】

MMI導波路16に入射した入力光5は、電気光学材料層30と2次元周期金属層29との界面上に局在する表面プラズモン32と結合することにより、外部変調電界4の変化に応じて透過量が変化し、MMI導波路16の出力部からは、光量が変調された2つに分岐した出力光31が出力される。

【0101】

このように、2分岐機能を持つMMI導波路16の伝搬光を変調することで、分岐機能と変調機能を同時に持つことが可能となる。

【0102】

マルチモード干渉は、分岐だけでなく分波、空間多重伝送など各種機能を実現できる。したがって、図8の構成でMMI導波路16に代えて他の各種機能を持つMMI導波路とすることにより、そのMMI導波路が有する機能に同時に変調機能を付加することができ、各種機能を集積した光回路の簡素化ができる。

【0103】

(実施の形態6)

図9(a)は、本発明の実施の形態6のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図であり、図9(b)は、このモード結合型光変調器の分散特性の概要図を示している。なお、図1と同じ構成部分には、同じ符号を用いている。

【0104】

本実施の形態6のモード結合型光変調器の導波路は、伝搬光の垂直な方向に屈折率が変化する屈折率分布を有する屈折率分布(GI)型導波路19であり、それ以外の構成は、図1に示した実施の形態1のモード結合型光変調器と同様である。

10

20

30

40

50

【0105】

G I型導波路19は、少なくとも膜厚方向の中心で最大値を有し、その中心からの距離に従って放物線状に屈折率が低下する屈折率分布を有している。図9(a)に示すG I型導波路19内の濃淡(ドットの粗密で表した)は、屈折率の違いを表しており、濃い部分(ドットの密の部分)が淡い部分(ドットの粗の部分)に比べて屈折率の高いことを表している。

【0106】

2次元的にG I化したG I型導波路19の光路長と集光パラメータの平方根の積を、ほぼ¹⁰ $\sqrt{2}$ の整数倍にすることで、レンズ機能を持たせ、入力側と出力側の光結合を容易にすることができる。このような設定とすることにより、図9(a)に示すように、入力光5は、表面プラズモン8と結合して強度変調されるとともに、G I型導波路19の出力位置で集光され、ビーム径の小さな出力光33が出力される。

【0107】

なお、G I型導波路19の分散特性は、図9(b)のフォトンの導波モードの分散曲線48に示すように、各導波モードの傾きが等しくなる。それ以外は実施の形態1と同様で、フォトンの導波モードの分散曲線48のうちのフォトンの共鳴モードの分散曲線49が、2次元周期金属層2と電気光学材料層3との界面上に局在する表面プラズモン8の分散曲線42と共に50を有する。

【0108】

なお、G I型導波路19の作製には、ポリシランなどの材料(ポリシランを主成分とする材料を含む)が使用できる。²⁰

【0109】

ポリシランは、紫外線露光や熱処理によって起こる硬化時の酸化反応により、高屈折率のポリシラン構造が低屈折率のシロキサン構造に変化する。この酸化反応を利用して、例えば、屈折率が一様なポリシランに、位置によって紫外線透過率が異なる透過率分布を有するマスク板を介して紫外線を照射することにより、照射される位置によって紫外線の強度を変化させて、ポリシラン内に紫外線の強度に対応した屈折率の分布を形成させることができる。

【0110】

尚、図9(a)に示したG I型導波路の概念図に含まれる、より具体的な構成としては³⁰、例えば、図10(a)、図10(b)に示す様に、チャンネル導波路201のコア201上に接して2次元周期構造金属層2と電気光学材料層3を積層したものや、図11(a)～図11(c)に示すG I型光ファイバーを利用したものが挙げられる。図11(a)は、G I型光ファイバー(コア)301に対して、コア周囲に接して、2次元周期構造金属層2と電気光学材料層3を同心円状に積層したものである。また、図11(b)は、G I型光ファイバー(コア)301の一部に接して、2次元周期構造金属層2と電気光学材料層3を積層したものである。また、図11(c)には、G I型光ファイバー302のクラッド層が厚い場合は、光ファイバー302の一部を平面研磨した研磨面304上に、コアに接して、2次元周期構造金属層2と電気光学材料層3を積層した例が示されている。

【0111】

図10(a)～図11(c)の例では、コアの中心軸からの距離に応じて屈折率が低下する屈折率分布を示している。しかしこれに限らず、例えば、板状のG I型導波路201のコアの厚み方向の中央の基準平面上で屈折率が最大であって、その基準平面から2次元周期金属層2側のコアの側面、及び、その反対側のコアの側面に向かうに従って、屈折率が低下する屈折分布(図示省略)を有していても良い。⁴⁰

【0112】

また、図10(a)、図10(b)では、屈折率が、コアの中心軸からコアの各辺に近づくに従って減少している。そして、その屈折率の分布を模式的に示した同図では、同じ屈折率の領域が、中心ではほぼ小さな四角形状であり、その領域が周囲に向かうに従って、あたかも相似形的に徐々に大きな四角形状に変化している様子が示されている。⁵⁰

【0113】

これに対して、図11(a)～図11(c)では、同じ屈折率の領域が、中心では小さな円形状であり、その領域が周囲に向かうに従って、あたかも相似形的に徐々に大きな同心円形状に変化している様子を示している。

【0114】

また、図10(a)、図10(b)の場合、上記の様な屈折率分布に限らず、例えば、中心は図11(a)に示す様に、同じ屈折率の領域が、ほぼ小さな円形状であり、その領域が周囲に向かうに従って、図10(a)に示す様に、徐々に大きな四角形状に変化する分布でも良い(図示省略)。

【0115】

10

以上に説明したように、本発明の光変調器および光変調方法は、導波路と電気光学材料層の間の金属層に波長程度の周期構造を形成させたことにより、導波路材料として一般的なガラスや樹脂に比べて高屈折率な LiNbO_3 やKTPなどの高い電気光学定数を有する高誘電体を、電気光学材料層に使用しても、導波路中の伝搬モードと共に鳴可能な電気光学材料層と金属層との界面上に局在する表面プラズモンの高次モードが励振できるので、電気光学材料層として光変調に最適な電気光学材料を選択できる。つまり、電気光学材料層として、電気光学定数の大きな高誘電体を使用できる。

【0116】

尚、電気光学材料層3として、 LiNbO_3 結晶3'を使用する場合、図12に示す様に、 LiNbO_3 結晶3'の方位として、伝搬方向をY軸方向にして積層方向をX軸方向にする(図12では、 LiNbO_3 結晶3'の方位401として表した)か、伝搬方向をX軸あるいはY軸方向にして、積層方向をZ軸方向にする(図12では、 LiNbO_3 結晶3'の方位402として表した)と感度を高くできる。

20

【0117】

また、上記実施の形態5では、入力光5が1つで、出力光31が複数の場合について、説明したが、これに限らず例えば、入力光5が複数で、出力光31が1つの構成も上記実施の形態の構成を適用することにより可能である。その場合の構成図は、図8の入力光と出力光を互いに逆に読み替えれば良い。

【産業上の利用可能性】

【0118】

30

本発明に係る光変調器は、金属膜に近接する材料の屈折率に依存せず、表面プラズモンと伝搬光が共鳴できる効果を有し、光を表面プラズモンとの相互作用で強度変調するモード結合型光変調器等として有用である。

【図面の簡単な説明】

【0119】

【図1】(a)本発明の実施の形態1のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図、(b)本発明の実施の形態1のモード結合型光変調器の分散特性の概要図

【図2】本発明の実施の形態1のモード結合型光変調器において、入力光として直線偏光を使用した場合の構成を示す模式側断面図

【図3】本発明の実施の形態1の、他の構成のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図

40

【図4(a)】本発明の実施の形態1のモード結合型光変調器の2次元周期金属層の周期構造の一例を示す斜視図および断面図

【図4(b)】本発明の実施の形態1のモード結合型光変調器の2次元周期金属層の周期構造の一例を示す斜視図および断面図

【図4(c)】本発明の実施の形態1のモード結合型光変調器の2次元周期金属層の、周期構造の一例の断面を含む斜視図

【図4(d)】本発明の実施の形態1のモード結合型光変調器の2次元周期金属層の、周期構造の一例の断面を含む斜視図

【図4(e)】本発明の実施の形態1のモード結合型光変調器の2次元周期金属層の、周

50

期構造の一例の断面を含む斜視図

【図 4 (f)】本発明の実施の形態 1 のモード結合型光変調器の 2 次元周期金属層の、周期構造の一例の断面を含む斜視図

【図 5】(a) 本発明の実施の形態 2 のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図、(b) 本発明の実施の形態 2 のモード結合型光変調器の分散特性の概要図

【図 6】(a) 本発明の実施の形態 3 のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図、(b) 本発明の実施の形態 3 のモード結合型光変調器の分散特性の概要図

【図 7】本発明の実施の形態 4 のモード結合型光変調器の構成を示す斜視図

【図 8】本発明の実施の形態 5 のモード結合型光変調器の構成を示す斜視図

【図 9 (a)】本発明の実施の形態 6 のモード結合型光変調器の構成を示す模式側断面図

【図 9 (b)】本発明の実施の形態 6 の図 9 (a) に示すモード結合型光変調器の分散特性の概要図

【図 10】(a) 本発明の実施の形態 6 のモード結合型光変調器の一例として、チャンネル導波路を用いた構成を示す概略斜視図、(b) 図 10 (a) の構成例の断面図

【図 11】(a) 本発明の実施の形態 6 のモード結合型光変調器の一例として、G I 型光ファイバーを利用した構成例の断面図、(b) 本発明の実施の形態 6 のモード結合型光変調器の一例として、G I 型光ファイバーを利用した構成例の断面図、(c) 本発明の実施の形態 6 のモード結合型光変調器の一例として、G I 型光ファイバーを利用した構成例の断面図

【図 12】本発明の一実施の形態のモード結合型光変調器に用いる LiNbO_3 結晶の方位の選び方を説明する図

【図 13】従来の、モード結合型の間接変調方式の表面プラズモン波変調器の側断面図

【図 14】(a) 誘電体層 - 金属層の 2 層構造に光が入射した場合の断面模式図、(b) 誘電体層 - 金属層の 2 層構造における誘電体層中のフォトンと表面プラズモンの分散特性を示す図

【図 15】(a) 低屈折率誘電体層 - 金属層 - 高屈折率誘電体層の 3 層構造に光が入射した場合の断面模式図、(b) 低屈折率誘電体層 - 金属層 - 高屈折率誘電体層の 3 層構造における誘電体層中のフォトンと表面プラズモンの分散特性を示す図

【符号の説明】

【0120】

1、21 導波路

2、25、29 2 次元周期金属層

3、26、30 電気光学材料層

3' LiNbO_3 結晶

4 外部変調電界

5 入力光

6、20、27、31、33 出力光

23 出力光 (1 ~ n)

7、22、24 共鳴モード

8、28、32 表面プラズモン

9 直線偏光入力光

10 電極

11 外部変調電圧

12 波長多重入力光 (1 ~ n)

13 ビーム変換部

14 Y 分岐導波路

15 クラッド

16 マルチモード干渉 (MM) 導波路

17 導波路幅

18 光路長

10

20

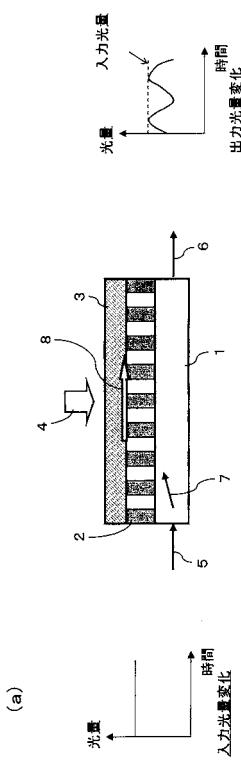
30

40

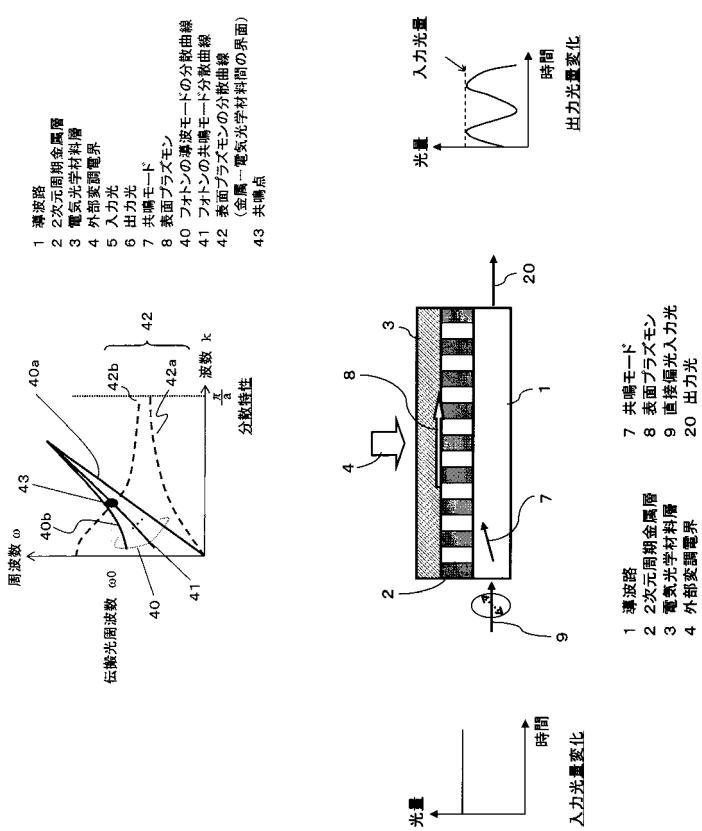
50

1 9 屈折率分布 (G I) 型導波路
 3 5 マルチモード (M M) 塵波路
 4 0 、 4 6 、 4 8 フォトンの導波モードの分散曲線
 4 1 、 4 4 、 4 7 、 4 9 フォトンの共鳴モードの分散曲線
 4 2 金属と電気光学材料層との界面上に局在する表面プラズモンの分散曲線
 4 3 、 5 0 共鳴点
 4 5 共鳴帯

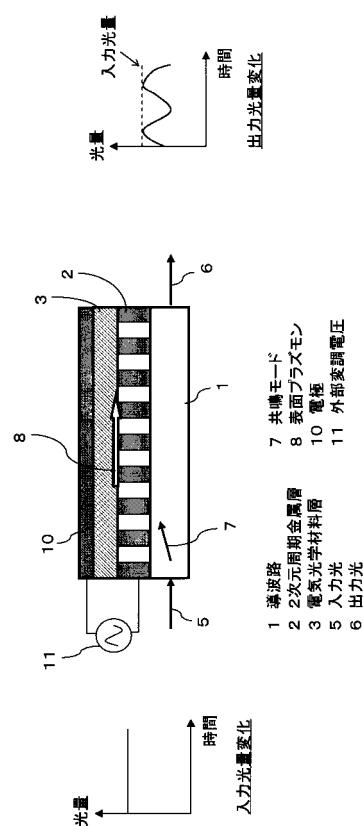
【図 1】



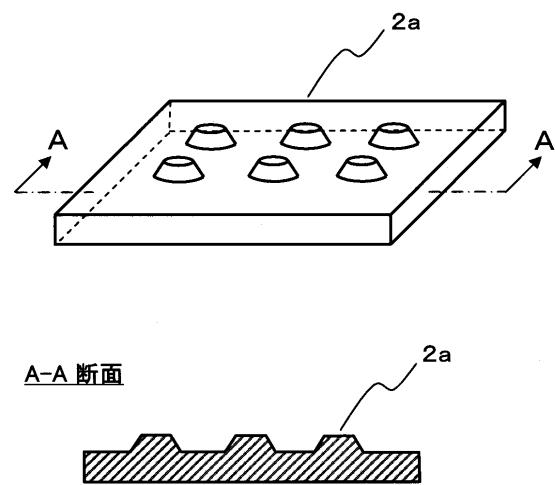
【図 2】



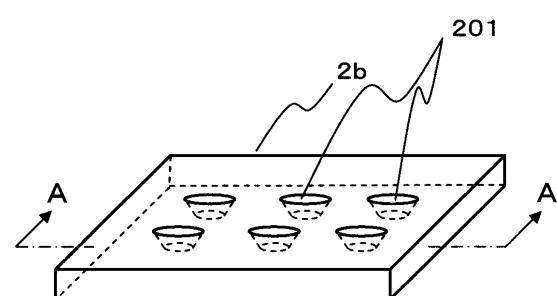
【図3】



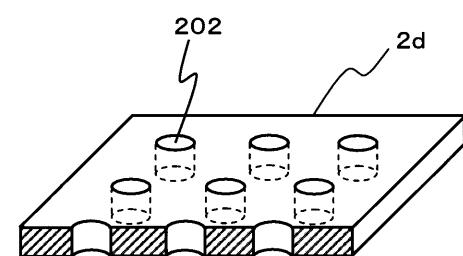
【図4(a)】



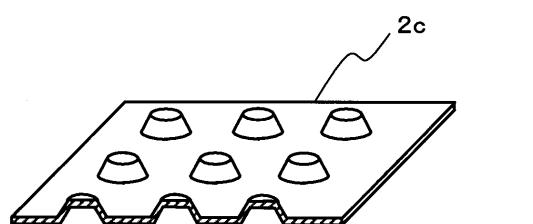
【図4(b)】



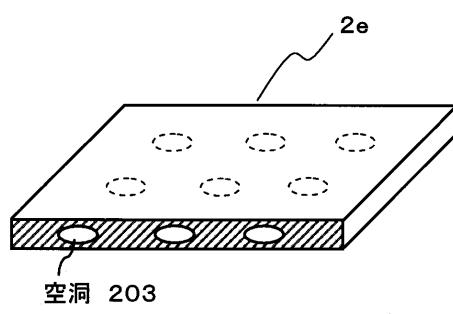
【図4(d)】



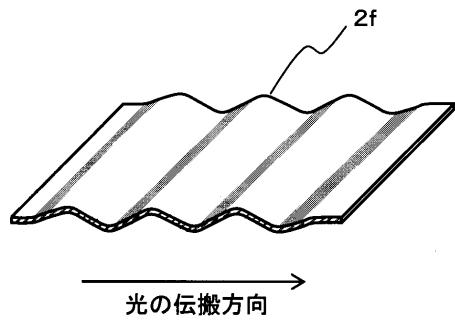
【図4(c)】



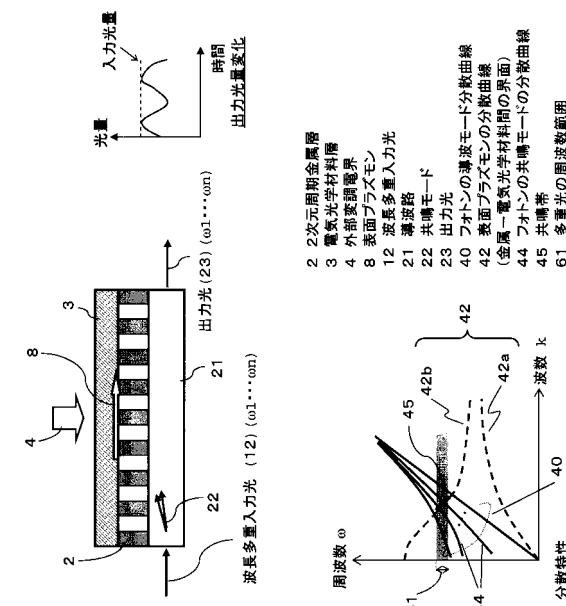
【図4(e)】



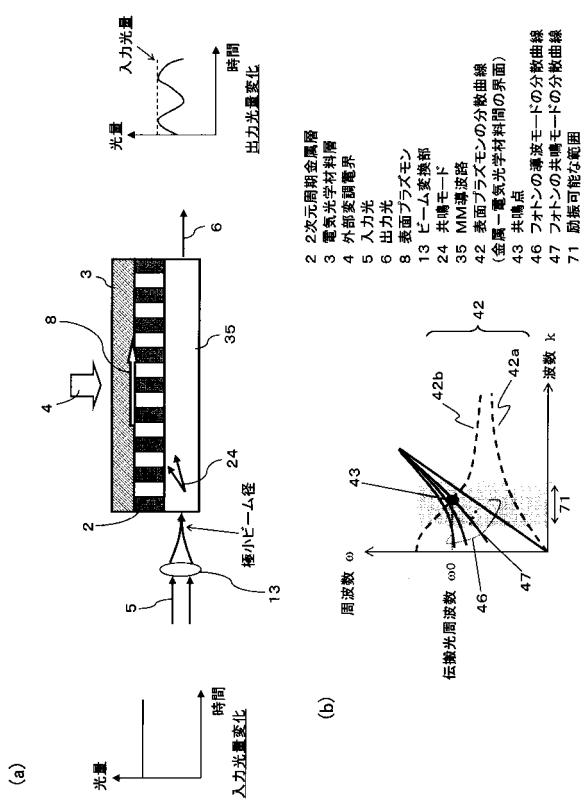
【図4(f)】



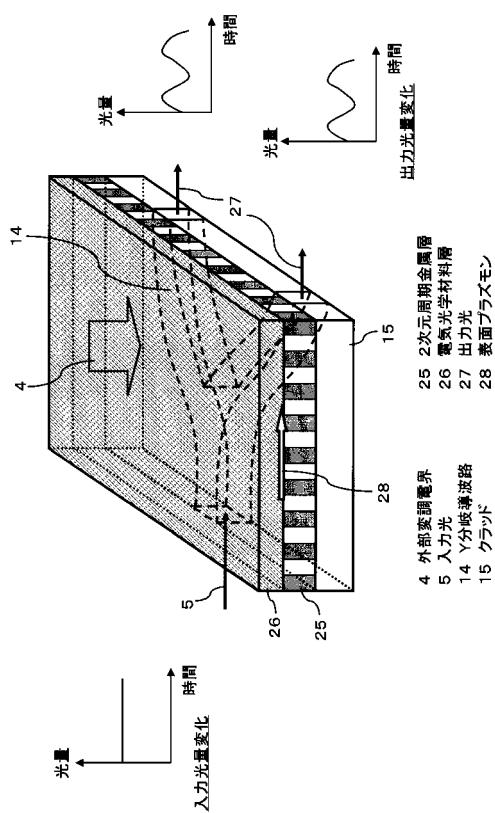
【図5】



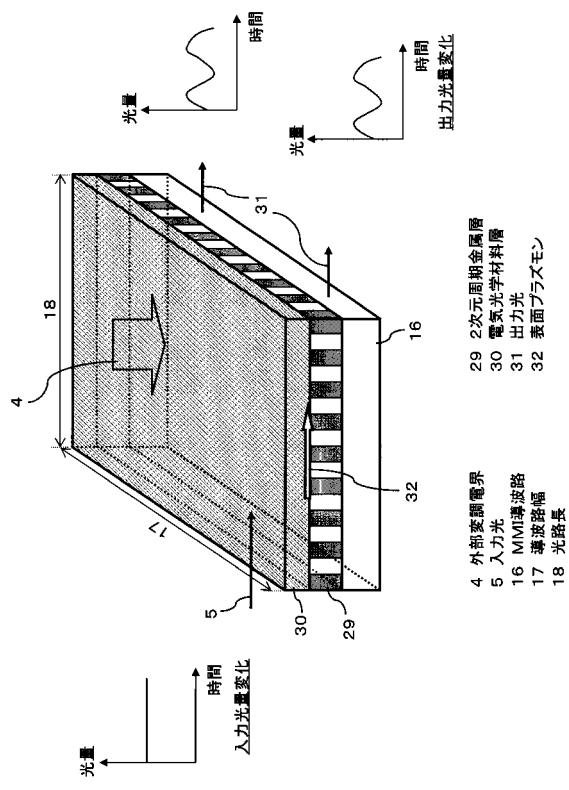
【 义 6 】



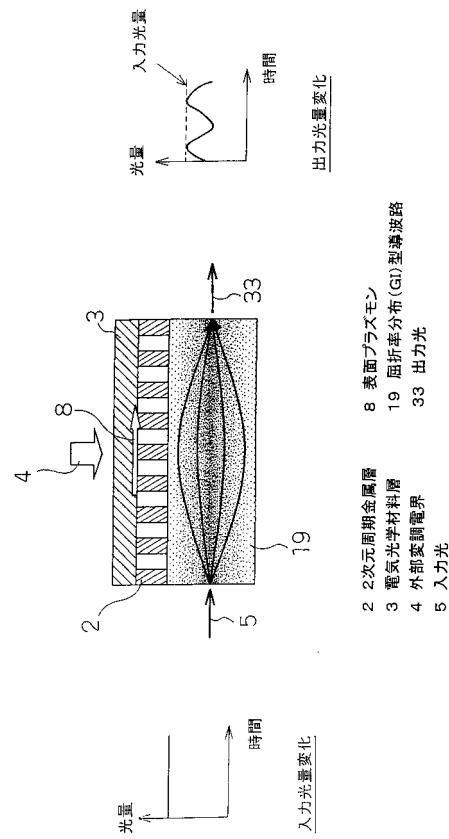
【 四 7 】



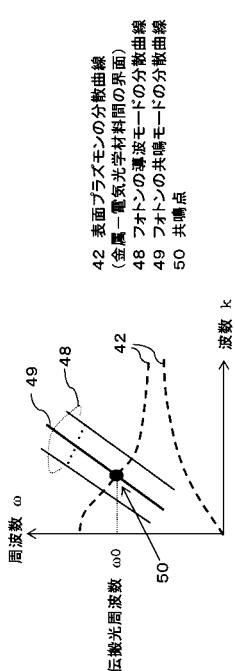
【図 8】



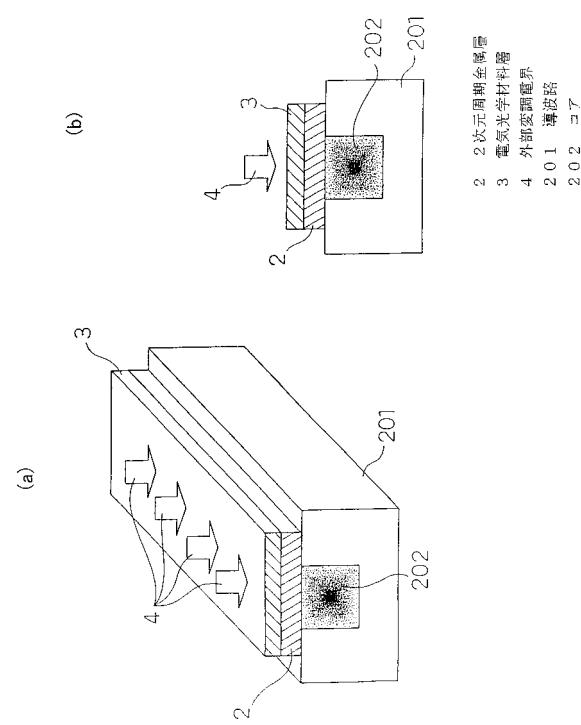
【図 9 (a)】



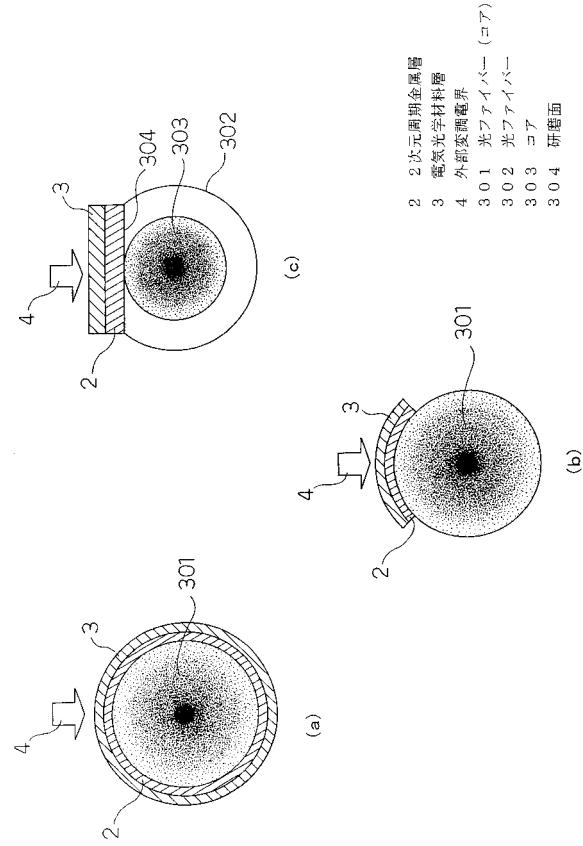
【図 9 (b)】



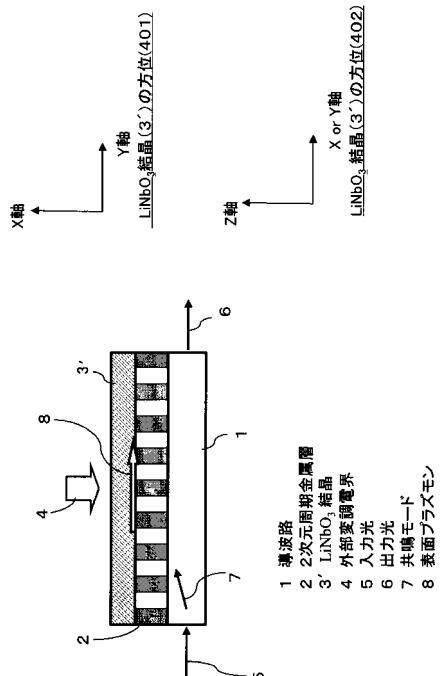
【図 10】



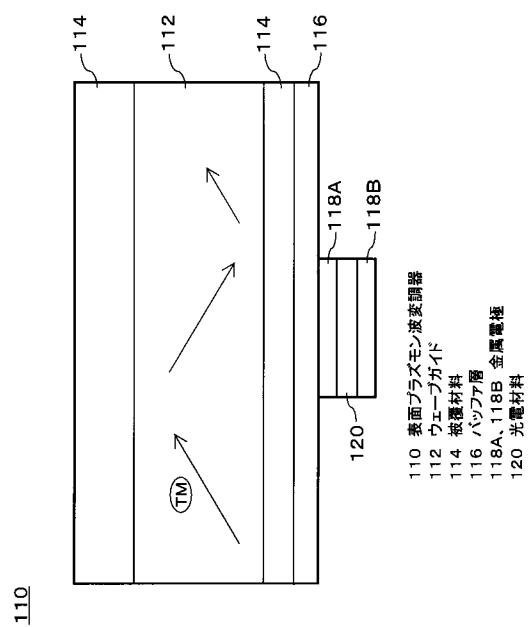
【図11】



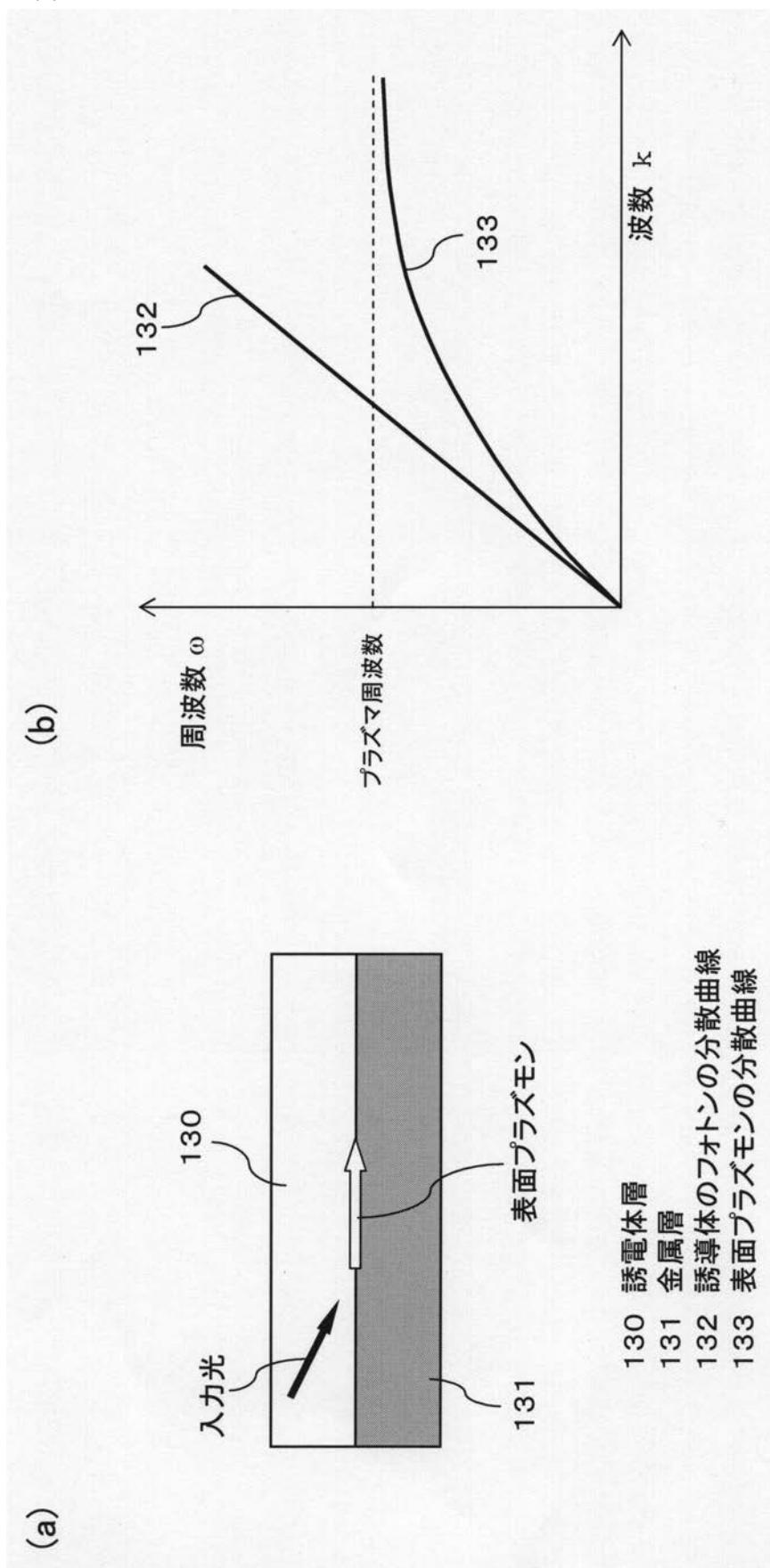
【図12】



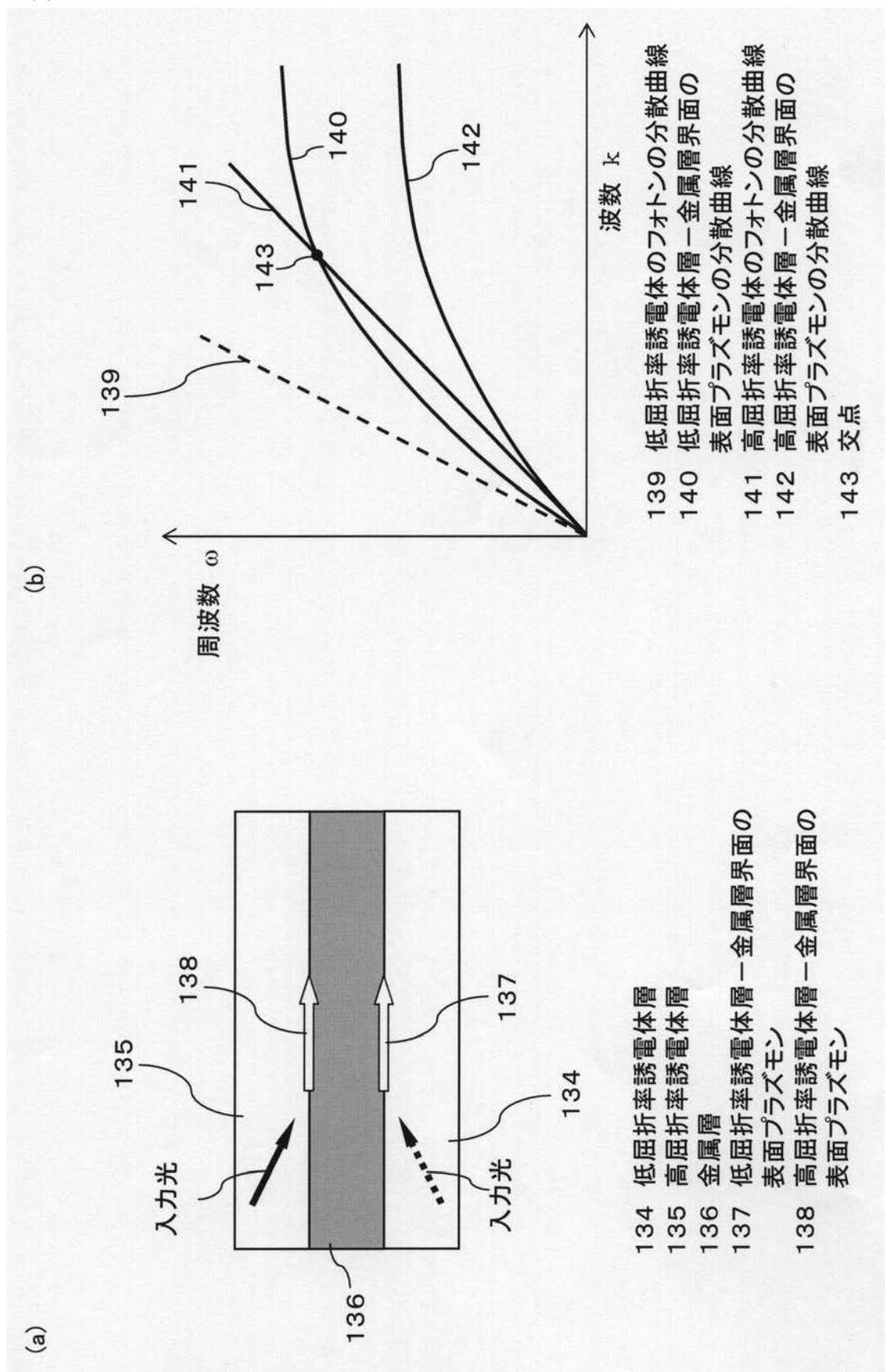
【図13】



【図 14】



【図15】



フロントページの続き

(56)参考文献 特表平10-509806 (JP, A)

A. Boltasseva, et al., "Compact Bragg gratings for long-range surface plasmon polaritons", Journal of lightwave technology, 2006年 2月, Vol. 24, No. 2, p.912-918

S. Jette-Charbonneau, et al., "Demonstration of Bragg gratings based on longranging surface plasmon polariton waveguides", OPTICS EXPRESS, 2005年 6月13日, Vol.13, N o.12, p.4674-4682

S. Jette-Charbonneau, et al., "Bragg grating based on long-range surface plasmon-polariton waveguides: Comparison of theory and experiment", IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005年12月, Vol. 41, No. 12, p.1480-1491

S. W. Liu, et al., "Electro-optic switch in ferroelectric thin films mediated by surface plasmons", APPLIED PHYSICS LETTERS, 2006年 4月 6日, Vol.88, p.143512-1 - 143512-3

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 02 F 1/00 - 1/125
J S T P l u s / J S T 7 5 8 0 (J D r e a m I I)
S c i e n c e D i r e c t
I E E E X p l o r e