

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4449652号
(P4449652)

(45) 発行日 平成22年4月14日 (2010. 4. 14)

(24) 登録日 平成22年2月5日 (2010. 2. 5)

(51) Int. Cl.

F I

G O 2 F 1/365 (2006. 01)

G O 2 F 1/365

G O 2 F 1/01 (2006. 01)

G O 2 F 1/01

C

請求項の数 7 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2004-245556 (P2004-245556)
 (22) 出願日 平成16年8月25日 (2004. 8. 25)
 (65) 公開番号 特開2006-64863 (P2006-64863A)
 (43) 公開日 平成18年3月9日 (2006. 3. 9)
 審査請求日 平成18年8月9日 (2006. 8. 9)

(73) 特許権者 000004226
 日本電信電話株式会社
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号
 (74) 代理人 100070150
 弁理士 伊東 忠彦
 (72) 発明者 新家 昭彦
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
 本電信電話株式会社内
 (72) 発明者 三木 聡
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
 本電信電話株式会社内
 (72) 発明者 倉持 栄一
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
 本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光スイッチ回路

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

2次元フォトリック結晶上に構成された一対の導波路と、前記一対の導波路の間に配置されたフォトリック結晶の共振器で構成された共鳴トンネルフィルタを有し、

前記共振器に共鳴する信号光及び制御光を前記一対の導波路の一方から入力して他方から取り出し、前記信号光を前記制御光で変調する光スイッチ回路であって、

前記共鳴トンネルフィルタは、第1、第2の共鳴波長を持ち、

前記第1の共鳴波長を前記信号光に割り当て、

前記第2の共鳴波長を前記制御光に割り当てたことを特徴とする光スイッチ回路。

【請求項 2】

2次元フォトリック結晶上に構成された第1、第2の一対の導波路と、前記第1の一対の導波路の間に配置され、かつ、前記第2の一対の導波路の間に配置されたフォトリック結晶の共振器で構成された共鳴トンネルフィルタを有し、

前記共振器に共鳴する信号光を前記第1の一対の導波路の一方から入力して他方から取り出し、かつ、前記共振器に共鳴する制御光を前記第2の一対の導波路の一方から入力して他方から取り出し、前記信号光を前記制御光で変調する光スイッチ回路であって、

前記共鳴トンネルフィルタは、第1、第2の共鳴波長を持ち、

前記第1の共鳴波長を前記信号光に割り当て、

前記第2の共鳴波長を前記制御光に割り当て、

前記共振器は、少なくとも第1、第2の共鳴モードを有し、

10

20

各共鳴モードのフィールド形状の対称性と、前記第 1、第 2 の一対の導波路の導波モードのフィールド形状の対称性との一致により、前記信号光を前記第 1 の一対の導波路に伝搬し、かつ、前記制御光を前記第 2 の一対の導波路に伝搬することを特徴とする光スイッチ回路。

【請求項 3】

請求項 2 記載の光スイッチ回路において、

前記第 1 の共鳴モードのフィールド形状の結晶配位方向である Γ K 軸に対する対称性と、前記第 1 の一対の導波路の導波モードの Γ K 軸に対するフィールド形状の対称性との一致により、前記共振器と前記第 1 の一対の導波路を結合して前記信号光を前記第 1 の一対の導波路に伝搬し、

10

前記第 1 の共鳴モードのフィールド形状の Γ K 軸に対する対称性と、前記第 2 の一対の導波路の導波モードの Γ K 軸に対するフィールド形状の対称性との不一致により、前記信号光を前記第 2 の一対の導波路に伝搬しないことを特徴とする光スイッチ回路。

【請求項 4】

請求項 3 記載の光スイッチ回路において、

前記第 2 の共鳴モードのフィールド形状の Γ K 軸に直交する Γ M 軸に対する対称性と、前記第 2 の一対の導波路の導波モードの Γ M 軸に対するフィールド形状の対称性との一致により、前記共振器と前記第 2 の一対の導波路を結合して前記制御光を前記第 2 の一対の導波路に伝搬し、

前記第 2 の共鳴モードのフィールド形状の Γ M 軸に対する対称性と、前記第 1 の一対の導波路の導波モードの Γ M 軸に対するフィールド形状の対称性との不一致により、前記制御光を前記第 1 の一対の導波路に伝搬しないことを特徴とする光スイッチ回路。

20

【請求項 5】

請求項 2 記載の光スイッチ回路において、

前記第 1 の共鳴モードの共鳴周波数と、前記第 1 の一対の導波路の導波モードの帯域の一致により、前記共振器と前記第 1 の一対の導波路を結合して前記信号光を前記第 1 の一対の導波路に伝搬し、

前記第 1 の共鳴モードの共鳴周波数と、前記第 2 の一対の導波路の導波モードの帯域の不一致により、前記信号光を前記第 2 の一対の導波路に伝搬しないことを特徴とする光スイッチ回路。

30

【請求項 6】

請求項 5 記載の光スイッチ回路において、

前記第 2 の共鳴モードの共鳴周波数と、前記第 2 の一対の導波路の導波モードの帯域の一致により、前記共振器と前記第 2 の一対の導波路を結合して前記制御光を前記第 2 の一対の導波路に伝搬し、

前記第 2 の共鳴モードの共鳴周波数と、前記第 1 の一対の導波路の導波モードの帯域の不一致により、前記制御光を前記第 1 の一対の導波路に伝搬しないことを特徴とする光スイッチ回路。

【請求項 7】

請求項 2 乃至 6 記載の光スイッチ回路において、

前記共振器は、フォトニックバンドギャップ内に 6 重極モードを有することを特徴とする光スイッチ回路。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光スイッチ回路に関し、光出力が現在の光入力だけでなく過去の光入力の履歴に依存する光スイッチ回路に関する。

【背景技術】

【0002】

2次元フォトニック結晶をプラットフォームとする平面光回路において、導波路と共振

50

器の結合系は、数波長程度の面積で機能性を実現できることが示唆されており、超小型光回路を構成する上で注目すべき光回路構成である。

【0003】

図1に示すように、2次元フォトニック結晶1上に1本の導波路2を設け、導波路2に隣接して1つの共振器3を配置した構造は、共振器の共鳴波長において信号光を平面回路から取り出すドロップフィルタとなる（例えば非特許文献1参照。）。また、光吸収の生じる波長の外部光（制御光）を直接2次元フォトニック結晶に照射することで共振器の共鳴波長を操作することにより、制御光で信号光を制御する光スイッチ回路を構成することが可能である（例えば非特許文献2参照。）。

【0004】

また、非特許文献3には、フォトニック結晶上の1点欠陥を中心とし、この1点欠陥に隣接する6個の空気穴を1点欠陥から離すように放射状に幅寄せするとともに、径を小さくして共振器を構成することが記載され、非特許文献4には、共振器のQ値を制御することが記載されている。また、非特許文献5，6には、導波路の構造が記載されている。

【非特許文献1】S. Noda, et al Nature 407, 608 (2000)

【非特許文献2】W. Kuniishi, et al International symposium on photonic and electromagnetic crystal structures VPECS-V, 243 (2004)

【非特許文献3】H. Y. Ryu, et al Applied Physics Letters. 83, 4294 (2003)

【非特許文献4】三木他、2003年春季応用物理学会予稿集 第三分冊, 1138 (2003) 29a - YN - 7

【非特許文献5】A. Shinya, et al proceedings of SPIE, 5000, 104, (2003)

【非特許文献6】A. Shinya, et al proceedings of SPIE, 5000, 125, (2003)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

非特許文献1に記載の構造では、信号光は平面回路から面外への取り出しである。また、非特許文献2に記載の光制御の光スイッチ回路も、平面回路から面外への光取り出しのスイッチングとなり、平面回路面外からの制御光の照射が必要となるため、将来の超小型・高集積化が困難となるという問題があった。

【0006】

本発明は、上記の点に鑑みなされたものであり、2次元フォトニック結晶面内で信号処理が可能で高集積化が可能となり、低い光パワーで動作することができる光スイッチ回路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】

【0007】

図2は本発明の第1の原理構成図を示す。請求項1に記載の発明は、2次元フォトニック結晶(4)上に構成された一対の導波路(5, 6)と、前記一対の導波路(5, 6)の間に配置されたフォトニック結晶の共振器(7)で構成された共鳴トンネルフィルタを有し、

前記共振器(7)に共鳴する信号光及び制御光を前記一対の導波路(5, 6)の一方から入力して他方から取り出し、前記信号光を前記制御光で変調する光スイッチ回路であって、

前記共鳴トンネルフィルタは、第1、第2の共鳴波長を持ち、

前記第1の共鳴波長を前記信号光に割り当て、

前記第2の共鳴波長を前記制御光に割り当てたことにより、

10

20

30

40

50

信号光および制御光は２次元フォトリック結晶面内を伝播し２次元フォトリック結晶面内で様々な信号処理が可能で高集積化が可能となり、低い光パワーで光スイッチングに必要な非線形現象を発生させることができ、低い光パワーで動作することができる。

【 0 0 0 8 】

図３は本発明の第２の原理構成図を示す。請求項２に記載の発明は、２次元フォトリック結晶（１０）上に構成された第１、第２の一对の導波路（１１，１２，１３，１４）と、前記第１の一对の導波路の間に配置され、かつ、前記第２の一对の導波路の間に配置されたフォトリック結晶の共振器（１５）で構成された共鳴トンネルフィルタを有し、

前記共振器（１５）に共鳴する信号光を前記第１の一对の導波路（１１，１２）の一方から入力して他方から取り出し、かつ、前記共振器（１５）に共鳴する制御光を前記第２の一对の導波路（１３，１４）の一方から入力して他方から取り出し、前記信号光を前記制御光で変調する光スイッチ回路であって、

前記共鳴トンネルフィルタは、第１、第２の共鳴波長を持ち、

前記第１の共鳴波長を前記信号光に割り当て、

前記第２の共鳴波長を前記制御光に割り当て、

前記共振器は、少なくとも第１、第２の共鳴モードを有し、

各共鳴モードのフィールド形状の対称性と、前記第１、第２の一对の導波路の導波モードのフィールド形状の対称性と的一致により、前記信号光を前記第１の一对の導波路に伝搬し、かつ、前記制御光を前記第２の一对の導波路に伝搬することにより、

信号光および制御光は２次元フォトリック結晶面内を伝播し２次元フォトリック結晶面内で様々な信号処理が可能で高集積化が可能となり、信号光と制御光を別々の導波路で伝搬させることができ、低い光パワーで光スイッチングに必要な非線形現象を発生させることができ、低い光パワーで動作することができる、信号光と制御光を別々の導波路で伝搬させることを実現できる。

【 0 0 1 1 】

請求項３に記載の発明は、請求項２記載の光スイッチ回路において、

前記第１の共鳴モードのフィールド形状の結晶配位方向であるΓＫ軸に対する対称性と、前記第１の一对の導波路の導波モードのΓＫ軸に対するフィールド形状の対称性と的一致により、前記共振器と前記第１の一对の導波路を結合して前記信号光を前記第１の一对の導波路に伝搬し、

前記第１の共鳴モードのフィールド形状のΓＫ軸に対する対称性と、前記第２の一对の導波路の導波モードのΓＫ軸に対するフィールド形状の対称性と的一致により、前記信号光を前記第２の一对の導波路に伝搬しないことにより、

信号光が第１の一对の導波路を伝搬し、第２の一对の導波路を伝搬しないようにすることができる。

【 0 0 1 2 】

請求項４に記載の発明は、請求項３記載の光スイッチ回路において、

前記第２の共鳴モードのフィールド形状のΓＫ軸に直交するΓＭ軸に対する対称性と、前記第２の一对の導波路の導波モードのΓＭ軸に対するフィールド形状の対称性と的一致により、前記共振器と前記第２の一对の導波路を結合して前記制御光を前記第２の一对の導波路に伝搬し、

前記第２の共鳴モードのフィールド形状のΓＭ軸に対する対称性と、前記第１の一对の導波路の導波モードのΓＭ軸に対するフィールド形状の対称性と的一致により、前記制御光を前記第１の一对の導波路に伝搬しないことにより、

制御光が第２の一对の導波路を伝搬し、第１の一对の導波路を伝搬しないようにすることができる。

【 0 0 1 3 】

請求項５に記載の発明は、請求項２記載の光スイッチ回路において、

前記第１の共鳴モードの共鳴周波数と、前記第１の一对の導波路の導波モードの帯域の一致により、前記共振器と前記第１の一对の導波路を結合して前記信号光を前記第１の

10

20

30

40

50

対の導波路に伝搬し、

前記第 1 の共鳴モードの共鳴周波数と、前記第 2 の一對の導波路の導波モードの帯域の不一致により、前記信号光を前記第 2 の一對の導波路に伝搬しないことにより、

信号光が第 1 の一對の導波路を伝搬し、第 2 の一對の導波路を伝搬しないようにすることができる。

【0014】

請求項 6 に記載の発明は、請求項 5 記載の光スイッチ回路において、

前記第 2 の共鳴モードの共鳴周波数と、前記第 2 の一對の導波路の導波モードの帯域の一致により、前記共振器と前記第 2 の一對の導波路を結合して前記制御光を前記第 2 の一對の導波路に伝搬し、

10

前記第 2 の共鳴モードの共鳴周波数と、前記第 1 の一對の導波路の導波モードの帯域の不一致により、前記制御光を前記第 1 の一對の導波路に伝搬しないことにより、

制御光が第 2 の一對の導波路を伝搬し、第 1 の一對の導波路を伝搬しないようにすることができる。

【0015】

請求項 7 に記載の発明は、請求項 2 乃至 6 記載の光スイッチ回路において、

前記共振器は、フォトリソニックバンドギャップ内に 6 重極モードを有することにより、6 重極モードを第 2 の共鳴モードとして使用できる。

【発明の効果】

20

【0016】

本発明によれば、2 次元フォトリソニック結晶面内で信号処理が可能で高集積化が可能となり、低い光パワーで動作することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0017】

以下、図面に基いて本発明の実施形態について説明する。

【0018】

図 4 は、本発明の光スイッチ回路の第 1 実施形態の構成図を示す。この実施形態は図 2 に対応する回路構成である。図 4 において、三角格子空気穴 2 次元フォトリソニック結晶 20 は、エブリッジ構造のシリコンのスラブ 22 に三角格子状の空気穴 24 を設けたものであり、例えば格子定数 $a = 420 \text{ nm}$ 、空気穴半径 $0.275a$ 、スラブ厚さ $0.5a$ である。

30

【0019】

ここで、三角格子状の空気穴 24 の結晶配位方向の Γ K 軸は隣接する 2 つ空気穴の中心を結ぶ方向であり、三角格子の 3 辺が Γ K 軸に対応する。また、 Γ M 軸は、隣接する 2 つ空気穴の中心を結ぶ直線 (Γ K 軸) に直交し、最短の空気穴の中心に向かう方向である。

【0020】

導波路 26, 28 はフォトリソニック結晶の空気穴 24 を Γ K 軸に重なる X 軸方向に除去して構成されており、導波路 26 の延長線上に導波路 28 が配置されている。

【0021】

40

導波路 26, 28 それぞれの対向する端部から Γ K 軸方向に数周期のポテンシャルバリア (数周期のフォトリソニック結晶周期) を経た位置に端部が位置するように共振器 30 が配置されている。共振器 30 は、X 軸方向に延在する 3 点欠陥 (3 つの空気穴の欠損) の X 軸方向の両端に隣接する 2 つの空気穴 (黒丸で示す) 32 を 3 点欠陥から離すように X 軸方向に幅寄せするとともに、径を小さくして形成されている (非特許文献 4 参照)。

【0022】

つまり、共振器 30 は 1 本の導波路を 2 つの導波路 26, 28 に分断するように配置されており、この構造は共鳴トンネルフィルタと呼ばれる回路構成であり、一方の導波路 26 を伝播している光の波長が共振器 30 の共鳴波長と一致する場合のみ、光は共振器 30 を透過し、他方の導波路 28 を伝播することができる。また、共振器 30 は、極めて小さ

50

なモード体積を有するフォトニック結晶共振器であり、制御光の光密度を極めて高くして低い光パワーで光スイッチングに必要な非線形現象を発生させることができる。

【 0 0 2 3 】

この非線形現象は、共振器 3 0 内およびその周辺の領域の屈折率を変動させ、共振器 3 0 の共鳴波長を変動させる。つまり、信号光の波長と共振器 3 0 の共鳴波長の差異を制御光の光強度により調整することができる。これにより、信号光が共鳴トンネルフィルタを透過する場合 (O N)、透過しない場合 (O F F) の変更が、制御光の光強度で調整可能となる。

【 0 0 2 4 】

この共鳴トンネルフィルタの共振器 3 0 は 1 つの構造の中に 2 つの共鳴モードを有する。一方の共鳴モードに対し生じた非線形現象による屈折率の変動は、その共鳴モードの共鳴波長だけではなく、他方の共鳴モードの共鳴波長も変動させる。つまり、本機構を用いれば、制御光で信号光を変調することができる。

【 0 0 2 5 】

図 5 (A) に、分断されていない 1 本の導波路 (導波モード) の透過スペクトルと、図 4 に示す共鳴トンネルフィルタの透過スペクトルを示す。図 5 (A) において、導波モードの観測帯域内は (1 5 0 0 ~ 1 5 8 0 n m) に、共鳴モード 1 と共鳴モード 2 の 2 つの共鳴トンネル信号を観測できる。本発明では、共鳴モード 1 を制御光、共鳴モード 2 を信号光に割り当てる。

【 0 0 2 6 】

図 5 (B) にハイパワーの制御光を入力した場合 (O N) の信号光の透過スペクトルを実線で示し、入力しない場合 (O F F) の信号光の透過スペクトルを破線で示す。制御光を O N にすることにより、信号光スペクトルが長波長側にシフトしている。

【 0 0 2 7 】

フォトニック結晶 2 0 の材料であるシリコンの場合、信号光スペクトルの長波長側へのシフトは、熱の非線形性を意味する。従来、シリコンは観測波長帯域において透明であるため、光による熱の発生はきわめて小さいはずであるが、本構造ではフォトニック結晶の共振器 3 0 を用いることで、極めて小さな空間領域に極めてエネルギー密度の高い光を閉じ込めているため、熱の非線形現象を容易に生じさせることができている。

【 0 0 2 8 】

さらに、信号光の波長を図 5 (B) に示す λ_1 、 λ_2 に設定することにより、図 6 に示すように信号光と制御光の論理演算が可能となる。つまり、信号光の波長が λ_1 の場合、図 6 (A) に示す制御光が O N になることにより、図 6 (B) に示す信号光の出力は低下するため、N O T 回路が構成される。一方、信号光の波長が λ_2 の場合、図 6 (A) に示す制御光が O N になることにより、図 6 (C) に示す信号光の出力が上昇するため A N D 回路となる。このように、2 つの共鳴モードを利用することにより、光制御の光スイッチ回路を実現できる。

【 0 0 2 9 】

このように、上記実施形態では、信号光および制御光は 2 次元回路面内を伝播するため、2 次元面内で様々な信号処理が可能となり、高集積化が可能となる。また、2 つの共鳴モードを有するフォトニック結晶共振器を利用することで、低い光パワーで光スイッチングに必要な非線形現象を発生させることができ、低い光パワーで動作することができる。

【 0 0 3 0 】

ところで、図 4 の回路構成では、信号光と制御光が同一の導波路を伝播するため、将来的に複雑な回路を構成できないおそれがある。そこで、共振器の共鳴モードのフィールド形状の対称性を利用し、信号光と制御光を分離する方法について説明する。

【 0 0 3 1 】

図 7 は、本発明の光スイッチ回路の第 2 実施形態の構成図を示す。この実施形態は図 3 に対応する回路構成である。図 7 において、三角格子空気穴 2 次元フォトニック結晶 4 0 は、エアブリッジ構造のシリコンのスラブ 4 2 に三角格子状の空気穴 4 4 を設けたもので

10

20

30

40

50

あり、例えば格子定数 $a = 420 \text{ nm}$ 、空気穴半径 $0.275a$ 、スラブ厚さ $0.5a$ である。

【0032】

導波路46, 48はフォトニック結晶の空気穴44を Γ K軸に重なるY軸方向に除去して構成されており、導波路46の延長線上に導波路48が配置されている。

【0033】

導波路46, 48の間には共振器50が配置されている。共振器50は、1点欠陥(1つの空気穴の欠損)を中心とし、この1点欠陥に隣接する6個の空気穴(黒丸で示す)52を1点欠陥から離すように放射状に幅寄せするとともに、径を小さくして形成されている(非特許文献3, 4参照)。

10

【0034】

また、共振器50を中心として Γ M軸に重なるX軸方向両側に数列の空気穴列を経た位置に端部が位置するよう導波路54, 56が配置されている。導波路54は、共振器50に近い端部からX軸に対し-30度傾いた Γ K軸方向にフォトニック結晶の空気穴44を除去して構成されており、導波路56は、共振器50に近い端部からX軸に対し-30度傾いた Γ K軸方向にフォトニック結晶の空気穴44を除去して構成されている。

【0035】

更に、導波路46, 48, 54, 56は、図20(A)に示すように空気穴列を線状に除去し、図20(B)に示すように除去された空気穴列に隣接する空気穴列を導波路幅が狭くなるようにシフトさせ($W < W_0$)、更に、図20(C)に示すようにシフトさせた空気穴列の外側の空気穴列の形状をシフトさせた分だけ広げられている(非特許文献5, 6参照)。なお、図20においては、黒丸が空気穴を表わしている。

20

【0036】

図21に図7の共振器50の伝搬モード帯域と共鳴周波数(共鳴波長)との対応を示す。本実施形態では導波路幅 W を $0.937W_0$ (W_0 は取り除いた空気穴列の両側に隣接する空気穴列の中心間距離)とした。このように、導波路幅の操作により2重極モードと6重極モードが存在する帯域に Γ K軸に対し正対称の導波モードを有する導波路を構成している。

【0037】

導波路46, 48は信号光を導波する信号ラインとされ、導波路54, 56は制御光を導波する制御ラインとされており、信号ラインと制御ラインが交差する地点に共振器50が配置されている。

30

【0038】

共振器50は2つの共鳴モードを持ち、それぞれが信号光、制御光に割り当てられている。制御光の共鳴モードに対し生じた非線形現象による屈折率の変動は、制御光の共鳴モードの共鳴波長だけではなく、信号光の共鳴モードの共鳴波長も変動させ、制御光で信号光を変調することができる。

【0039】

さらに、共振器50内には信号光と制御光が混在するが、信号光は制御ラインを伝播できず、制御光は信号ラインを伝播できない。これについて説明する。共振器50は、フォトニックバンドギャップ内に6重極モードを有しており、図8~図10に示すような複数の共鳴モードのフィールド形状を有している。即ち、2重極モードと4重極モードと6重極モードである。なお、図8~図10には、共振器50近傍における共鳴モードを符号と濃淡(濃いほど強い)で表わしている。

40

【0040】

図8に示す2重極モードのうち右側に示すものは Γ K軸に対して左右対称つまり正対称である。図9に示す4重極モードのうち右側に示すものは Γ K軸に対して左右対称つまり正対称である。図10に示す6重極モードは Γ K軸に対して左右非対称つまり反対称であり、かつ、 Γ M軸に対して左右対称つまり正対称である。なお、 Γ K軸, Γ M軸等の対称軸に対して偶関数のフィールド形状を持つ場合を正対称、対称軸に対して奇関数のフィー

50

ルド形状を持つ場合を反対称と定義する。例えば図 8 の右側に示す 2 重極モードでは、 Γ K 軸の左右で符号が一致し Γ K 軸に対して正対称であることが分かる。また、図 10 に示す 6 重極モードでは、 Γ M 軸の左右で符号が一致し Γ M 軸に対して正対称であることが分かる。

【 0 0 4 1 】

図 11 に Γ K 軸に対する共振器 50 の 2 重極モード、6 重極モード、導波路 46 の導波モードそれぞれのフィールド形状を示し、図 12 に Γ M 軸に対する共振器 50 の 2 重極モード、6 重極モード、導波路 54 の導波モードそれぞれのフィールド形状を示す。

【 0 0 4 2 】

ここで取り扱う 2 重極は、図 8 の右側の共鳴モードである。三角格子空気穴 2 次元フォトリック結晶は 3 回対称性を持つため、この 2 重極モードは 120 度、240 度回転させても等価であり、本来は 3 種類の共鳴モードが同じ共鳴周波数に重なっている。ただし、導波路との結合により対称性が崩れるため、これらの共鳴周波数は分裂し、この重なり（縮退）が解ける。または、共振器の構造を 3 回対称性からずらすことによって縮退が解ける。そこで、ここでは Y 軸に対し対称なモードのみに着目し、これを 2 重極として図 11（A）、図 12（A）に示している。6 重極にはこのような縮退はない。

【 0 0 4 3 】

図 11、図 12 中、実線の矢印と破線の矢印で示す方向にフィールドは振動しながら広がって減衰する。また、実線の矢印と破線の矢印では位相が互いに 180 度ずれている。

【 0 0 4 4 】

モードを結合する際には矢印の傾きが一致するときお互いの結合が最も強く、直交するときお互いの結合が最も弱い。

【 0 0 4 5 】

図 11（A）に示す 2 重極モードと図 11（C）に示す導波路 46（または 48）の導波モードは Γ K 軸に対し正対称であり、図 11（B）に示す 6 重極モードは Γ K 軸に対し反対称であるため、導波路 46、48 の導波モードには共振器 50 の 2 重極モードが結合し、共振器 50 の 6 重極モードは結合できない。

【 0 0 4 6 】

また、図 12（B）に示す 6 重極モードと図 12（C）に示す導波路 54（または 56）の導波モードは Γ M 軸に対し正対称であり、図 12（A）に示す 2 重極モードは Γ M 軸に対し反対称であるため、導波路 54、56 の導波モードには共振器 50 の 6 重極モードが結合し、共振器 50 の 2 重極モードは結合できない。

【 0 0 4 7 】

このため、図 7 において、外部から導波路 46 の信号ラインに入力された信号光は共振器 50 を通し、導波路 48 を通して外部に出力される。また、外部から導波路 54 の制御ラインに入力された制御光は共振器 50 を通し、導波路 56 を通して外部に出力される。

【 0 0 4 8 】

図 13 には、図 7 の信号ライン（導波路 46、48）と、制御ライン（導波路 54、56）から波長帯域の比較的広いスペクトルの光を導入したときの共振器 50 内のスペクトルの計算結果を破線で示し、信号ライン（導波路 48）から出力されるスペクトルの計算結果を実線で示す。ここでは、共振器 50 内に 2 重極と 6 重極の 2 つのモードが励起されており、2 重極モードは信号ラインに出力されているが、6 重極モードは信号ラインに出力されていないことがわかる。

【 0 0 4 9 】

このように、 Γ K 軸、 Γ M 軸それぞれに対する対称性を考慮することにより、導波モードを任意の共振器モードに選択的に結合させることが可能となる。

【 0 0 5 0 】

図 7 に示す実施形態では、図 14（A）に示すように、 Γ K 軸上に設けた 2 つの導波路 46、48 の間に共振器 50 を配置し、共振器 50 の 2 重極モードを導波路 46、48 の導波路モードと結合している。この他にも、図 14（B）に示すように、 Γ K 軸上に設け

10

20

30

40

50

た2つの導波路46, 48それぞれの対向する端部からフィールドが延びる方向(ΓK軸方向に対して±30度傾いたΓM軸方向)の交点位置に共振器50を配置し、共振器50の2重極モードを導波路46, 48の導波路モードと結合することが可能である。また、図14(C)に示すように、ΓK軸上に設けた導波路46の端部からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に共振器50を配置し、共振器50からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に導波路48の端部を配置してΓK軸上に導波路48を設け、共振器50の2重極モードを導波路46, 48の導波路モードと結合することが可能である。

【0051】

更に、図15(A)に示すように、X軸方向に離間して平行にΓK軸上に設けた導波路46, 48の端部からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)の交点位置に共振器50を配置し、共振器50の2重極モードを導波路46, 48の導波路モードと結合することが可能である。また、図15(B)に示すように、X軸(ΓM軸)に対し-30度傾いたΓK軸上に設けた導波路46の端部からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に共振器50を配置し、共振器50からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に導波路48の端部を配置してX軸に対し+30度傾いたΓK軸上に導波路48を設け、共振器50の2重極モードを導波路46, 48の導波路モードと結合することが可能である。また、図15(C)に示すように、X軸に対し-30度傾いたΓK軸上に設けた導波路46の端部からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に共振器50を配置し、共振器50からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に導波路48の端部を配置してX軸に対し-30度傾いたΓK軸上に導波路48を設け、共振器50の2重極モードを導波路46, 48の導波路モードと結合することが可能である。

【0052】

ただし、図14(A)に示す構成が、共振器50の2重極モードだけを導波路46, 48の導波路モードと結合するのにに対し、図14(B), (C)及び図15(A), (B), (C)に示す構成では、共振器50の2重極モードだけでなく6重極モードも導波路46, 48の導波路モードと結合してしまう。

【0053】

一方、図16(A)に示すように、ΓK軸上に設けた2つの導波路54, 56それぞれの対向する端部からフィールドが延びる方向(ΓK軸方向に対して±30度傾いたΓM軸方向)の交点位置に共振器50を配置し、共振器50の6重極モードを導波路54, 56の導波路モードと結合することが可能である。また、図16(B)に示すように、ΓK軸上に設けた導波路54の端部からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に共振器50を配置し、共振器50からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に導波路56の端部を配置してΓK軸上に導波路56を設け、共振器50の6重極モードを導波路54, 56の導波路モードと結合することが可能である。

【0054】

更に、図17(A)に示すように、X軸方向に離間して平行にΓK軸上に設けた導波路54, 56の端部からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)の交点位置に共振器50を配置し、共振器50の6重極モードを導波路54, 56の導波路モードと結合することが可能である。また、図17(B)に示すように、X軸(ΓM軸)に対し-30度傾いたΓK軸上に設けた導波路54の端部からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に共振器50を配置し、共振器50からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に導波路56の端部を配置してX軸に対し+30度傾いたΓK軸上に導波路56を設け、共振器50の6重極モードを導波路54, 56の導波路モードと結合することが可能である。また、図17(C)に示すように、X軸に対し-30度傾いたΓK軸上に設けた導波路54の端部からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に共振器50を配置し、共振器50からフィールドが延びる方向(ΓM軸方向)に導波路56の端部を配置してX軸に対し-30度傾いたΓK軸上に導波路56を設け、共振器50の6重極モードを導波路54, 56の導波路モードと結合することが可能である。

【0055】

ただし、上記の図16(A)、(B)及び図17(A)、(B)、(C)に示す構成では、共振器50の6重極モードだけでなく、2重極モードも導波路54、56の導波路モードと結合してしまう。

【0056】

これに対して、図7に示す実施形態では、図18(A)に示すように、 Γ M軸に重なるX軸に対し-30度傾いた Γ K軸上に導波路54、56を設け、導波路54、56それぞれの端部を共振器50からX軸方向両側に位置するよう配置し、共振器50の6重極モードだけを導波路54、56の導波路モードと結合している。

【0057】

また、図18(B)に示すように、X軸に対し+30度傾いた Γ K軸上に導波路54を設け、X軸に対し-30度傾いた Γ K軸上に導波路56を設け、導波路54、56それぞれの端部を共振器50からX軸方向両側に位置するよう配置し、共振器50の6重極モードだけを導波路54、56の導波路モードと結合する。

【0058】

このため、図14(A)に示す構成と、図18(A)に示す構成とを組み合わせると図19(A)に示す構成とする。この図19(A)の構成は図7に示す構成と同一である。ここでは、 Γ K軸上に設けた2つの導波路46、48の間に共振器50を配置し、共振器50の2重極モードを導波路46、48の導波路モードと結合している。また、 Γ M軸に重なるX軸に対し-30度傾いた Γ K軸上に導波路54、56を設け、導波路54、56それぞれの端部を共振器50からX軸方向両側に位置するよう配置し、共振器50の6重極モードだけを導波路54、56の導波路モードと結合している。これにより、導波路46の信号ラインに入力された信号光を共振器50を通して導波路48だけに取り出すことができ、かつ、導波路54の制御ラインに入力された制御光を共振器50を通して導波路56だけに取り出すことができる。

【0059】

同様に、図14(A)に示す構成と、図18(B)に示す構成とを組み合わせると図19(B)に示す構成とする。ここでは、 Γ K軸上に設けた2つの導波路46、48の間に共振器50を配置し、共振器50の2重極モードを導波路46、48の導波路モードと結合している。X軸に対し+30度傾いた Γ K軸上に導波路54を設け、X軸に対し-30度傾いた Γ K軸上に導波路56を設け、導波路54、56それぞれの端部を共振器50からX軸方向両側に位置するよう配置し、共振器50の6重極モードだけを導波路54、56の導波路モードと結合する。これにより、導波路46の信号ラインに入力された信号光を共振器50を通して導波路48だけに取り出すことができ、かつ、導波路54の制御ラインに入力された制御光を共振器50を通して導波路56だけに取り出すことができる。

【0060】

なお、図4に示す共振器30は2重極モードの節の数を Γ K軸方向に増やしたフィールド形状であるため、図14(A)~(C)及び図15(A)~(C)それぞれと同様に、共振器30及び導波路26、28を配置することができる。この場合、共振器50が共振器30に対応し、導波路46、48が導波路26、28に対応する。

【0061】

次に、共鳴モードと導波モード帯域の一致/不一致により、特定の共鳴モードと特定の導波路を結合できることを示す。

【0062】

図22は、本発明の光スイッチ回路の第3実施形態の構成図を示す。この実施形態は図3に対応する回路構成である。図22において、三角格子空気穴2次元フォトニック結晶60は、エアブリッジ構造のシリコンのスラブ62に三角格子状の空気穴64を設けたものであり、例えば格子定数 $a = 400 \text{ nm}$ 、空気穴半径 $0.22a$ 、スラブ厚さ $0.5a$ である。

【0063】

導波路66、68はフォトニック結晶の空気穴64を Γ K軸に重なるY軸方向に除去し

10

20

30

40

50

て構成されており、導波路 66 の延長線上に導波路 68 が配置されている。

【0064】

導波路 66, 68 の間には共振器 70 が配置されている。共振器 70 は、1 点欠陥を中心とし、この 1 点欠陥に隣接する 6 個の空気穴 (黒丸で示す) 72 を 1 点欠陥から離すように放射状に幅寄せするとともに、径を小さくして形成されている。

【0065】

また、共振器 70 を中心として Γ M 軸に重なる X 軸方向両側に数列の空気穴列を経た位置に端部が位置するよう導波路 74, 76 が配置されている。導波路 74 は、共振器 70 に近い端部から X 軸に対し +30 度傾いた Γ K 軸方向にフォトニック結晶の空気穴 64 を除去して構成されており、導波路 76 は、共振器 70 に近い端部から X 軸に対し -30 度傾いた Γ K 軸方向にフォトニック結晶の空気穴 64 を除去して構成されている。

10

【0066】

更に、導波路 66, 68, 74, 76 は、図 20 (A) に示すように空気穴列を線状に除去し、図 20 (B) に示すように除去された空気穴列に隣接する空気穴列を導波路幅が狭くなるようにシフトさせ ($W < W_0$)、更に、図 20 (C) に示すようにシフトさせた空気穴列の外側の空気穴列の形状をシフトさせた分だけ広げられている。

【0067】

導波路 66, 68 は信号光を導波する信号ラインとされ、導波路 74, 76 は制御光を導波する制御ラインとされており、信号ラインと制御ラインが交差する地点に共振器 70 が配置されている。共振器 70 は 2 つの共鳴モードを持ち、それぞれが信号光、制御光に割り当てられている。

20

【0068】

制御光の共鳴モードに対し生じた非線形現象による屈折率の変動は、制御光の共鳴モードの共鳴波長だけではなく、信号光の共鳴モードの共鳴波長も変動させ、制御光で信号光を変調することができる。

【0069】

図 23 に本回路に用いられた導波路の伝搬モード帯域と共鳴モードの対応を示す。導波路幅は図 20 (C) に示す方法で調整されている。この方法により、導波路幅を狭くすることで図 20 (A) に示す単純な線欠陥の導波モード帯域を高周波数側にシフトさせることができ、導波路幅を広くすることで低周波数側にシフトさせることができる。図 23 に示すように、例えば $W = 0.9W_0$ の場合、正対称と反対称のモードが高周波数側にシフトしている。更に、導波路幅を狭くすると ($W < 0.85W_0$)、 $W = 0.7W_0$ のように、フォトニックバンドギャップの左端から新たな正対称モードが出現してくる (非特許文献 5, 6 参照)。

30

これらの特徴を利用することで、特定の共鳴モードに適した導波モード帯域設定することができる。

【0070】

信号ラインの導波路 66, 68 として導波路幅 $W = 0.7W_0$ 、制御ラインの導波路 74, 76 として導波路幅 $W = 0.9W_0$ を用いる。これにより、2 重極は信号ラインとのみ結合でき、6 重極は制御ラインとのみ結合できる。図 24 に広帯域の光源で共鳴モードを直接励起したときの信号ライン及び制御ラインからの出力光スペクトルと伝搬モード帯域と共鳴周波数を示す。これにより、2 重極は信号光とのみ結合し、6 重極は制御光とのみ結合しているのが明らかである。

40

【0071】

以上のように本発明の構造は、2 次元フォトニック結晶をベースとする 2 次元光回路内を信号光および制御光伝播するため、2 次元面内で様々な信号処理が可能となり、高集積化が可能となる。また、2 つの共鳴モードを有するフォトニック結晶共振器を利用することで、超小型かつ低い光パワーで動作することが可能である。また、共振器のモード形状の対称性を考慮することにより、信号光と制御光を別々の導波路に結合させ、複雑な回路を構成可能することが可能である。

50

【 0 0 7 2 】

なお、導波路 4 6 , 4 8 , 6 6 , 6 8 が請求項記載の第 1 の一対の導波路に対応し、導波路 5 4 , 5 6 , 7 4 , 7 6 が第 2 の一対の導波路に対応し、2 重極モードが第 1 の共鳴モードに対応し、6 重極モードが第 2 の共鳴モードに対応する。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 7 3 】

【図 1】従来の光回路の一例の構成図である。

【図 2】本発明の第 1 の原理構成図である。

【図 3】本発明の第 2 の原理構成図である。

【図 4】本発明の光スイッチ回路の第 1 実施形態の構成図である。

10

【図 5】共鳴トンネルフィルタの透過スペクトルと制御光を ON / OFF したときの透過スペクトルを示す図である。

【図 6】制御光で信号光を変調できることを示す波形図である。

【図 7】本発明の光スイッチ回路の第 2 実施形態の構成図である。

【図 8】図 7 で用いる共振器の 2 重極モードのフィールド形状を示す図である。

【図 9】図 7 で用いる共振器の 4 重極モードのフィールド形状を示す図である。

【図 10】図 7 で用いる共振器の 6 重極モードのフィールド形状を示す図である。

【図 11】Γ K 軸に対する共振器 5 0 の 2 重極モード、6 重極モード、導波路 4 6 の導波モードそれぞれのフィールド形状を示す図である。

【図 12】Γ M 軸に対する共振器 5 0 の 2 重極モード、6 重極モード、導波路 5 4 の導波モードそれぞれのフィールド形状を示す図である。

20

【図 13】信号ラインと制御ラインから波長帯域の比較的広いスペクトルの光を導入したときの共振器内のスペクトルと信号ラインから出力されるスペクトルの計算結果を示す図である。

【図 14】共振器 5 0 の 2 重極モードと導波路 4 6 , 4 8 の導波路モードとの結合を示す図である。

【図 15】共振器 5 0 の 2 重極モードと導波路 4 6 , 4 8 の導波路モードとの結合を示す図である。

【図 16】共振器 5 0 の 6 重極モードと導波路 5 4 , 5 6 の導波路モードとの結合を示す図である。

30

【図 17】共振器 5 0 の 6 重極モードと導波路 5 4 , 5 6 の導波路モードとの結合を示す図である。

【図 18】共振器 5 0 の 6 重極モードと導波路 5 4 , 5 6 の導波路モードとの結合を示す図である。

【図 19】図 14 (A) に示す構成と、図 18 (A) , (B) に示す構成とを組み合わせた構成を示す図である。

【図 20】図 7 及び図 20 で用いる導波路の形状を示す図である。

【図 21】図 7 で用いる導波路の伝搬モード帯域と共鳴周波数との対応を示す図である。

【図 22】本発明の光スイッチ回路の第 2 実施形態の構成図である。

【図 23】図 7 で用いる導波路の伝搬モード帯域と共鳴周波数との対応を示す図である。

40

【図 24】広帯域の光源で共鳴モードを直接励起したときの信号ライン及び制御ラインからの出力光スペクトルと伝搬モード帯域と共鳴周波数を示す図である。

【符号の説明】

【 0 0 7 4 】

2 0 , 4 0 , 6 0 フォトニック結晶

2 2 , 4 2 , 6 2 スラブ

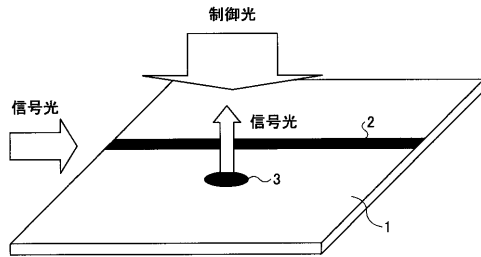
2 4 , 4 4 , 6 4 空気穴

2 6 , 2 8 , 4 6 , 4 8 , 5 4 , 5 6 , 6 6 , 6 8 , 7 4 , 7 6 導波路

3 0 , 5 0 , 7 0 共振器

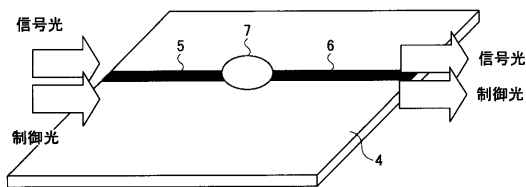
【図 1】

従来の光回路の一例の構成図



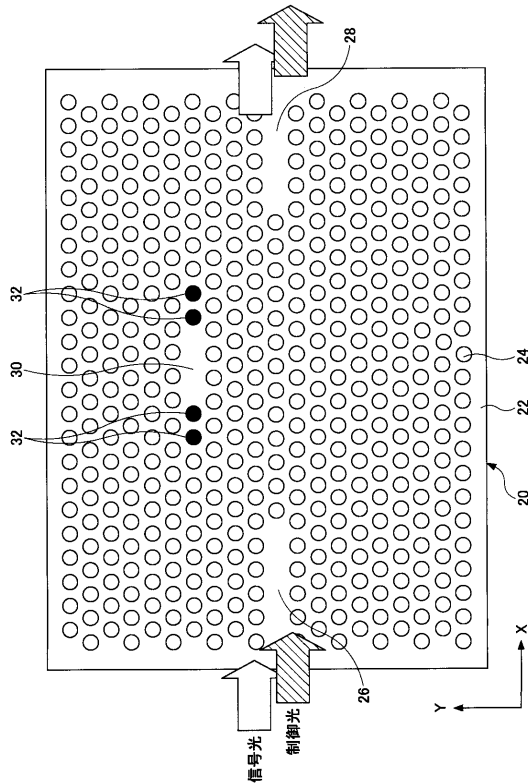
【図 2】

本発明の第1の原理構成図



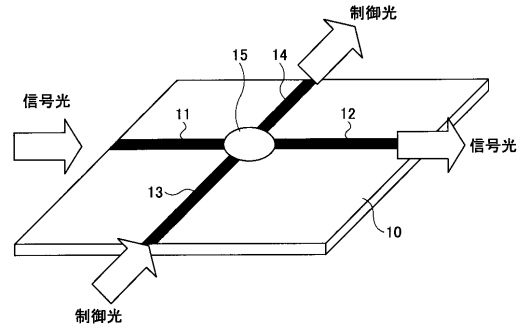
【図 4】

本発明の光スイッチ回路の第1実施形態の構成図



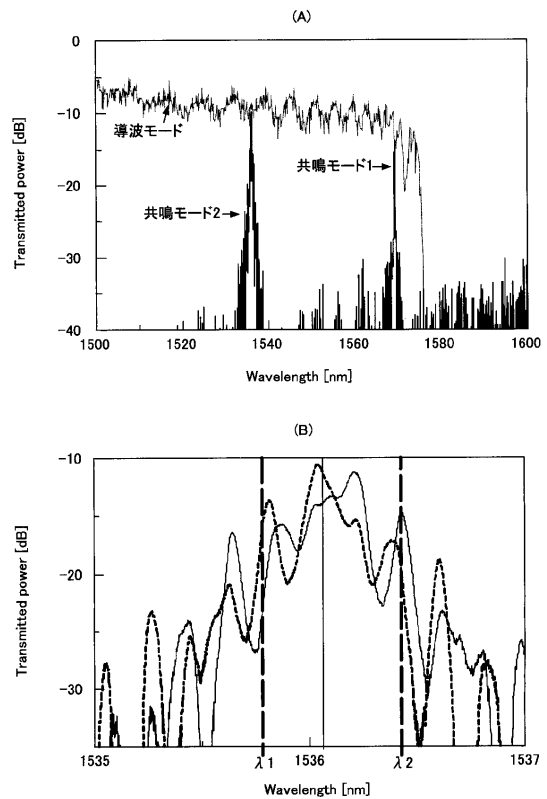
【図 3】

本発明の第2の原理構成図



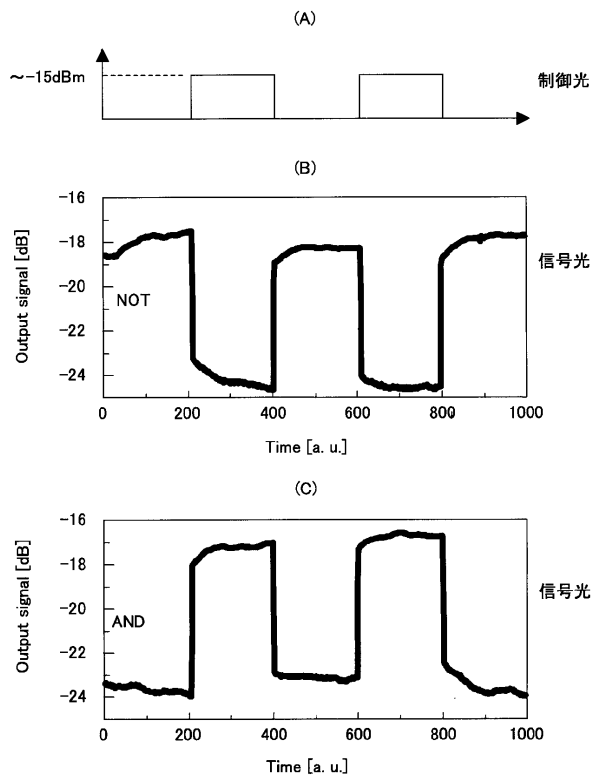
【図 5】

共鳴トンネルフィルタの透過スペクトルと制御光をON/OFFしたときの透過スペクトルを示す図



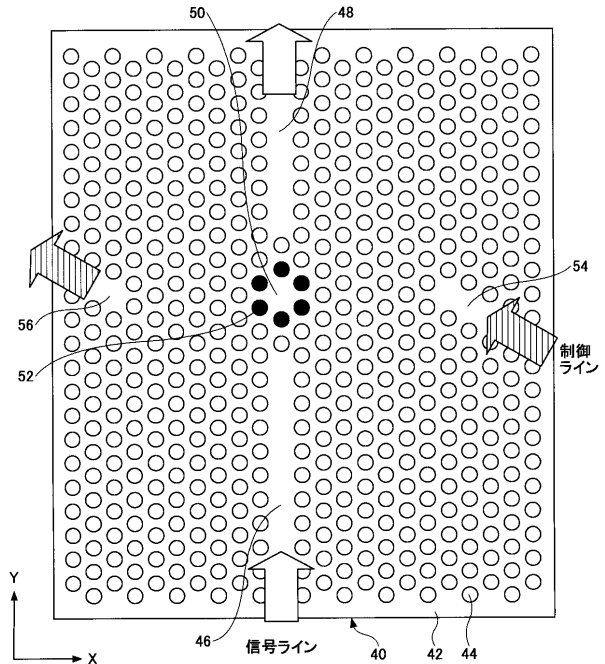
【図 6】

制御光で信号光を変調できることを示す波形図



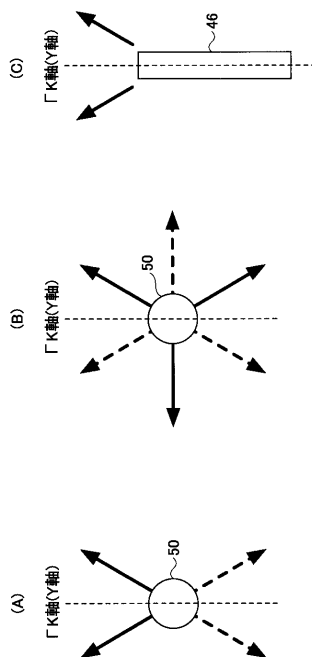
【図 7】

本発明の光スイッチ回路の第2実施形態の構成図



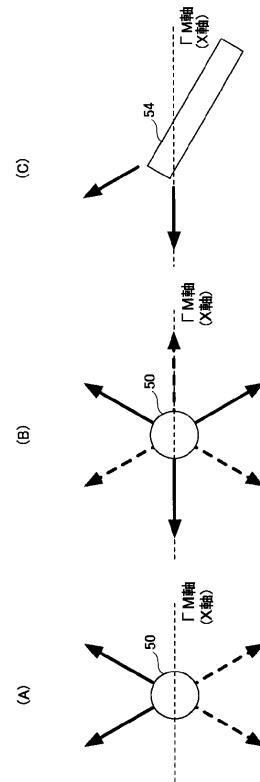
【図 1 1】

「K軸に対する共振器50の2重極モード及び4重極モード、6重極モード、導波路46の導波モードそれぞれのフィールド形状を示す図



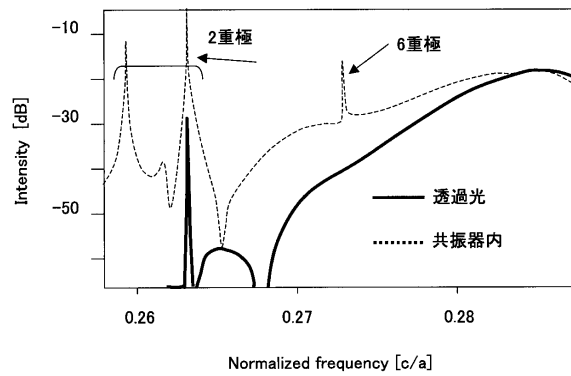
【図 1 2】

「M軸に対する共振器50の2重極モード及び4重極モード、6重極モード、導波路54の導波モードそれぞれのフィールド形状を示す図



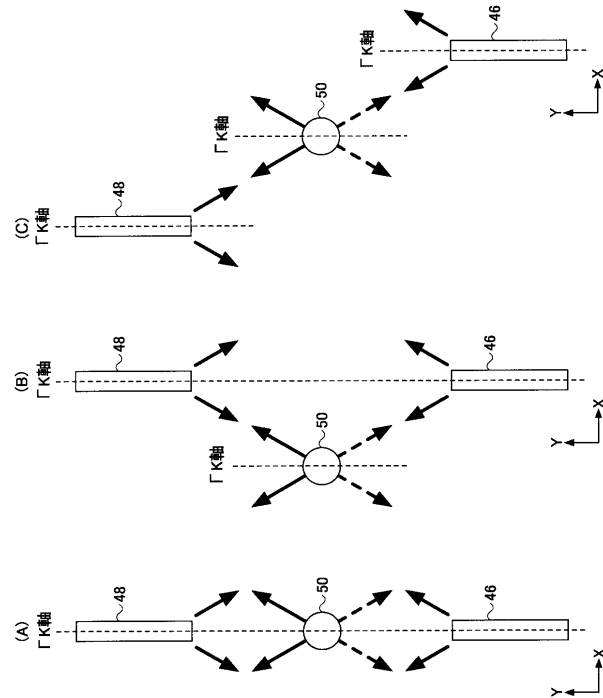
【図 13】

信号ラインと制御ラインから波長帯域の比較的大いスペクトルの光を導入したときの共振器内のスペクトルと信号ラインから出力されるスペクトルの計算結果を示す図



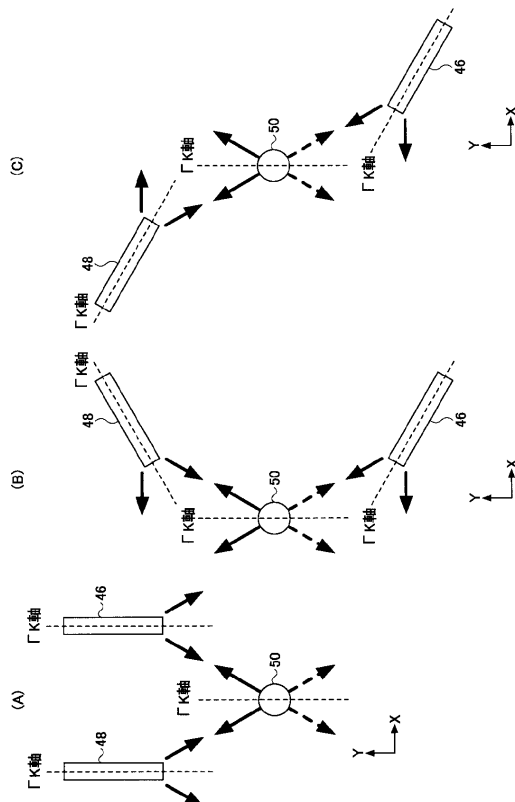
【図 14】

共振器50の2重極モード及び4重極モードと導波路46、48の導波路モードとの結合を示す図



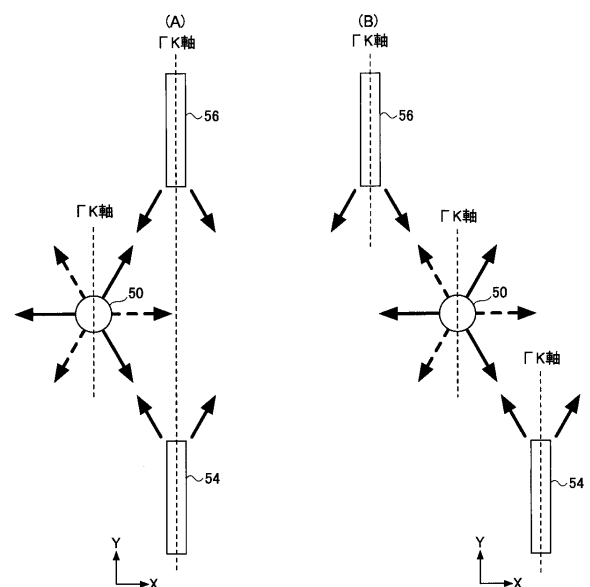
【図 15】

共振器50の2重極モード及び4重極モードと導波路46、48の導波路モードとの結合を示す図



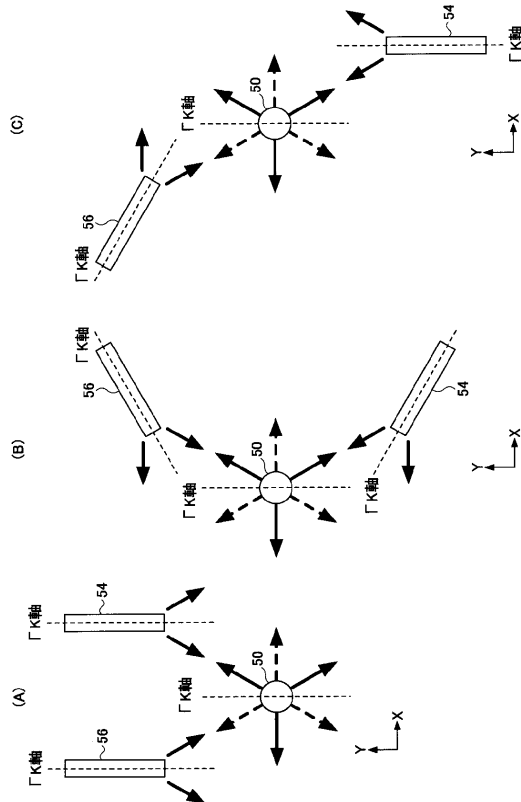
【図 16】

共振器50の6重極モードと導波路54、56の導波路モードとの結合を示す図



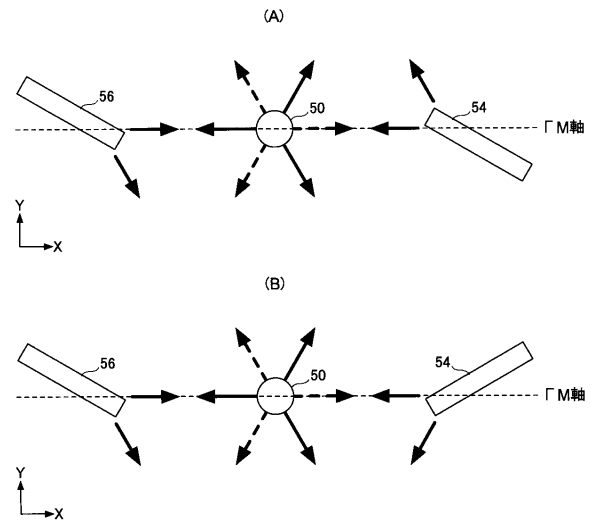
【図 17】

共振器50の6重極モードと導波路54、56の導波路モードとの結合を示す図

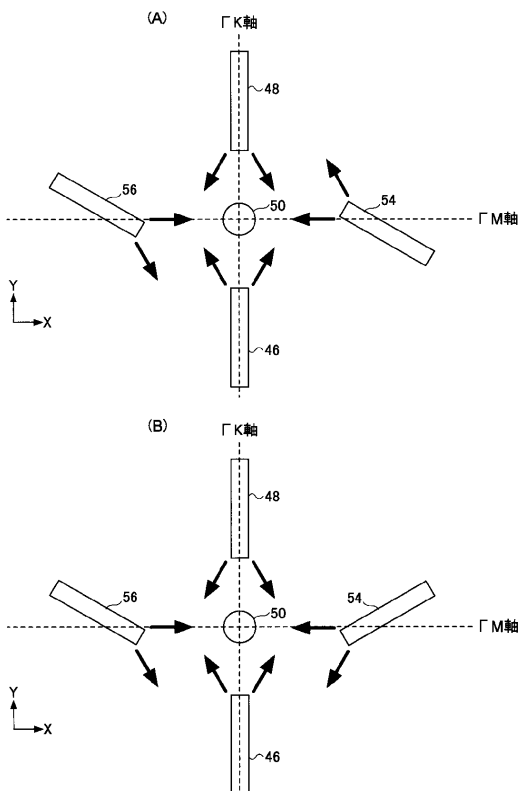


【図 18】

共振器50の6重極モードと導波路54、56の導波路モードとの結合を示す図

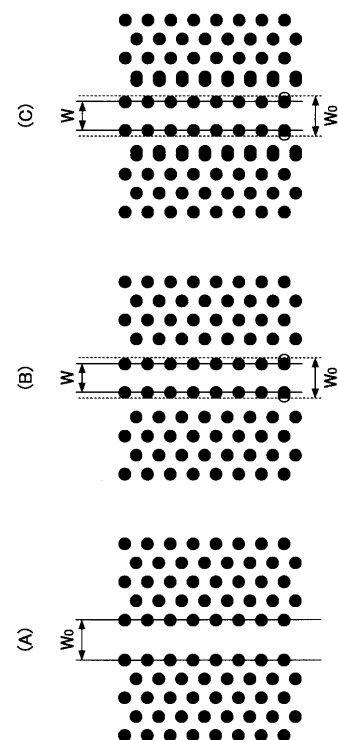


【図 19】

図14(A)に示す構成と、
図18(A), (B)に示す構成とを組み合わせた構成を示す図

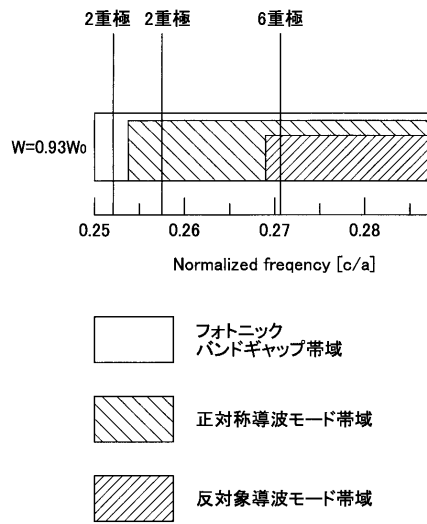
【図 20】

図7及び図20で用いる導波路の形状を示す図



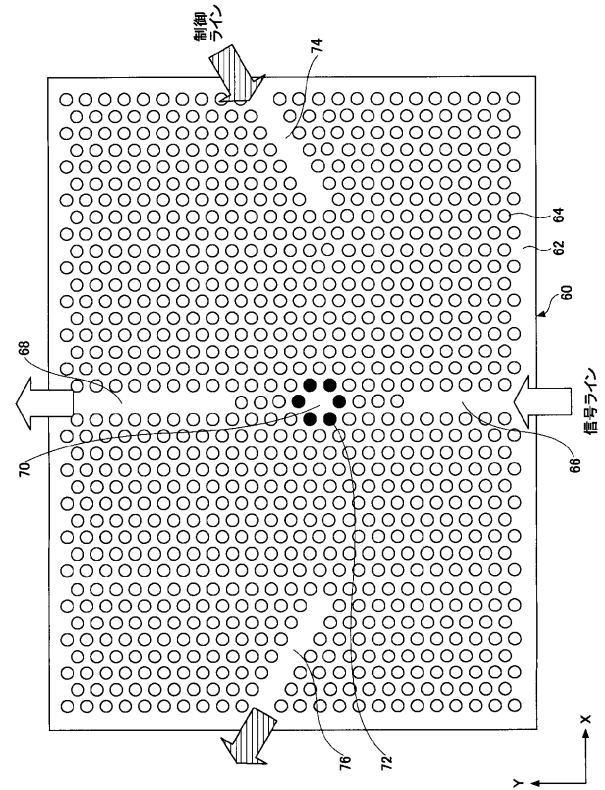
【図 2 1】

図7で用いる導波路の伝搬モード帯域と共鳴周波数との対応を示す図



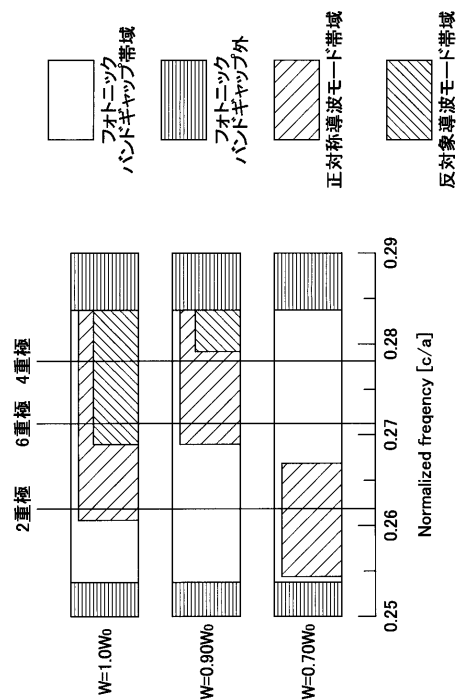
【図 2 2】

本発明の光スイッチ回路の第2実施形態の構成図



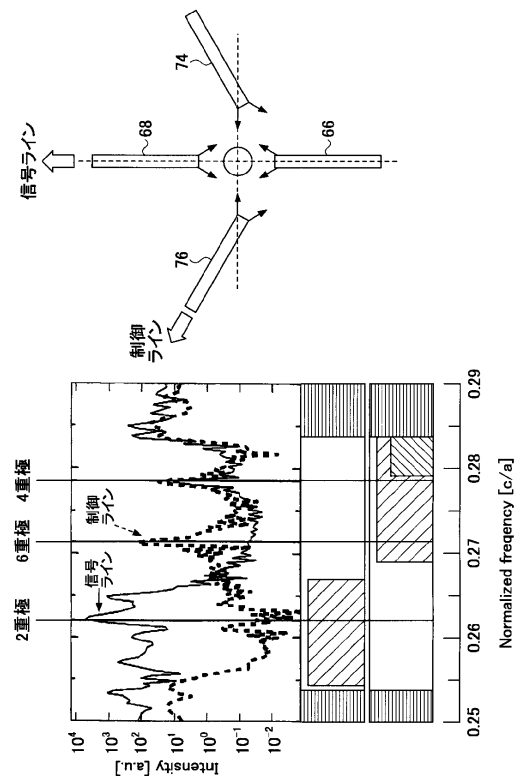
【図 2 3】

図7で用いる導波路の伝搬モード帯域と共鳴周波数との対応を示す図



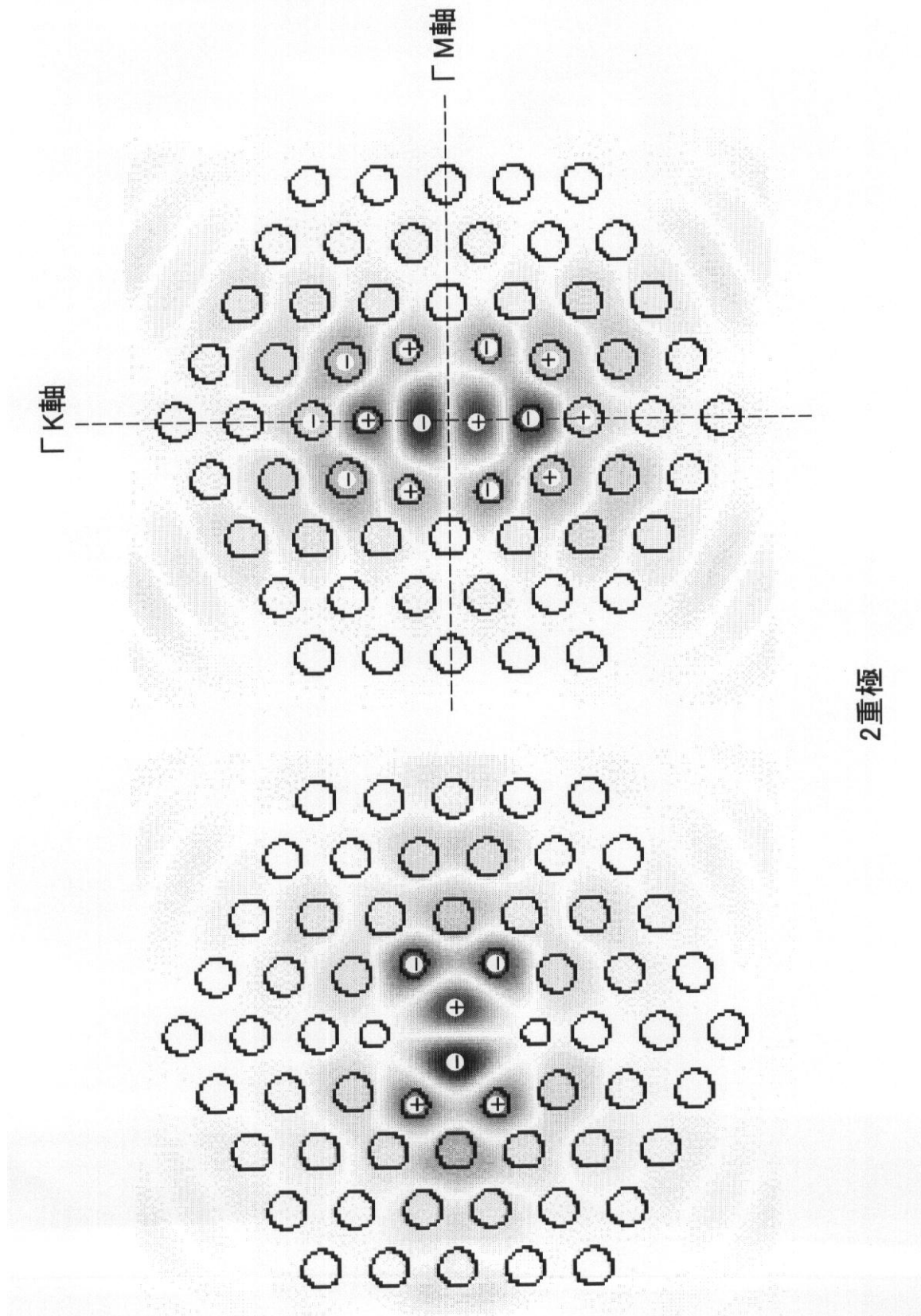
【図 2 4】

広帯域の光源で共鳴モードを直接励起したときの信号ライン及び制御ラインからの出力光スペクトルと伝搬モード帯域と共鳴周波数を示す図



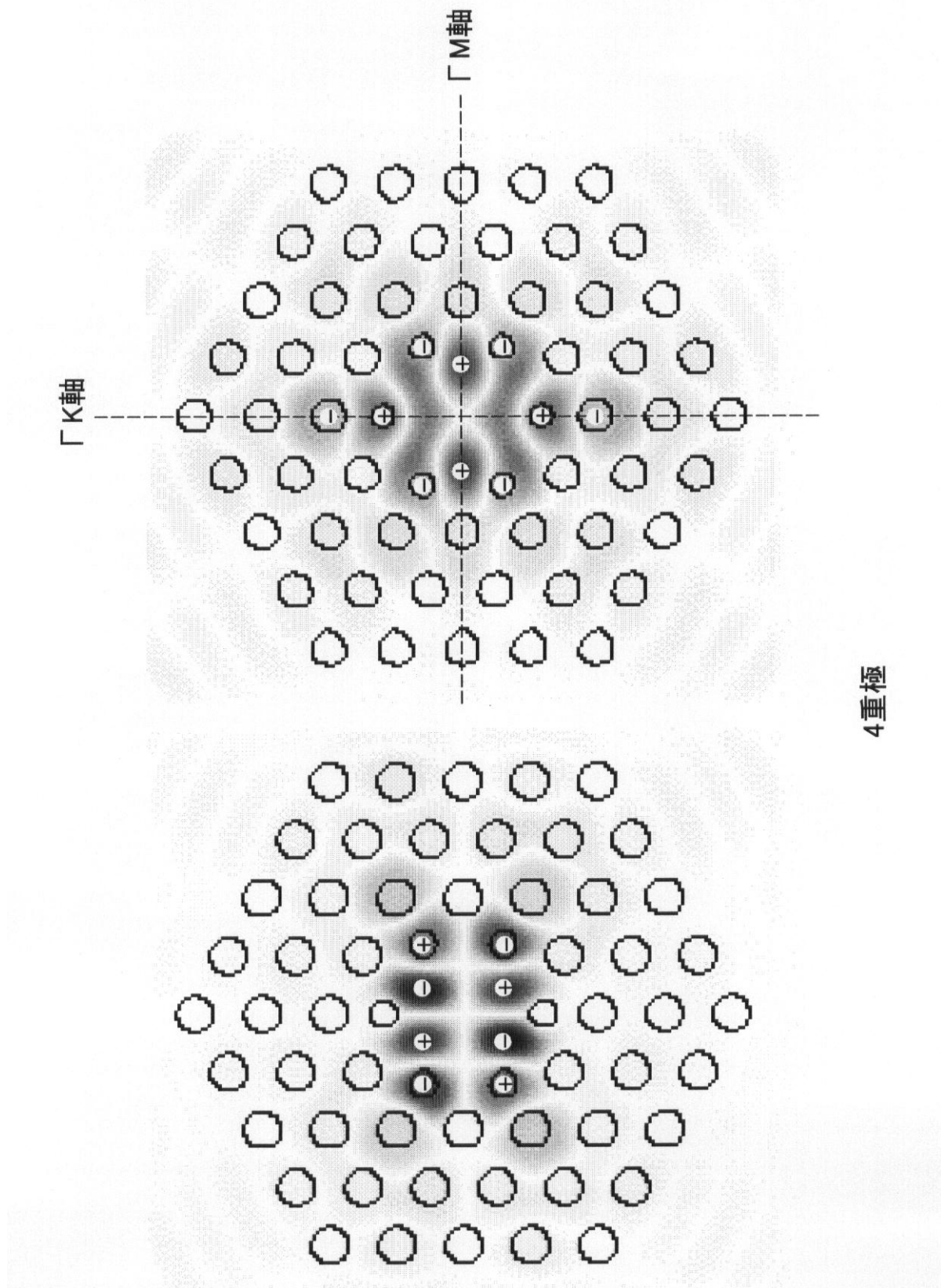
【図 8】

図7で用いる共振器の2重極モードのフィールド形状を示す図



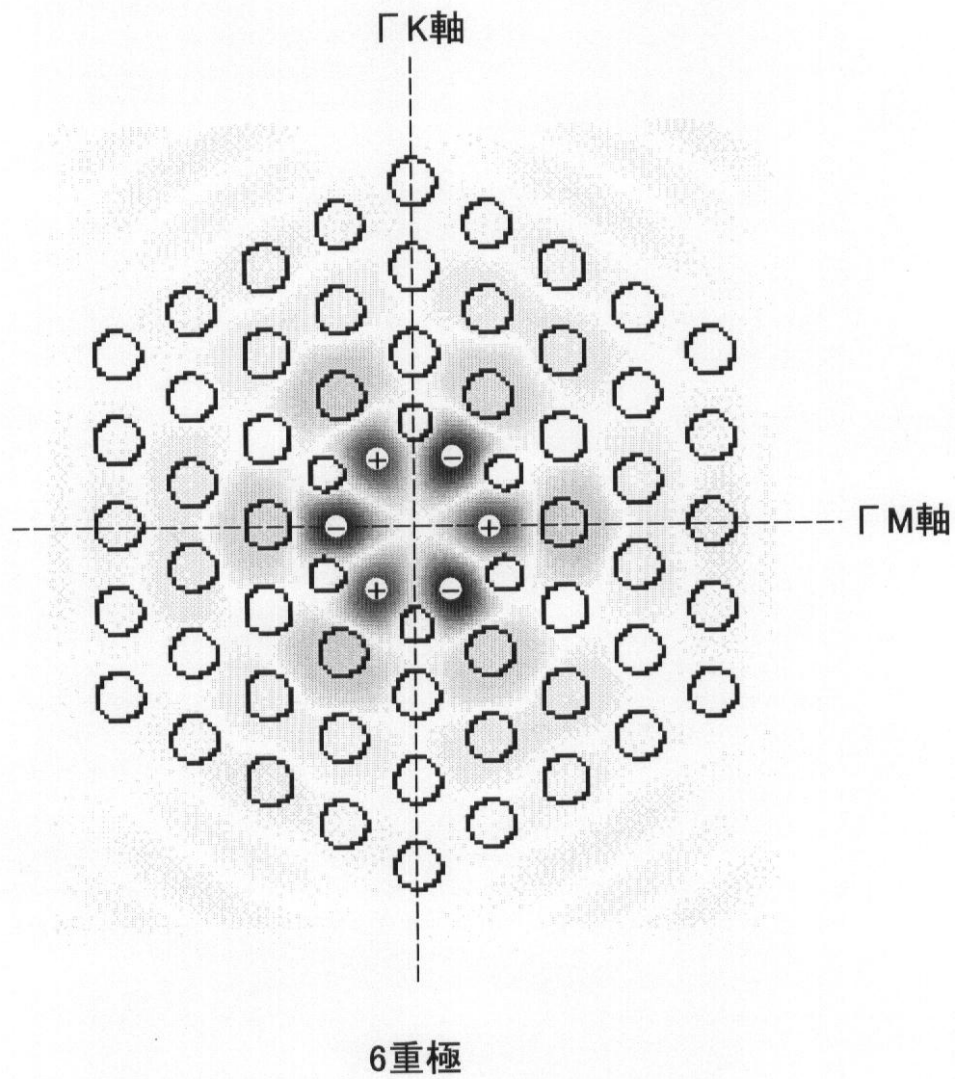
【図9】

図7で用いる共振器の4重極モードのフィールド形状を示す図



【図 10】

図7で用いる共振器の6重極モードのフィールド形状を示す図



フロントページの続き

(72)発明者 納富 雅也

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内

審査官 野田 定文

(56)参考文献 特開2001-230445(JP,A)

米国特許出願公開第2004/0001665(US,A1)

米国特許出願公開第2003/0133677(US,A1)

特開平01-142715(JP,A)

特開2005-250429(JP,A)

特開2002-268105(JP,A)

特開2005-077710(JP,A)

特開2004-045709(JP,A)

APPLIED PHYSICS LETTERS, Vol. 83, No.21, 2003, 4294-4296

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/29-7/00

JST7580(JDreamII)

JSTPlus(JDreamII)