

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2004年12月16日 (16.12.2004)

PCT

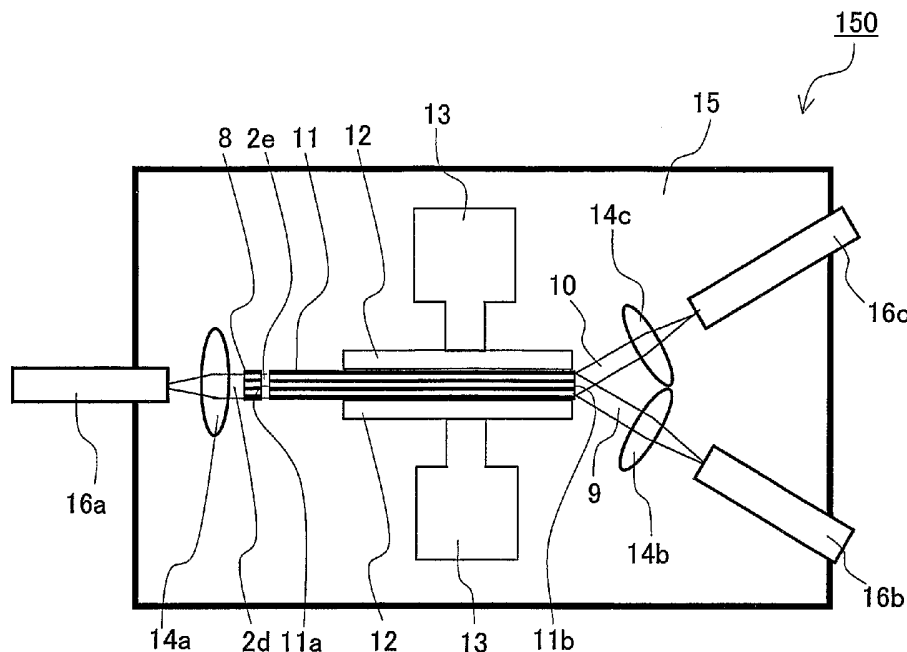
(10) 国際公開番号
WO 2004/109383 A1

- (51) 国際特許分類: G02F 1/31
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2004/008160
- (22) 国際出願日: 2004年6月4日 (04.06.2004)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2003-161532 2003年6月6日 (06.06.2003) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 日本板硝子株式会社 (NIPPON SHEET GLASS COMPANY, LIMITED) [JP/JP]; 〒5418559 大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号 Osaka (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 大家 和晃 (OYA, Kazuaki). 橘高 重雄 (KITAKA, Shigeo). 常友 啓司 (TSUNETOMO, Keiji).
- (74) 代理人: 特許業務法人池内・佐藤アンドパートナーズ (IKEUCHI SATO & PARTNER PATENT ATTORNEYS); 〒5306026 大阪府大阪市北区天満橋1丁目8番30号OAPタワー26階 Osaka (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG,

[続葉有]

(54) Title: OPTICAL PATH CONVERSION ELEMENT

(54) 発明の名称: 光路変換素子



(57) Abstract: An optical path conversion element comprising a photonic crystal exhibiting periodicity of refractive index in one direction and using as an incident end face one of end faces substantially parallel with the periodicity direction of refractive index and an exit end face opposite the incident end face, an incident section for passing an incident light through the incident end face such that a propagation light is generated in the photonic crystal by a band on a brilliant zone boundary, a means for altering the photonic band structure of the photonic crystal, and/or a means for altering the propagation optical path length, i.e. the distance from the incident end face to the exit endface.

[続葉有]

WO 2004/109383 A1



CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE,
IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF,
BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN,
TD, TG).

2文字コード及び他の略語については、定期発行される
各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語
のガイダンスノート」を参照。

添付公開書類:

— 国際調査報告書

(57) 要約: 1方向に屈折率周期性を有し、前記屈折率周期方向と略平行である端面の1つを入射端面とし、前記入射端面に対向する端面を出射端面とするフォトニック結晶と、前記フォトニック結晶中にブリルアンゾーン境界上のバンドによる伝搬光を生じさせるように入射光を前記入射端面から入射する入射部と、前記フォトニック結晶のフォトニックバンド構造を変化させる手段および/または前記入射端面から前記出射端面までの距離である伝搬光路長を変化させる手段とを備えている。

明 細 書

光路変換素子

技術分野

本発明は、光通信システム、光交換システムあるいは光インタコネクションなどに用いられる光路変換素子に関し、特にフォトニック結晶を用いた光路変換素子に関するものである。

背景技術

光通信、光交換システムあるいは光インタコネクションなどの分野においては、信号光を所望の経路に伝搬させるために、光路を切り換える機能を有する光学素子が必要とされる。光路を切り換えるもっとも基本的な手段は反射鏡等により、光の方向を機械的に変えることである。最近、この基本的な原理に基づき、微小電気機械システム（MEMS：Micro Electro Mechanical Systems）を用いて反射鏡の角度を変更することで、光路の切り換えを行う光路変換素子が開発されている。機械的に反射鏡の角度を変更するので、大きな角度の光路の切り換えが容易である反面、可動部を有することから、振動や衝撃により安定性には問題がある。

可動部がない光路変換素子として、例えば異なる屈折率をもつ媒体の界面での光の屈折角が両媒体の屈折率に依存することを利用する方法が考えられている。例えば、プリズムを有する構造とし、このプリズムの屈折率を何らかの方法により変化させることができれば、プリズムから出射される光の方向を変化させることができる。プリズムの代わりに例えば回折格子を用いてもよい。

しかし各種の物理的手段（例えば、媒体への電界印加、音波印加および光照射等）により、媒体の屈折率を変化させても、多くは1%にも満たない程度の変化である。したがって、屈折率変化により光路を変換しても、光路の角度変化が小さいため、光路を変換させた光のビーム広がり角を十分小さくし、かつ変換光の伝搬距離を長くする必要がある。そのため、小型化等が不可能であるという問題があった。

また、近年、フォトニック結晶の特異な性質を利用した光路変換素子が提案されている。フォトニック結晶は、屈折率の異なる誘電体を、光の波長程度の周期で周期的に並べた構造を有するものである。このフォトニック結晶は、「フォトニックバンドギャップによる光の閉じ込め」、
「特異なバンド構造による非常に大きな波長分散」および「伝搬光の群速度異常」等の特徴的な性質を有していることはよく知られており、このような特性を利用した数多くの光学素子が提案あるいは研究されている（例えば、特開2002-267845号公報）。

フォトニック結晶を利用した光路変換素子（光線偏向装置）が、例えば特開2002-350908号公報に開示されている。この光路変換素子は、伝搬光の波長が、フォトニックバンドギャップ波長とは異なるように設計されており、外部エネルギーによってフォトニックバンド構造を変化させることで、フォトニック結晶内での光の進行方向を変化させる。フォトニック結晶内を伝搬する伝搬光はフォトニックバンド構造によるフォトニック分散面のポテンシャル勾配の方向に伝搬していく。そこで、この従来の光路変換素子は、フォトニックバンド構造を外部エネルギーによって変化させることにより、伝搬光の進行方向を変化させている。

しかし、このフォトニック結晶を利用した従来の光路変換素子では光の進行方向に対して垂直な方向における光の閉じ込めが不十分である。

- そのため、光路を変換されたのちフォトニック結晶からの出射される光の量が少ない。つまり、回収効率が極めて低い等の問題があった。また、光路の角度変化がとくに大きいわけではない。そのため、数100ミクロン以上の大きさのフォトニック結晶が必要となる。したがって、小型化および集積化の障害となるという問題を有している。

発明の開示

- 本発明は上記問題点を解決するためになされたもので、フォトニック結晶を用いて、小型化が可能な光路変換素子を提供することを目的とする。

- 本発明の光路変換素子は、1方向に屈折率周期性を有し、前記屈折率周期方向と略平行である端面の1つを入射端面とし、前記入射端面に対向する端面を出射端面とするフォトニック結晶と、前記フォトニック結晶中にブリルアンゾーン境界上のバンドによる伝搬光を生じさせるように入射光を前記入射端面から入射する入射部と、前記フォトニック結晶のフォトニックバンド構造を変化させる手段および／または前記入射端面から前記出射端面までの距離である伝搬光路長を変化させる手段とを備えている。

20 図面の簡単な説明

図1は、一方向に屈折率周期性を有するフォトニック結晶の光の伝搬を示す断面図である。

図2は、図1に示したフォトニック結晶の入射光も含むバンド図である。

- 25 図3は、図2のバンド図をブリルアンゾーン中央についてZ方向に限定して示したバンド図である。

図4は、入射端面に対して斜めに入射光を入射させた場合のフォトニック結晶中の光の伝搬を示す断面図である。

図5は、図4に示したフォトニック結晶の入射光も含むバンド図である。

- 5 図6は、フォトニック結晶の入射端面に対して斜めに入射光を入射させた場合に、伝搬光がZ軸方向に伝搬する場合を示す断面図である。

図7は、図6に示したフォトニック結晶の入射光も含むバンド図である。

- 10 図8は、図7のバンド図をブリルアンゾーン境界上についてZ方向に限定して示したバンド図である。

図9Aは、第1バンドの伝搬形状を模式的に示した断面図である。

図9Bは、図9AをY方向より見たときの電場の振幅を示す図である。

図9Cは、第2バンドの伝搬形状を模式的に示した断面図である。

図9Dは、図9CをY方向より見たときの電場の振幅を示す図である。

- 15 図10は、図9Aおよび図9Cに示した第1バンドおよび第2バンドが重ね合あわされた伝搬光の伝搬形状を模式的に示した断面図である。

図11は、フォトニック結晶においてブリルアンゾーン境界上における伝搬を実現する回折格子を用いる方法を示す断面図である。

- 20 図12は、ブリルアンゾーン境界上における伝搬を実現する位相格子を用いる方法を示す断面図である。

図13は、フォトニック結晶中にブリルアンゾーン境界上のバンドである第1バンドおよび第2バンドの伝搬光が伝搬している伝搬形状を示す断面図である。

- 25 図14Aは、図13に示すフォトニック結晶において出射端面の位置が、伝搬光の山または谷の位置である場合の出射光を示す断面図である。

図14Bは、図13に示す出射端面の位置が、伝搬光の谷と山の間

位置である場合の出射光を示す断面図である。

図14Cは、図13に示す出射端面の位置が、伝搬光の山と谷の中間位置である場合の出射光を示す断面図である。

5 図15は、実施の形態1に係る光路変換素子の構成を示す平面図である。

図16は、実施の形態1に係る他の光路変換素子の構成を示す平面図である。

図17は、フォトニック結晶の周期を直接変化させる方法を説明するための模式図である。

10 図18Aは、実施の形態2に係る第1の光路変換素子の構成を示す平面図である。

図18Bは、実施の形態2に係る第1の光路変換素子の光路変換部の構成を示す斜視図である。

15 図18Cは、実施の形態2に係る第1の光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。

図19は、実施の形態2に係る第2の光路変換素子の構成を示す平面図である。

図20Aは、実施の形態2に係る第3の光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。

20 図20Bは、実施の形態2に係る第4の光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。

図21Aは、実施の形態3に係る光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。

25 図21Bは、実施の形態3に係る他の光路変換素子の構成を模式的に説明するための側面図である。

図22は、フォトニック結晶の伝搬光路長を変化させる方法を説明す

るための模式図である。

図 2 3 A は、実施の形態 4 に係る光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。

図 2 3 B は、実施の形態 4 に係る他の光路変換素子の構成を模式的に
5 説明するための断面図である。

図 2 3 C は、実施の形態 4 に係るさらに他の光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。

図 2 4 は、フォトニック結晶の T E 偏光に対するバンド図である。

図 2 5 は、計算例 1 におけるシミュレーション結果である電場の強度
10 分布図である。

図 2 6 は、計算例 1 の第 1 参考例におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。

図 2 7 は、計算例 1 の第 2 参考例におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。

15 図 2 8 は、フォトニック結晶の T E 偏光に対するバンド図である。

図 2 9 は、計算例 2 におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。

図 3 0 は、計算例 3 で用いるフォトニック結晶の構成を示す断面図である。

20 図 3 1 は、計算例 3 におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。

図 3 2 は、計算例 4 におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。

図 3 3 は、計算例 5 におけるシミュレーション結果である電場の強度
25 分布図である。

図 3 4 A は、計算例 6 におけるシミュレーション結果である電場の強

度分布図である。

図34Bは、計算例7におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。

5 発明を実施するための最良の形態

本発明の光路変換素子は、1次元フォトニック結晶中にブリルアンゾーン境界上のバンドによる伝搬光を生じさせるように入射光を入射端面から入射する入射部と、前記フォトニック結晶のフォトニックバンド構造を変化させる手段および／または前記入射端面から前記出射端面までの距離である伝搬光路長を変化させる手段とを備えているので、出射光の光路を十分大きな角度で変換させることができる。したがって、光路変換素子を小型化および集積化することができる。

また、好ましくは、前記入射光の真空中における波長を λ_0 とし、前記入射端面と接触している媒体の屈折率を n とし、前記フォトニック結晶の周期を a とした場合に、前記入射部は、前記入射光を前記入射端面に対して、以下の式を満たす入射角 θ で入射する。

$$0.45 < n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) < 0.55$$

それにより、ブリルアンゾーン境界上のフォトニックバンドを利用することができる。ブリルアンゾーン境界上の第1バンド光と高次伝搬バンド光を混在させてフォトニック結晶内を伝搬させることができる。

なお、入射角 θ は、入射端面の法線と入射光とのなす角度である。また、周期とは、フォトニック結晶において周期的に積層されている基本構成要素の厚さ（積層方向の長さ）である。例えば、2種類の媒質が交互に積層されたフォトニック結晶であれば、それらの媒質の一層あたりの厚さの和である。また、入射端面と接触している媒質とは、入射端面の周囲にある媒質のことである。

また、好ましくは、前記入射部は、前記入射端面に近接もしくは接触して配置された回折格子または位相格子を備えている。それにより、ブリルアンゾーン境界上のフォトニックバンドを利用することができ、ブリルアンゾーン境界上の第1バンド光と高次伝搬バンド光を混在させて

5 フォトニック結晶内を伝搬させることができる。

また、好ましくは、前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶にエネルギーを供給することで、前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つの屈折率を変化させ、前記

10 フォトニック結晶のフォトニックバンド構造を変化させる。それにより、容易に、光路変換を行うことができる光路変換素子を提供できる。

また、好ましくは、前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つは電気光学効果を有する材料であり、前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に電界を印加する電界印加部とする。そのため、フォトニック結晶を構成する材料のうち

15 少なくとも1つの屈折率を可逆的に変化させることができる。したがって、可逆的に光路変換ができる光路変換素子を提供できる。

また、好ましくは、前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つは半導体材料であり、前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に電流を注入する電流注入部とする。

20 そのため、フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つの屈折率を可逆的に変化させることができる。したがって、可逆的に光路変換ができる光路変換素子を提供できる。

また、好ましくは、前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つは音響光学材料であり、前記フォトニックバンド構造を変化

25 させる手段は、前記フォトニック結晶に超音波を印加する超音波印加部とする。そのため、フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも

1つの屈折率を可逆的に変化させることができる。したがって、可逆的に光路変換ができる光路変換素子を提供できる。

5 また、好ましくは、前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つの1部または全部は非線形光学材料であり、前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に光を照射する光源とする。そのため、フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つの1部または全部の屈折率を可逆的に変化させることができる。したがって、可逆的に光路変換ができる光路変換素子を提供できる。

10 また、好ましくは、前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に外力を印加することで前記フォトニック結晶の周期を変化させて、前記フォトニックバンド構造を変化させる周期変化手段である。それにより、フォトニック結晶の周期を変化させることで、光路を変換することができるので、簡単な仕組みで動作する光路変換素子を提供できる。

15 また、好ましくは、前記周期変化手段は、前記フォトニック結晶の前記屈折率周期方向に垂直な端面の少なくともどちらか一方に接続された外力印加部と、前記外力印加部および前記フォトニック結晶における、前記フォトニック結晶の前記屈折率周期方向の長さを固定する支持筐体とを備え、前記外力印加部の体積が変化することで、前記フォトニック結晶に外力を印加する。そのため、フォトニック結晶の周期の変化を容易に変化させることができる。それにより、光路変換を容易に行うことができる光路変換素子を提供できる。

25 また、好ましくは、前記外力印加部は圧電素子である。そのため、フォトニック結晶の周期の変化を制御しやすい。それにより、光路変換の制御を容易に行うことができる光路変換素子を提供できる。

また、好ましくは、前記周期変化手段は、前記フォトニック結晶を挟

んで前記フォトニック結晶の前記屈折率周期方向に対向配置された一対の電磁石を備え、前記電磁石同士の引力を用いて前記フォトニック結晶に外力を印加する。そのため、フォトニック結晶の周期の変化を容易に制御しやすい。それにより、光路変換の制御を容易に行うことができる

5 光路変換素子を提供できる。

また、好ましくは、前記周期変化手段は、前記フォトニック結晶を挟んで前記フォトニック結晶の前記屈折率周期方向に対向配置された電磁石および磁性体を備え、前記電磁石と前記磁性体との引力を用いて前記フォトニック結晶に外力を印加する。そのため、フォトニック結晶の周期の変化を容易に制御しやすい。それにより、光路変換の制御を容易に行うことができる光路変換素子を提供できる。

また、好ましくは、前記周期変化手段は、前記フォトニック結晶に接続された基板と、前記基板を加熱あるいは冷却できる温度可変装置とを備え、前記温度可変装置によって加熱あるいは冷却された前記基板の膨張あるいは収縮を用いて、前記フォトニック結晶に外力を印加する。そのため、フォトニック結晶の周期の変化を容易に制御しやすい。それにより、光路変換の制御を容易に行うことができる光路変換素子を提供できる。

また、好ましくは、前記伝搬光路長を変化させる手段は、前記入射端面および前記出射端面の少なくともどちらか一方に接続された外力印加部と、前記外力印加部および前記フォトニック結晶における、前記フォトニック結晶の前記伝搬光路長方向の長さを固定する支持筐体とを備え、前記外力印加部の体積が変化することで、前記フォトニック結晶に外力を印加する。そのため、フォトニック結晶の伝搬光路長の変化を容易に変化させることができる。それにより、光路変換を容易に行うことができる光路変換素子を提供できる。

また、好ましくは、前記外力印加部は圧電素子である。そのため、フォトニック結晶の伝搬光路長の変化を制御しやすい。それにより、光路変換の制御を容易に行うことができる光路変換素子を提供できる。

5 また、好ましくは、前記伝搬光路長を変化させる手段は、前記フォトニック結晶を挟んで前記フォトニック結晶の前記伝搬光路長方向に対向配置された一対の電磁石を備え、前記電磁石同士の引力を用いて前記フォトニック結晶に外力を印加する。そのため、フォトニック結晶の伝搬光路長の変化を容易に制御しやすい。それにより、光路変換の制御を容易に行うことができる光路変換素子を提供できる。

10 また、好ましくは、前記伝搬光路長を変化させる手段は、前記フォトニック結晶を挟んで前記フォトニック結晶の前記伝搬光路長方向に対向配置された電磁石および磁性体を備え、前記電磁石と前記磁性体との引力を用いて前記フォトニック結晶に外力を印加する。そのため、フォトニック結晶の伝搬光路長の変化を容易に制御しやすい。それにより、光路変換の制御を容易に行うことができる光路変換素子を提供できる。

15 また、好ましくは、前記伝搬光路長を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に接続された基板と、前記基板を加熱あるいは冷却できる温度可変装置とを備え、前記温度可変装置によって加熱あるいは冷却された前記基板の膨張あるいは収縮を用いて、前記フォトニック結晶に外力を印加する。そのため、フォトニック結晶の周期の変化を容易に制御しやすい。それにより、光路変換の制御を容易に行うことができる光路変換素子を提供できる。

20 以下、本発明の実施の形態について図を用いて具体的に説明する。なお、各図において同一の機能を有する部材には同一符号を付し、説明を省略する。

フォトニック結晶の周期方向（屈折率周期方向）に平行な端面より、

適当な周波数の平面波を垂直入射させると、周期構造のない方向に沿ってブリルアンゾーン中央におけるフォトリックバンド構造に由来した伝搬が生じ、最低次のバンドによる第1バンド伝搬光と最低次ではない高次の伝搬バンドによる高次伝搬バンド光がそれぞれフォトリック結晶内

5 を伝搬する。

高次伝搬バンド光は、「非常に大きな波長分散」や「群速度異常」といったフォトリックバンド構造に由来した特徴的な特性を有しており、これらを利用してさまざまな光学素子に応用することができる。これに対して、第1バンド光は上述のような特性を有しておらず、通常の均質媒

10 体における伝搬とほぼ同様の振る舞いをする。

しかし、高次伝搬バンド光がフォトリック結晶内を伝搬する場合には必ず第1バンド光も伝搬するため、高次伝搬バンド光を利用する場合には第1バンド光は単なる損失でしかなく、入射光エネルギーの利用効率を低下させてしまうのみならず、迷光として素子のS/N比を低下させ

15 る原因ともなる。

しかし、本発明者らの研究によると、ブリルアンゾーン境界上のフォトリックバンドを利用することによって、第1バンド光も高次伝搬バンド光と同様の特徴的な特性を持つということが明らかになった。

これらブリルアンゾーン境界上の第1バンド光と高次伝搬バンド光が

20 混在してフォトリック結晶内を伝搬することにより、伝搬光の電場形状が山と谷を交互に繰り返す特徴的な伝搬形状を示す。このとき伝搬形状のどの位置に出射側端面がくるかによって、その出射端面から出射される出射光の方向が大きく異なる。本実施の形態に係る光路変換素子は、上述の現象を利用したものである。

25 図1は、一方向に屈折率周期性を有するフォトリック結晶1の光の伝搬を示す断面図である。図1において、光の伝搬方向をZ軸方向とし、

光の伝搬方向に対して垂直な方向をY軸方向とする。フォトニック結晶1は、Y軸方向にのみ屈折率周期性を有する1次元フォトニック結晶である。物質5aおよび物質5bとが、交互にY軸方向に積層されて、多層構造5を形成している。物質5aの厚さは t_A であり、屈折率は n_A とする。また、物質5bの厚さは t_B であり、屈折率は n_B とする。フォトニック結晶1の周期aは、 $(t_A + t_B)$ である。

フォトニック結晶1が光導波路を構成している。フォトニック結晶1の入射端面1aおよび出射端面1bは、フォトニック結晶1の周期方向と平行である端面であり、入射端面1aおよび出射端面1bは対向している。フォトニック結晶1の入射端面1aから、真空中の波長が λ_0 の平面波を入射光2として入射させると、伝搬光4としてフォトニック結晶1内を伝搬する。この伝搬光4がフォトニック結晶1内の物質5aおよび物質5bの多層膜内でどのように伝搬するかは、フォトニックバンドを計算し図示することにより知ることができる。バンド計算の方法は、例えば“Photonic Crystals”, Princeton University Press (1995)あるいは、Physical Review B 44 巻、16 号、p.8565、1991 年、などに詳しく述べられている。

以下、フォトニック結晶1の入射端面1aより平面波である入射光2を入射させたときの、フォトニック結晶1内における伝搬光4の伝搬について図2を加えて考える。図2は、図1に示したフォトニック結晶1の入射光2も含むバンド図である。図2において、右側がフォトニック結晶1中のバンド図であり、左側がフォトニック結晶1の外側（入射光2が入射してくる個所）である均質媒体（空気）のバンド図である。

このときのフォトニック結晶1の条件は、まず物質5aの屈折率 n_A が2.1011であり、厚さ t_A が周期aを用いて表すと、 $t_A = 0.3a$ である。また、物質5bの屈折率 n_B が1.4578であり、厚さ t_B

が周期 a を用いて表すと、 $t_B = 0.7a$ である。図 2 は、このような物質 5 a および物質 5 b を交互に重ねた周期 a の多層構造体であるフォ
トニック結晶 1 の、Y 軸および Z 軸方向におけるバンド計算の結果を示
している。なお、フォトニック結晶 1 は、物質 5 a および物質 5 b の各
5 層面が XZ 平面において無限に広がっており、Y 方向に無限に積層され
ているとする。なお、図 2 は、TE 偏光の第 1 および第 2 バンドについ
て第 1 ブリルアンゾーンの範囲内で示したものである。図 2 の右側に示
しているフォトニック結晶 1 中のバンド図は、規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$
10 c が同じ値となる点を結んだ等高線状で表され、この等高線状の線のこ
とを以下では等高線という。各線の添字は規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$ の
値を表している。なお、規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$ は、入射光 2 の角振
動数 ω 、フォトニック結晶 1 の周期 a および真空中での光速 c を用いて
表している。また、規格化周波数は、入射光 2 の真空中の波長 λ_0 を用
いて、 a / λ_0 と表すこともできる。以下では簡単に規格化周波数 $a /$
15 λ_0 と記述する。

図 2 において、ブリルアンゾーンの Y 軸方向の範囲は $\pm\pi / a$ である
が (ブリルアンゾーンの Y 軸方向の幅は $2\pi / a$)、Z 軸方向には周期性
がないのでブリルアンゾーンの境界が存在せず、どこまでも等高線が広
がっている。なお、TE 偏光とは電場の向きが X 軸方向である偏光であ
20 る。また、磁場の向きが X 軸方向の偏光である TM 偏光 (磁場の向きが
X 軸方向) のバンド図は、TE 偏光のバンド図に類似しているが幾分異
なった形状となる。

矢印 401 はフォトニック結晶 1 中の伝搬光 4 の第 1 バンドのエネル
ギー進行方向をあらわしている。また、矢印 402 はフォトニック結晶
25 1 中の伝搬光 4 の第 2 バンドのエネルギー進行方向を表している。

また、図 2 の左側に示しているフォトニック結晶 1 の外側である均質

媒体（空気）のバンド図は、半径 r が下記式で表される球（ YZ 平面においては円）となる。なお、 n は、入射端面 $1a$ と接触している媒体（フォトリック結晶 1 の外側である均質媒体）の屈折率である。

$$r = n \cdot (a / \lambda_0) \cdot (2\pi / a)$$

- 5 なお、上式の右辺の $(2\pi / a)$ は、フォトリック結晶のバンド図（図 2）に対応させるための係数である。また、矢印 200 は入射光 2 の波数ベクトルである。

図 3 は、図 2 のバンド図をブリルアンゾーン中央について Z 方向に限定して示したバンド図である。縦軸は規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$ ($= a / \lambda_0$)、横軸は波数ベクトル k_z の大きさをそれぞれ示している。なお、
10 図 3 では第 3 バンドも図示している。図 3 よりわかるように、第 1 バンドと高次バンド（第 2 および第 3 バンド）では、その特性に大きな差がある。つまり、第 1 バンドの規格化周波数 a / λ_0 （縦軸）と波数ベクトル k_z （横軸）はほぼ比例するため、実効屈折率も λ_0 の変化に対してほとんど不変である。しかし、高次バンドでは実効屈折率が λ_0 により大きく変化し、 k_z が 0 に近づいても a / λ_0 の値はほぼ一定値である。
15 つまり、実効屈折率が 1 未満になることもある。

また、図 3 に示すバンド曲線を k_z で微分した値（すなわち接線の傾き）が伝搬光の群速度となることはよく知られている。図 3 の場合、高
20 次バンドでは、 k_z の値が小さくなるにつれてバンド曲線の接線の傾きは急速に小さくなり、 $k_z = 0$ のとき 0 となる。これが、フォトリック結晶に特有の群速度異常である。フォトリック結晶における群速度異常は極めて大きく、かつ通常の均質物質の分散とは逆（入射光の波長が長くなるにつれて群速度が遅くなる）である。したがって、高次バンド光
25 を利用することができる光導波路は、光遅延素子や光通信における分散補償素子などの光制御素子に用いることができる。

真空中での波長が λ_0 の入射光2がフォトニック結晶1の端面1aに垂直に入射し、この光に対する伝搬ベクトルが複数存在する場合、フォトニック結晶1内では最低次のバンド（第1バンド）による波数ベクトル k_{z_1} の伝搬光と、それ以上の高次バンドによる波数ベクトル k_{z_i} （ $i=2, 3, 4 \dots$ ）の伝搬光とが存在する。なお、入射光2に対するバンドが最低次のバンドのみであれば、第1バンドの伝搬光のみがフォトニック結晶1内を伝搬することになる。フォトニック結晶1内におけるこれらの伝搬光の波長は、第1バンドの伝搬光の波長は $\lambda_{z_1} = 2\pi/k_{z_1}$ であり、高次バンドの伝搬光の波長は $\lambda_{z_2} = 2\pi/k_{z_2}$ として表される。フォトニック結晶1内において、各伝搬光4の進行方向は図2に示された等高線の法線方向（矢印401および矢印402の向き）となるため、いずれのバンドによる伝搬光4もZ軸方向に伝搬していく。

次に、図1に示したフォトニック結晶1の端面1aに対して、斜めに入射光2aを入射した場合について説明する。図4は、入射端面に対して斜めに入射光を入射させた場合のフォトニック結晶中の光の伝搬を示す断面図である。図4に示すように、入射光2aをフォトニック結晶1の入射端面1aに入射角 θ_a で入射させると、フォトニック結晶1中を、伝搬光4aおよび伝搬光4bが伝搬する。なお、入射角は、入射端面1aの法線と入射光2aとのなす角度である。

図5を加えて、図4の伝搬光4aおよび4bについて説明する。図5は、図4に示したフォトニック結晶の入射光も含むバンド図である。図5において、右側がフォトニック結晶1中のバンド図であり、左側がフォトニック結晶1の外側（入射光2aが入射してくる個所）である均質媒体（空気）のバンド図である。なお、入射光2aの真空中の波長は λ_0 である。図5の左側に示しているフォトニック結晶1の外側である均

質媒体（空気）のバンド図は、半径 r が下記式で表される球であり、その半径 r は下記式で表される。

$$r = n \cdot (a / \lambda_0) \cdot (2 \pi / a)$$

また、矢印 201 は入射光 2a の波数ベクトルである。

- 5 図5より、入射光 2a がフォトニック結晶 1 内で結合する伝搬光 4a および 4b のエネルギー進行方向は、点 405 および 406 における等高線の法線方向である。それより、第1バンドの伝搬光 4a および第2バンドの伝搬光 4b のエネルギー進行方向はそれぞれ、矢印 403 および 404 で表されている。つまり、第1バンドの伝搬光 4a と第2バンドの伝搬光 4b は、それぞれ異なる方向に伝搬している。

ここで、入射角 θ が下記の (1) 式の条件を満たす場合には、入射光 2a はブリルアンゾーン境界上の第1および第2バンドと結合して伝搬する。

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5 \quad (1)$$

- 15 ブリルアンゾーン境界上ではバンドの対称性により、波動エネルギーの進行方向は Z 軸に一致する。図6はフォトニック結晶の入射端面に対して斜めに入射光を入射させた場合に、伝搬光が Z 軸方向に伝搬する場合を示す断面図である。また、図7は、図6に示したフォトニック結晶の入射光も含むバンド図である。

- 20 図6に示した入射光 2b は、図4に示した入射光 2a と入射角が異なる。図6において、入射光 2b の入射角 θ は、(1) 式を満たしている。図7により、入射光 2b の波数ベクトルである矢印 202 を作図して、第1バンドおよび第2バンドの伝搬光 4a および 4b のエネルギー進行方向をそれぞれ求める。それにより、第1バンドおよび第2バンドの伝搬光 4a および 4b のエネルギー進行方向である矢印 407 および 408 が求まる (図7参照)。矢印 407 および 408 よりわかるように、伝

搬光 4 a および 4 b は、Z 軸方向に進行する（図 6 参照）。ブリルアンゾーンの Y 方向の周期性を考慮すると、伝搬光 4 a および 4 b が Z 軸方向へ伝搬するためには、下記の（2）式を満たす入射角 θ で入射光 2 b が入射端面 1 a に入射してもよい。

$$5 \quad n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 1.0, 1.5, 2.0 \dots \quad (2)$$

しかし、値が増えるにつれて n および θ を大きい値とする必要があるため実現が難しくなる。したがって、上記（1）式の条件が最も実用的である。

ただし、実際の光学系では（1）式の条件からずれが生じる場合もある。このずれは $\pm 10\%$ 程度であれば、本実施の形態の目的は達成される。すなわち、下記の（3）式を満たす範囲であればよい。

$$10 \quad 0.45 < n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) < 0.55 \quad (3)$$

図 8 は、図 7 のバンド図をブリルアンゾーン境界上について Z 方向に限定して示したバンド図である。縦軸は規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$ ($= a / \lambda_0$)、横軸は波数ベクトル k_z の大きさをそれぞれ示している。なお、図 8 では第 3 バンドも図示している。

図 8 に示されるように、ブリルアンゾーン境界上では第 1 バンドを含むすべてのバンドが図 3 に示す高次バンド（第 2 および第 3 バンド）と同様の変化を示しており、ブリルアンゾーン境界上のバンドを利用することで第 1 バンド光も高次バンド光と同様の特性を持つようになることがわかる。また、各バンドによる伝搬光の波長が異なることも明らかである。

図 7 および図 8 に示すように、第 1 バンドと第 2 バンドの両方の伝搬光が存在する周波数域において、（1）式の条件を満たす入射角 θ で入射光 2 a をフォトニック結晶 1 の入射端面 1 a に入射させた場合（図 6 参照）、第 1 バンド光と第 2 バンド光とのそれぞれの波動が Z 軸に沿った方

向へ伝搬していく。ここで、フォトニック結晶 1 を構成する媒体（物質 5 a および物質 5 b）において、物質 5 a の屈折率が、物質 5 b の屈折率より高いとする。この場合、第 1 バンドの伝搬光 4 a は高い屈折率を有する物質 5 a の層を電場の腹、低い屈折率を有する物質 5 b の層を電場の節として Z 軸方向へ伝搬する。また、第 2 バンドの伝搬光 4 b は低い屈折率を有する物質 5 b の層を腹、高い屈折率を有する物質 5 a の層を節として Z 軸方向へ伝搬する。

これら第 1 バンドおよび第 2 バンドの伝搬光 4 a および 4 b の形状について説明する。図 9 A は、第 1 バンドの伝搬光の形状を模式的に示した断面図であり、図 9 B は、図 9 A を Y 方向より見たときの電場の振幅を示す図である。また、図 9 C は、第 2 バンドの伝搬光の形状を模式的に示した断面図であり、図 9 D は、図 9 C を Y 方向より見たときの電場の振幅を示す図である。図 9 A および図 9 C 中において、伝搬光の山 9 0 1（電場振幅がプラス側の極大となる位置）および谷 9 0 2（マイナス側の極大となる位置）がそれぞれ図示されている。

図 8 に示されているように、フォトニック結晶 1 内における第 1 バンドと第 2 バンドの波数ベクトル k_{z1} と k_{z2} の大きさは異なり、図 9 A および図 9 B で示された山 9 0 1 と谷 9 0 2 との間隔に比べて、図 9 C および図 9 D で示された山 9 0 1 と谷 9 0 2 との間隔は長い。すなわち、図 9 A および図 9 B で示した第 1 バンドの伝搬光 4 a の波長は、図 9 C および図 9 D で示した第 2 バンドの伝搬光 4 b の波長よりも短い。図 10 は、図 9 A および図 9 C に示した第 1 バンドおよび第 2 バンドの伝搬光が重ね合わされた伝搬形状を模式的に示した断面図である。つまり、図 10 は、フォトニック結晶 1 に、第 1 バンドおよび第 2 バンドの両方が存在する周波数域の光を、(1) 式の条件を満たす入射角 θ で入射させた場合の伝搬光の形状を示している。図 10 は、図 9 A および図 9 C を

重ねて電場のピークを線で繋いだものである。図 10 において、実線 9 1 1 でつないだ個所は伝搬光の山であり、破線 9 1 2 でつないだ個所は伝搬光の谷である。また、波面の向きが山（実線 9 1 1）と谷（破線 9 1 2）を交互に繰り返す、特徴的な電場パターンを示すことになる（後述の計算例 1 および図 2 5 参照）。

上述のバンド計算よりフォトニック結晶 1 内における第 1 バンドの伝搬光 4 a および第 2 バンドの伝搬光 4 b のそれぞれの波長は、 $\lambda_{z_1} = 2\pi / k_{z_1}$ および $\lambda_{z_2} = 2\pi / k_{z_2}$ と求めることができ、第 1 バンドの伝搬光 4 a と第 2 バンドの伝搬光 4 b の重なりによって生じる電場パターンの山と谷の周期 Λ は、以下の (4) 式により求めることができる。

$$\Lambda = (\lambda_{z_1} \cdot \lambda_{z_2}) / (\lambda_{z_2} - \lambda_{z_1}) \quad (4)$$

上述した、フォトニック結晶 1 中で伝搬光に「ブリルアンゾーン境界上における伝搬」を行わせる方法を以下に説明する。

第 1 の方法として、1 次元フォトニック結晶の端面に、斜めに入射光を入射する方法がある。具体的には、図 6 に示すように、入射光 2 b をフォトニック結晶 1 の入射端面 1 a に対して傾斜させ (1) 式 (または (2) 式)、近似的には (3) 式の条件を満たす入射角 θ で入射させる。

また、第 2 の方法として、1 次元フォトニック結晶の端面に、回折格子を用いて入射光を斜めに入射させる方法がある。図 1 1 は、フォトニック結晶においてブリルアンゾーン境界上における伝搬を実現する回折格子を用いる方法を示す断面図である。具体的には、図 1 1 に示すように、回折格子 7 をフォトニック結晶 1 の入射端面 1 a の直前に配置する。回折格子 7 に、フォトニック結晶 1 の入射端面 1 a に対して垂直な入射光 2 c を入射し、入射光 2 c の向きを回折格子 7 により変化させる。回折格子 7 から出射される入射光 2 b が、(1) 式 (または (2) 式)、近

似的には(3)式の条件を満たす入射角 θ で入射端面1aに入射するようになる。

また、第3の方法として、1次元フォトニック結晶の端面に、位相格子を用いて ± 1 次回折光を入射させる方法がある。図12は、フォトニック結晶においてブリルアンゾーン境界上における伝搬を実現する位相格子を用いる方法を示す断面図である。具体的には、図12に示すように、位相格子8をフォトニック結晶1の入射端面1aの前面に近接あるいは接触して配置する。この位相格子8は、異なる屈折率を有する物質8aと物質8bとが、交互に積層されて構成されている1次元フォトニック結晶であって、その周期方向は、フォトニック結晶1の周期方向と等しい。位相格子8は、入射光の波面を ± 1 次回折光に分割する。位相格子8に、フォトニック結晶1の入射端面1aに対して垂直な入射光2dを入射すると、交差する二つの平面波2e(± 1 次光)が生じる。これら ± 1 次光の干渉により節と腹のある電場パターンが形成される。そこで、腹および節の部分に高屈折率層である物質5aがくるようにフォトニック結晶1と位相格子8とを設置すると、第1バンドによる伝搬光のみが発生する(後述の計算例1の第1参考例および図26参照)。また、腹および節の部分に低屈折率層である物質5bがくるようにフォトニック結晶1と位相格子8とを設置すると、第2バンドによる伝搬光のみが発生する(後述の計算例1の第2参考例および図27参照)。

ここで、腹および節の部分に高屈折率層である5aと低屈折率層である5bの両方がかかるようにフォトニック結晶1と位相格子8との配置を調整して設置すると、第1バンドと第2バンドの両方による伝搬光が発生する。ここで、位相格子8の周期はフォトニック結晶1の周期の2倍の2aである。

ところで、ブリルアンゾーン境界上のバンドを利用してZ軸方向へ伝

搬した第1バンドの伝搬光と第2バンドの伝搬光がフォトニック結晶1の出射端面1bから出射される出射光の方向は、特異な電場パターンによる見かけの波面により決定する。

図13は、フォトニック結晶中にブリルアンゾーン境界上のバンドである第1バンドおよび第2バンドの伝搬光が伝搬している伝搬形状を示す断面図である。図13に示すように、各バンドの伝搬光の山901および谷902により、実線911で示した各バンド伝搬光により生じた伝搬光の山と、破線912で示した各バンド伝搬光により生じた伝搬光の谷とが存在している。図13には、伝搬光の山の位置921と、谷の位置922と、谷と山の間位置923と、山と谷の間位置924とが図示されている。出射端面の位置が、山の位置921または谷の位置922の場合と、谷と山の間位置923の場合と、山と谷の間位置924の場合とでは、出射光の状態がそれぞれ異なる。

各出射端面の位置による各出射光の状態について、図14A、図14Bおよび図14Cを用いて説明する。図14Aは図13に示すフォトニック結晶において出射端面の位置が、伝搬光の山または谷の位置である場合の出射光を示す断面図であり、図14Bは図13に示す出射端面の位置が、伝搬光の谷と山の間位置である場合の出射光を示す断面図であり、図14Cは図13に示す出射端面の位置が、伝搬光の山と谷の間位置である場合の出射光を示す断面図である。

図14A、図14Bおよび図14Cにおいて、フォトニック結晶1中で伝搬光に「ブリルアンゾーン境界上における伝搬」を行わせる方法は、上記第1の方法によるものであるが、第2または第3の方法を用いてもよい。

図14Aに示すように、フォトニック結晶1の出射端面1bの位置を、図13に示す伝搬光の山の位置921となるようにした場合について説

- 明ずる。高屈折率層（物質 5 a）および低屈折率層（物質 5 b）を伝搬してきた第 1 バンドの伝搬光および第 2 バンドの伝搬光が出射端面 1 b で回折し、それぞれ 0 次光 9 および 1 次回折光 1 0 の 2 つの異なる向きの出射光が出射端面 1 b より放射される。回折方向は 1 次元フォトニック結晶 1 の物質 5 a と物質 5 b の周期 a によって決定されるため、第 1 のバンドの伝搬光および第 2 のバンドの伝搬光はともに回折方向が等しくなる。そのため、2 つの方向に出射光が現れる（後述の計算例 3 および図 3 1 参照）。なお、出射端面 1 b を伝搬光の谷の位置 9 2 2 となる位置にした場合も同様に、2 つの方向に出射光が現れる。
- 10 また、図 1 4 B に示すように、フォトニック結晶 1 の出射端面 1 b の位置を、伝搬光の谷と山の間位置 9 2 3 にした場合について説明する。図 1 4 B では、第 1 バンドの伝搬光および第 2 バンドの伝搬光が出射端面 1 b で回折して出射される。第 1 バンドの伝搬光および第 2 バンドの伝搬光それぞれの 1 次回折光はお互いに半波長ずれるために打ち消しあい、0 次光 1 0 同士が強め合う状態になって出射される。（後述の計算例 15 4 および図 3 2 参照）。
- また、図 1 4 C に示すように、フォトニック結晶 1 の出射端面 1 b の位置を、伝搬光の山と谷の間位置 9 2 4 にした場合について説明する。第 1 バンドの伝搬光および第 2 バンドの伝搬光が出射端面 1 b で回折して出射される。図 1 4 C では、第 1 バンドの伝搬光および第 2 バンドの伝搬光それぞれの 0 次光は半波長ずれるため互いに打ち消しあい、1 次回折光 9 同士が強め合う状態になって出射される。（後述の計算例 5 および図 3 3 参照）。
- このように、出射端面 1 b の位置に応じて、出射光の放射方向は大きく異なることになる。すなわち、例えば、図 1 4 B に示した状態と図 1 4 C に示した状態とを切り換えることができれば、光路変換素子が実現

できる。図14Aに示した状態と図14Cに示した状態とを切り換える方法としては、次の2つが考えられる。

まず、フォトニック結晶1のフォトニックバンド構造を変化させる方法が考えられる。フォトニックバンド構造の変化は、「周期構造体である
5 フォトニック結晶を構成する媒質の屈折率を変化させる」または「周期構造体であるフォトニック結晶の周期を直接変化させる」ことによって引き起こすことができる。フォトニックバンド構造が変化すると、フォトニック結晶1内を伝搬する第1バンドの伝搬光および第2バンドの伝搬光のそれぞれの伝搬周期に変化が生じる。その結果、これら2つの波
10 動の重なりによって生じる特徴的な伝搬形状の山と谷の周期 Λ が変化し、出射端面1bにおける伝搬光の電場パターンが変化する。この変化を制御することにより、実質的に例えば図14Bと図14Cの状態とを選択的に切り換えることができる。したがってフォトニック結晶1の出射端面1bにおける出射光の放射方向を切り換えることができ、光路変換素
15 子に利用することができる。

次に、フォトニック結晶1中の伝搬光路長（入射端面1aから出射端面1bまでの距離）を変化させる外部制御手段が考えられる。フォトニックバンド構造を変化させず、入射光2bが伝搬するフォトニック結晶1内の伝搬光路長を変化させることができれば、図14Bの状態および
20 図14Cの状態を選択的に形成することができる。つまり、フォトニック結晶1中の光の伝搬方向（Z軸方向）の寸法を変化させることで、図14Bの状態および図14Cの状態を形成することができる。フォトニック結晶1は光路に沿った方向には周期性を有さないので、光路の方向に外力を加えてフォトニック結晶の寸法を変化させてもフォトニックバ
25 ンド構造自体は変化しない。なお、圧縮による屈折率変化は無視できる。

上記方法を用いた、本実施の形態の光路変換素子について、図を用い

てさらに具体的に説明する。

(実施の形態 1)

本発明の実施の形態 1 に係る光路変換素子について説明する。図 1 5 は、実施の形態 1 に係る光路変換素子の構成を示す平面図である。

- 5 図 1 5 に示しているように、実施の形態 1 の光路変換素子 1 5 0 において、基板 1 5 上にフォトニック結晶 1 1 が形成されている。フォトニック結晶 1 1 は、基板 1 5 の表面に平行な方向に周期構造を有する 1 次元フォトニック結晶である。フォトニック結晶 1 1 を構成する媒質のうち少なくとも 1 つは、電気光学効果を有する材料からなることとする。
- 10 電気光学効果を有する材料とは、電界を印加することで屈折率が変化する材料である。外部エネルギーである電界をフォトニック結晶 1 1 に印加するため、フォトニック結晶 1 1 の両面（周期方向に垂直な面）に電圧印加部である平行電極 1 2 が設置されている。基板 1 5 上には、平行電極 1 2 と電氣的に接している配線用パッド 1 3 が設置されている。
- 15 配線パッド 1 3 を介して、平行電極 1 2 間には直流電圧を印加することができる。平行電極 1 2 間に直流電圧を印加することにより、フォトニック結晶 1 1 の内の電気光学効果を有する材料の屈折率を変化させることができる。

- フォトニック結晶 1 1 の入射端面 1 1 a 側には、入射部である位相格子 20 子 8 が設置されている。位相格子 8 の入射端側には入射側レンズ 1 4 a および入射側光ファイバ 1 6 a が設置されている。フォトニック結晶 1 1 の出射端面 1 1 b 側には、第 1 出射側集光レンズ 1 4 b および第 1 出射側光ファイバ 1 6 b と、第 2 出射側集光レンズ 1 4 c および第 2 出射側光ファイバ 1 6 c とがそれぞれ出射光の方向に対応して設置されている。
- 25 なお、位相格子 8、入射側レンズ 1 4 a、入射側光ファイバ 1 6 a、第 1 出射側集光レンズ 1 4 b、第 1 出射側光ファイバ 1 6 b、第 2 出射

側集光レンズ14cおよび第2出射側光ファイバ16cは、基板15上に設置されている。

このようなフォトニック結晶11を作製するには、例えば特開2002-169022号公報に開示されているように、基板15を直接加工して、周期的多層構造体を作製すればよい。具体的には、例えば、厚さ1mmのSi基板（基板15）にフォトリソグラフィ技術により、ストライプ状パターンをパターンニングし、エッチング用マスクを形成する。次にこのマスクを介して反応性イオンエッチングを行う。この方法により、Si基板に、側壁がSi基板表面に対してほぼ垂直な深溝を形成することができる。この溝の深さと幅の比は例えば10程度とする。この溝の外周のSi基板をエッチングして、溝間の壁部分のみが凸部とすることで、Siと空気の周期的多層構造体を得ることができる。この空気層（溝）部分に電気光学効果をもつ流動性有機分子材料を注入し、加熱硬化することにより、フォトニック結晶11を得ることができる。

15 なお、入射側レンズ14a、第1出射側集光レンズ14b、第2出射側集光レンズ14cおよび位相格子8も予めそれぞれに対応するマスクをSi基板（基板15）上に形成し、周期的多層構造体の形成と同時にSi基板をエッチングし、凸部を形成することによって作製できる。また、基板15に入射側光ファイバ16a、第1出射側光ファイバ16b
20 および第2出射側光ファイバ16c用のガイド溝（図示せず）を形成しておけば、それらを所定位置に固定することができる。

本実施の形態1の光路変換素子150の動作について説明する。入射側光ファイバ16a中を伝搬してきた入射光2dは入射側レンズ14aを介して、位相格子8に入射する。位相格子8から出射された入射光2eがフォトニック結晶11に入射される。フォトニック結晶11には、
25 平行電極12および配線パッド13を介して、適当な電圧が印加され、

その電圧によりフォトニックバンド構造を変化させることができる。つまり、その電圧を制御することにより、出射端面 1 b から出射される出射光を、0 次光 9 または 1 次回折光 1 0 のどちらかに選択的に切り換えることができる。出射光が 0 次光 9 である場合は、第 1 出射側集光レンズ 1 4 b により 0 次光 9 は集光され、第 1 出射側光ファイバ 1 6 b に結合する。また、出射光が 1 次回折光 1 0 である場合は、第 2 出射側集光レンズ 1 4 c により 1 次回折光 1 0 は集光され、第 2 出射側光ファイバ 1 6 c に結合する。

フォトニック結晶 1 1 中を伝搬する伝搬光は、上述したように、ブリルアンゾーン境界上における伝搬を実現し、第 1 バンドおよび第 2 バンドが Z 軸方向に沿って進行するようにする。印加電圧を適当な値に制御することで、図 1 4 B に示すように出射端面 1 b が伝搬光の谷と山の中間位置、または図 1 4 C に示すように出射端面 1 b が伝搬光の山と谷の中間位置となるようにする。このようにすることで、実施の形態 1 の光路変換素子 1 5 0 は、選択的に光路を変換することができる。また、例えば、第 1 および第 2 出射側光ファイバ 1 6 b および 1 6 c の代わりに、受光素子を設置し、入射光を選択的に電気信号に変換することもできる。

また、フォトニック結晶 1 1 を構成する媒質のうち少なくとも 1 つを半導体材料とし、残りを導電性を有する材料としてもよい。配線パッド 1 3 から電流注入部である平行電極 1 2 に電流を流し、フォトニック結晶 1 1 に平行電極 1 2 から電流を流すことにより、キャリアをフォトニック結晶 1 1 に注入することができ、それによってフォトニック結晶 1 1 を構成する媒質の屈折率を変化させて、フォトニックバンド構造を変化させることができる。

またフォトニック結晶 1 1 を構成する媒質のうち少なくとも 1 つを音響光学材料としてもよい。なお、音響光学材料とは超音波等の音波によ

- り屈折率が変化する材料である。この場合には、フォトニック結晶 1 1 に外部エネルギーとして超音波を印加することによって屈折率を変化させることができる。つまり、図 1 5 において、平行電極 1 2 の代わりに、
- 5 フォトニック結晶 1 1 に超音波を印加するための圧電素子等の超音波印加部を設置し、配線パッド 1 3 よりこれに電圧を印加するようにしてやればよい。圧電素子としては、例えば、P Z T (P b (Z r _{0.52} T i _{0.48}) O ₃) のような圧電セラミックスを用いればよい。それにより、フォトニック結晶 1 1 のフォトニックバンド構造を変化させることができる。
- 10 また、フォトニック結晶 1 1 を構成する媒質のうち少なくとも 1 つの 1 部または全部を非線形光学物質としてもよい。その場合には、フォトニック結晶 1 1 に外部エネルギーとして制御光を照射することによって屈折率を変化させることができる。なお、制御光を照射する個所のみ非線形光学物質とすればよいので、フォトニック結晶 1 1 を構成する媒質
- 15 のうち少なくとも 1 つの 1 部または全部を非線形光学物質とすればよい。
- 図 1 6 は、実施の形態 1 に係る他の光路変換素子の構成を示す平面図である。図 1 6 の光路変換素子 1 5 1 は、図 1 5 に示した光路変換素子 1 5 0 から平行電極 1 2 および配線パッド 1 3 を取り除き、代わりに制御用光ファイバ 1 6 d および制御用レンズ 1 4 d を備えた構成である。
- 20 また、フォトニック結晶 1 1 を構成する媒質のうち少なくとも 1 つの 1 部または全部を非線形光学物質とする。フォトニック結晶 1 1 は、S i 基板 (基板 1 5) をエッチングして溝を形成し、溝の中に 3 次の非線形光学効果が大きい高分子材料を部分的に、あるいは溝全体に注入することで容易に作製することができる。制御用光ファイバ 1 6 d からの制御
- 25 光 2 f が、制御用レンズ 1 4 d を介して、フォトニック結晶 1 1 のうち非線形光学効果が大きい材料に照射されるように、制御用光ファイバ 1

6 d および制御用レンズ 1 4 d が基板 1 5 上に設置されている。このように構成された光路変換素子 1 5 1 において、制御光 2 f の強度を調整することで、フォトニック結晶 1 1 のフォトニックバンド構造を変化させ、選択的に、出射光の光路を変換することができる。なお、フォトニック結晶 1 1 に制御光 2 f を照射する方向は図示以外の方向からであってもよい。

また上述の方法以外にも、フォトニック結晶 1 1 を構成する媒質の屈折率を変化させる外部エネルギーとしては、例えば、磁場の印加、加熱等がある。フォトニック結晶 1 1 の構成材料に応じて、フォトニックバンド構造を変化させる外部エネルギーを選択し、その外部エネルギーによりフォトニック結晶 1 1 のフォトニックバンド構造を変化させることで、フォトニック結晶 1 1 の出射光の光路の変換を行えばよい。

1 次元フォトニック結晶を構成する媒質の屈折率変化が 0.01 ~ 1 % 程度であれば、フォトニック結晶 1 1 に必要な長さは、伝搬ベクトル k_z の変化が小さな領域であっても、数 10 μm 程度、伝搬ベクトル k_z の変化が大きな領域であれば数 μm 程度ですむ。したがって、実施の形態 1 の光路変換素子 1 5 0 または 1 5 1 は、小型化および集積化が可能である（後述の計算例 6、7 および図 3 3 参照）。

なお、実施の形態 1 では、フォトニック結晶 1 1 中でブリルアンゾーン境界上のバンドによる伝搬光を生じさせるために、位相格子 8 を用いたが、他に回折格子を用いたり、光を斜め入射させたりすることで、ブリルアンゾーン境界上のバンドによる伝搬光を生じさせてもよい。

（実施の形態 2）

本発明の実施の形態 2 に係る光路変換素子について説明する。実施の形態 2 に係る光路変換素子は、外力によりフォトニック結晶の周期構造の周期を直接変化させることで、フォトニック結晶のフォトニックバン

ド構造を変化させる。

図17は、フォトニック結晶の周期を直接変化させる方法を説明するための模式図である。図17において、1次元フォトニック結晶21は、物質25aと物質25bが一定周期で交互に積層されて構成されている。

- 5 フォトニック結晶21の、周期方向の寸法（各層（物質25aと物質25a）の厚さ）を変化させる場合には、直接的には積層方向に力学的な外力26を印加してやればよい。具体的には、フォトニック結晶21の周期方向に垂直な面同士から、フォトニック結晶21に向かって外力26を印加すればよい。外力26を印加することにより、フォトニック結
- 10 晶21の周期方向の厚さDが減少する。それにより、フォトニック結晶21中を伝搬する第1バンドおよび高次バンドの伝搬光の波数ベクトル k_z が変化する。そのため、上述した、第1バンドの伝搬光と第2バンドの伝搬光との重なりによって生じる伝搬光の電場パターンの山と谷の周期 Λ も変化する。出射端面における伝搬光の電場パターンも変化
- 15 する。したがって、フォトニック結晶21を伝搬して出射される光の方向を選択的に制御することができる。

以下に、具体的な構成を示し、実施の形態2に係る光路変換素子について説明する。図18Aは、実施の形態2に係る第1の光路変換素子の構成を示す平面図である。また、図18Bは、実施の形態2に係る第1

20 の光路変換素子の光路変換部の構成を示す斜視図である。また、図18Cは、実施の形態2に係る第1の光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。図18Cにおいては、基板35は省略している。

図18Aに示しているように、実施の形態2の光路変換素子153は、基板35上に光路変換部30、入射側レンズ34a、入射側光ファイバ

25 36a、第1出射側集光レンズ34b、第1出射側光ファイバ36b、第2出射側集光レンズ34cおよび第2出射側光ファイバ36cが設置

された構成である。

図18Bに示すように、光路変換部30は、周期構造を有する1次元
フォトニック結晶31と、フォトニック結晶31の各層と平行となるよ
うにフォトニック結晶31に貼り付けられた圧電素子33と、フォトニ
5 ック結晶31の入射端面31aと出射端面31bとが露出し、それ以外
の面を覆う支持筐体32とを備えている。支持筐体32は剛性をもち、
かつ熱膨張が小さいことが望ましく、例えばインバー合金等を用いるこ
とが好ましい。支持筐体32の内面は、フォトニック結晶31の周期方
向には伸縮しない。つまり、圧電素子33およびフォトニック結晶31
10 の周期方向の長さは、支持筐体32により固定されている。

光路変換部30は、フォトニック結晶31の積層膜の周期方向が基板
35の表面に平行になるように、基板35上に固定設置されている。フ
ォトニック結晶31の入射端面31a側には、入射部である入射側レン
ズ34aおよび入射側光ファイバ36aが設置されている。フォトニッ
15 結晶31の出射端面31b側には、第1出射側集光レンズ34bおよび
第1出射側光ファイバ36bと、第2出射側集光レンズ34cおよび第
2出射側光ファイバ36cとがそれぞれ出射光の方向に対応して設置さ
れている。

本実施の形態2の光路変換素子153の動作について説明する。入射
20 側光ファイバ36a中を伝搬してきた入射光2bは入射側レンズ34a
を介して、フォトニック結晶31に入射される。圧電素子33は、電圧
供給部（図示せず）から電圧を供給される。圧電素子33は電圧を供給
されると、その体積が増加し、フォトニック結晶31の周期方向の長さ
は増加する。する。フォトニック結晶31の、圧電素子33と接してい
25 る面の反対面は、支持筐体32に接していて固定されている。それによ
り、圧電素子33およびフォトニック結晶31の周期方向の長さが固定

されているため、圧電素子 3 3 の周期方向の長さが増加すれば、フォト
ニック結晶 3 1 のその周期方向の長さが減少する。つまり、圧電素子 3
3 は、電圧を印加されることでフォトニック結晶 3 1 に外力 3 7 を印加
5 することにより、フォトニック結晶 3 1 のフォトニックバンド構造を変
化させることができる。すなわち、圧電素子 3 3 に供給する電圧により、
フォトニック結晶 3 1 の出射端面 3 1 b から出射される出射光を、0 次
光 9 または 1 次回折光 1 0 のどちらかに選択的に切り換えることができ
る。出射光が 0 次光 9 である場合は、第 1 出射側集光レンズ 3 4 b によ
10 り 0 次光 9 は集光され、第 1 出射側光ファイバ 3 6 b に結合する。また、
出射光が 1 次回折光 1 0 である場合は、第 2 出射側集光レンズ 3 4 c に
より 1 次回折光 1 0 は集光され、第 2 出射側光ファイバ 3 6 c に結合す
る。

例えば、圧電素子 3 3 に電圧が供給されていない場合、0 次光 9 であ
15 る出射光が得られるように各部材を配置しておき、圧電素子 3 3 に電圧
が供給されると出射光の方向が変化して 1 次回折光 1 0 である出射光が
得られるような構造とすればよい。

具体的に説明すると、まず、フォトニック結晶 3 1 中を伝搬する伝搬
光は、上述したように、ブリルアンゾーン境界上における伝搬を実現し、
20 図 6 に示したように第 1 バンドおよび第 2 バンドが Z 軸方向に沿って進
行するようにしておく。また、その状態で、図 1 4 B に示すように出射
端面 1 b (3 1 b) が伝搬光の谷と山の間位置または図 1 4 C に示す
ように出射端面 1 b (3 1 b) で伝搬光の山と谷の間位置となるよう
にする。さらに、圧電素子 3 3 に供給する電圧を適当な値に制御するこ
25 とで、前述の状態とは異なる、図 1 4 C に示すように出射端面 1 b (3
1 b) で伝搬光の山と谷の間位置または図 1 4 B に示すように出射端

面 1 b (3 1 b) が伝搬光の谷と山の間位置となるようにする。このようにすることで、実施の形態 2 の光路変換素子 1 5 3 は、選択的に光路を変換することができる。また、例えば、第 1 および第 2 出射側光ファイバ 3 6 b および 3 6 c の代わりに、受光素子を設置し、入射光を選択的に電気信号に変換することもできる。

また、図 1 8 A で示した光路変換素子 1 5 3 は、フォトニック結晶 3 1 の入射端面 3 1 a に対して入射光 2 b が斜めに入射する構造としたが、例えば、入射側レンズ 3 4 a と入射端面 1 a との間に位相格子を設置することで垂直に入射させることもできる。図 1 9 は、実施の形態 2 に係る第 2 の光路変換素子の構成を示す平面図である。図 1 9 に示す光路変換素子 1 5 4 は、図 1 8 A に示す光路変換素子 1 5 3 において、入射側レンズ 3 4 a と入射端面 3 1 a との間に位相格子 3 8 が設置されている。入射光 2 d が入射端面 3 1 a に対して垂直に入射される。入射光 2 d は、位相格子 3 8 により、入射光 2 e に変換され、フォトニック結晶 3 1 において、ブリルアンゾーン境界上における伝搬が可能となる。すなわち、光路変換が可能である。同様に、回折格子を用いて、フォトニック結晶 3 1 中において、ブリルアンゾーン境界上のバンドによる伝搬光を生じさせてもよい。

以下に、上述以外の構成の本実施の形態 2 に係る光路変換素子について説明する。図 2 0 A は、実施の形態 2 に係る第 3 の光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。図 2 0 A に示されているように、光路変換素子 1 5 3 a は、フォトニック結晶 3 1 が、剛性のある 2 枚の平板状部材 3 9 で挟まれている。平板状部材 3 9 は、フォトニック結晶 3 1 の周期方向に垂直な面にそれぞれ接して設置される。平板状部材 3 9 のフォトニック結晶 3 1 と接している面と対向する面には、外部から厚みを制御できる伸縮部材 4 0 が接して設置されている。伸縮部

材 4 0 の外側には、支持筐体 3 2 が設置されている。支持筐体 3 2 の内
面は、フォトニック結晶 3 1 の周期方向には伸縮しない。伸縮部材 4 0
としては、例えば水圧、空気圧および油圧等によるピストン等を用いれ
ばよい。伸縮部材 4 0 の厚みを増加させることで、フォトニック結晶 3
5 1 には外力 3 7 a が印加され、周期方向の長さが減少する。つまり、伸
縮部材 4 0 の厚みを制御することで、フォトニック結晶 3 1 の周期方向
の長さを制御することができる。それにより、フォトニック結晶 3 1 の
フォトニックバンド構造を変化させて、フォトニック結晶 3 1 の出射光
の向きを制御することができる。なお、伸縮部材 4 0 として、前述の圧
10 電素子を用いてもよい。また、伸縮部材 4 0 を 2 つ用いたが、フォトニ
ック結晶 3 1 に外力を印加できれば 1 つであってもかまわない。

また、電磁石を用いて外力をフォトニック結晶 3 1 に印加するような
光路変換素子 1 5 3 b を構成してもよい。図 2 0 B は、実施の形態 2 に
係る第 4 の光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。
15 図 2 0 B に示すように、フォトニック結晶 3 1 が、剛性のある 2 枚の平
板状部材 3 9 で挟まれている。平板状部材 3 9 は、フォトニック結晶 3
1 の周期方向に垂直な面にそれぞれ接して設置される。それぞれの平板
状部材 3 9 のフォトニック結晶 3 1 と接している面と対向する面には、
電磁石 4 1 が接して設置されている。これらの電磁石 4 1 間に電流を流
20 し、互いに引力が発生するようにすることで、フォトニック結晶 3 1 に
外力 3 7 a を印加することができる。なお、電磁石 4 1 は片側だけに設
置し、反対側には鉄等の磁性体を設置してもよい。

以上により、フォトニック結晶 3 1 に外力を加えることで、フォトニ
ック結晶 3 1 の周期を変化させて、フォトニック結晶 3 1 からの出射光
25 の光路を変換させる、実施の形態 2 に係る光路変換素子 1 5 3、1 5 3
a および 1 5 3 b を実現できる。この光路変換素子 1 5 3、1 5 3 a お

よび153bは、小型化および集積化が可能である。

(実施の形態3)

本発明の実施の形態3に係る光路変換素子について図面を用いて説明する。実施の形態3の光路変換素子は、フォトニック結晶の周期を熱により変化させることで、フォトニックバンド構造を変化させ、出射光の光路変換を行う。図21Aは、実施の形態3に係る光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。図21Aに示すように、実施の形態3に係る光路変換素子160は、高熱膨張率を有する材料である基板45の下に、冷却装置または加熱装置等である温度可変装置43が設置され、基板45上には1次元フォトニック結晶31が設置された構成である。フォトニック結晶31の周期は、基板45の表面に対して垂直方向である。フォトニック結晶31の入射端面31a側には、入射側レンズ34aおよび入射側光ファイバ36aが設置され、出射端面31b側には、第1出射側集光レンズ34bおよび第1出射側光ファイバ36bと、第2出射側集光レンズ34cおよび第2出射側光ファイバ36cとが設置されている。入射側光ファイバ36aを伝搬してきた入射光2bは、入射側レンズ34aを介して入射端面31aに入射する。

温度可変装置43により、基板45の温度を変化させることで、基板45は、熱膨張によって寸法の伸縮変化を起こす。フォトニック結晶31は基板45上に形成されているので、その影響を受けフォトニック結晶31が変形し周期方向に伸縮する。そのため、フォトニックバンド構造が変化する。なお、温度可変装置43としてはヒータあるいはペルチエ素子等を用いることができる。なお、基板45の設置位置は、図示した位置に限られるわけではなく、フォトニック結晶31が基板45の伸縮により、周期方向に伸縮するような位置であれば、これ以外の位置であってもよい。

- 本実施の形態 3 の光路変換素子 160 の動作について説明する。入射側光ファイバ 36 a 中を伝搬してきた入射光 2 b は入射側レンズ 34 a を介して、フォトニック結晶 31 に入射される。フォトニック結晶 31 中では、ブリルアンとゾーン境界上のバンドによる伝搬光が伝搬している。
- 5 温度可変装置 43 により基板 45 を伸縮させることで、フォトニック結晶 31 の周期方向の長さが制御され、フォトニックバンド構造が変化させられる。それにより、図 14 B または図 14 C の状態が選択的に形成される。つまり、フォトニック結晶 31 の出射端面 31 b から出射される出射光を、0 次光 9 または 1 次回折光 10 のどちらかに選択的に
- 10 切り換えることができる。出射光が 0 次光 9 である場合は、第 1 出射側集光レンズ 34 b により 0 次光 9 は集光され、第 1 出射側光ファイバ 36 b に結合する。また、出射光が 1 次回折光 10 である場合は、第 2 出射側集光レンズ 34 c により 1 次回折光 10 は集光され、第 2 出射側光ファイバ 36 c に結合する。
- 15 また、フォトニック結晶 31 を構成している媒質のうち少なくとも 1 つの媒質を高熱膨張率を有する材料としてもよい。図 21 B は、実施の形態 3 に係る他の光路変換素子の構成を模式的に説明するための側面図である。フォトニック結晶 31 を構成している媒質のうち少なくとも 1 つの媒質を高熱膨張率を有する材料とする。図 21 B に示すように、
- 20 フォトニック結晶 31 は基板 45 上に設置され、フォトニック結晶 31 に近接または接するように温度可変装置 43 が設置されている。温度可変装置 43 によって、フォトニック結晶 31 を加熱または冷却することで、フォトニック結晶 31 は周期方向に伸縮する。それにより、フォトニックバンド構造が変化する。
- 25 図 21 A および図 21 B で示した実施の形態 3 の光路変換素子 160 および 160 a は、機械的な外力をフォトニック結晶 31 に加えること

なく、熱により、フォトニック結晶 3 1 の周期方向における寸法を直接的に変化させることができる。それにより、実施の形態 2 の光路変換素子と同様に、フォトニック結晶 3 1 にブリルアンゾーン境界上のバンドによる伝搬光を伝搬させておき、フォトニックバンドを変化させることで、図 1 4 B および図 1 4 C の状態を選択的に形成できる。それにより、出射光の光路を変化させることができ、小型化および集積化が可能な光路変換素子を実現できる。

(実施の形態 4)

本発明の実施の形態 4 に係る光路変換素子について図を用いて説明する。図 2 2 は、フォトニック結晶の伝搬光路長を変化させる方法を説明するための模式図である。図 2 2 において、1次元フォトニック結晶 5 1 は、物質 5 0 a と物質 5 0 b が一定周期で交互に積層されて構成されている。フォトニック結晶 5 1 の、伝搬光路長 L の長さを変化させる場合には、伝搬光の伝搬方向に外力 4 6 を印加すればよい。それにより、フォトニック結晶 5 1 を、図 1 4 B の状態および図 1 4 C の状態を選択的に変形することができる。それにより、出射光の光路を選択的に変換することができる。

図 2 3 A は、実施の形態 4 に係る光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。図 2 3 A に示しているように、実施の形態 4 の光路変換素子 1 7 0 は、光路変換部 5 0、入射側レンズ 3 4 a、入射側光ファイバ 3 6 a、第 1 出射側集光レンズ 3 4 b、第 1 出射側光ファイバ 3 6 b、第 2 出射側集光レンズ 3 4 c および第 2 出射側光ファイバ 3 6 c を備えている。

光路変換部 5 0 は、周期構造を有する 1次元フォトニック結晶 5 1 と、フォトニック結晶 5 1 の出射端面 5 1 b の一部に貼り付けられた圧電素子 5 3 と、支持筐体 5 2 とを備えている。支持筐体 5 2 は、圧電素子 3

3のフォトニック結晶51と接する面と対向する面に接続され、かつ、入射端面51aの一部とも接続されている。支持筐体52の内部は、フォトニック結晶51を構成する各層と平行な方向である、フォトニック結晶51中の伝搬光の伝搬方向（伝搬光路長方向）には伸縮しない。つまり、フォトニック結晶51と圧電素子53との伝搬光路長方向の長さは固定されている。ここで、圧電素子53に電圧を供給すると圧電素子53の体積が増加する。それにより、フォトニック結晶51にその伝搬光路長方向に外力46が印加される。それにより、フォトニック結晶51の伝搬光路長Lが短くなる。このように、実施の形態4に係る光路変換素子170は、フォトニック結晶51の伝搬光路長を変化させることができる。つまり、図14Bまたは図14の状態を選択的に形成することができる。

なお、圧電素子53が出射端面51bの一部に設置されることとしたが、これは出射光が出射される個所を確保するためである。

15 本実施の形態4の光路変換素子170の動作について説明する。入射側光ファイバ36a中を伝搬してきた入射光2bは入射側レンズ34aを介して、フォトニック結晶31に入射される。フォトニック結晶31中では、ブリルアンとゾーン境界上のバンドによる伝搬光が伝搬している。圧電素子53に供給する電圧を制御することで、フォトニック結晶51の伝搬光路長が制御される。それにより、図14Bまたは図14Cの状態を選択的に形成される。つまり、フォトニック結晶51の出射端面51bから出射される出射光を、0次光9または1次回折光10のどちらかに選択的に切り換えることができる。出射光が0次光9である場合は、第1出射側集光レンズ34bにより0次光9は集光され、第1出射側光ファイバ36bに結合する。また、出射光が1次回折光10である場合は、第2出射側集光レンズ34cにより1次回折光10は集光さ

れ、第2出射側光ファイバ36cに結合する。

図23Bは、実施の形態4に係る他の光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。図23Bに示されているように、光路変換素子170aにおいて、フォトニック結晶51の出射端面51bの一部に、剛性のある平板状部材59が設置され、さらに平板状部材59に接して、外部からその厚みを制御できる伸縮部材60が設置されている。伸縮部材60の外側には、支持筐体52が設置されている。支持筐体52の内面は、フォトニック結晶51の伝搬光路長方向には伸縮しない。伸縮部材60としては、例えば水圧、空気圧および油圧等によるピストン等を用いればよい。伸縮部材60の厚みを制御することにより、フォトニック結晶51の伝搬光路長方向に外力46aを印加することができる。したがって、フォトニック結晶51の伝搬光路長Lを伸縮させることができる。それにより、フォトニック結晶51の出射端面51bから出射される出射光の向きを制御することができる。なお、伸縮部材60として、前述した圧電素子を用いてもよい。なお、平板状部材59が出射端面51bの一部に設置されることとしたが、これは出射光が出射される個所を確保するためである。

また、電磁石を用いて外力をフォトニック結晶51に印加するような光路変換素子170bを構成してもよい。図23Cは、実施の形態4に係るさらに他の光路変換素子の構成を模式的に説明するための断面図である。図23Cに示すように、フォトニック結晶51が、剛性のある2枚の平板状部材59で挟まれている。平板状部材59は、フォトニック結晶51の入射端面51aおよび出射端面51bにそれぞれ接して設置される。それぞれの平板状部材59のフォトニック結晶51と接している面と対向する面には、電磁石61が接して設置されている。これらの電磁石61に電流を流し、互いに引力が発生するようにすることで、フ

フォトニック結晶 5 1 に外力 4 6 b を印加することができる。なお、電磁石 6 1 は入射端面 5 1 a および出射端面 5 1 b のどちらか片側だけに設置し、反対側には鉄等の磁性体を設置してもよい。

5 以上により、フォトニック結晶 5 1 に外力を加えることで、フォトニック結晶 5 1 の伝搬光路長を変化させて、フォトニック結晶 5 1 からの出射光の光路を変換させる、実施の形態 4 に係る光路変換素子 1 7 0、1 7 0 a および 1 7 0 b を実現できる。この光路変換素子 1 7 0、1 7 0 a および 1 7 0 b は、小型化および集積化が可能である。

10 図 2 1 A に示している、実施の形態 3 に係る光路変換素子 1 6 0 のような構成であっても、フォトニック結晶 3 1 の伝搬光路長方向に外力が印加され、その長さを制御するような構成とすることができる。このような光路変換素子は、実施の形態 4 の光路変換素子と同様に、伝搬光路長を制御して、出射光の光路変換を行う光路変換素子として用いることもできる。

15 なお、実施の形態 2 ~ 実施の形態 4 の光路変換素子においては、フォトニック結晶の入射端面に斜めに光を入射しているが、回折格子または位相格子を用いることで、入射端面に対して垂直に入射することもできる。

20 以下に、上述した光路変換素子について、電磁波シミュレーション(有限要素法による)を行った結果を示す。なお、以下の計算例では、長さはすべてフォトニック結晶の周期 a を基準として規格化している。計算はいずれも有限な領域で行った。

(計算例 1)

25 1次元フォトニック結晶の端面に(1)式を満足する入射角 θ で平面波を入射させた場合の計算例 1 について説明する。計算例 1 においては図 6 を参照して説明する。フォトニック結晶 1 の構造条件と、入射光 2

bの条件は以下のとおりである。

(1) フォトニック結晶1の構造条件

フォトニック結晶1は、物質5aと物質5bとを周期的に交互に重ね、12周期積層したものである。

5 (物質5a) 厚さ $t_A = 0.5a$ 屈折率 $n_A = 1.4578$

(物質5b) 厚さ $t_B = 0.5a$ 屈折率 $n_B = 1.00$

フォトニック結晶1の周囲は、屈折率 $n = 1.0$ の空気層とした。

このフォトニック結晶1のTE偏光に対するバンド図を図24に示す。

なお、図24において矢印510は入射光2bの波数ベクトルを示し、

10 矢印511は第1バンドにおける伝搬光4aのエネルギー進行方向を示し、矢印512は第2バンドにおける伝搬光4bのエネルギー進行方向を示している。

(2) 入射光2bの条件

(真空中の波長) $\lambda_0 = 0.9091a$ ($a/\lambda_0 = 1.10$)

15 (偏光) TE偏光 (電場の向きがX軸方向)

(入射角) $\theta = 27.04^\circ$

以上の入射光2bの条件は(1)式の条件を満足している。

図25は、計算例1におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。図24のバンド図からも判断できるように、計算例1の
20 条件では第1バンドと第2バンドによるブリルアンゾーン境界上における伝搬が生じている。そのため、これら2つの波動が重なり、電場形状が山と谷を繰り返す特徴的な伝搬形状が出現している。

また、計算例1の第1参考例として、入射光2bが、入射角 $\theta = \pm 27.04^\circ$ の2方向からフォトニック結晶1に入射した場合も計算した。
25 他の条件は、上記と同様とし、2つの光を入射して交叉させ、干渉波の腹の位置が高屈折率層(物質5a)の位置と一致させた。計算は有限な

領域で行ない、入射端面における入射光 2 b の入射部分の幅は約 1.3 周期とした。

図 2.6 は、計算例 1 の第 1 参考例におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。フォトニック結晶 1 において、高屈折率層 (物質 5 a) に電場が局在した第 1 バンドによる伝搬光のみが発生していることが図 2.6 よりわかる。

また、計算例 1 の第 2 参考例として、入射光 2 b が、入射角 $\theta = \pm 27.04^\circ$ の 2 方向からフォトニック結晶 1 に入射した場合であって、2 つの光を入射して交叉させ、干渉波の腹の位置が低屈折率層 (物質 5 b) の位置と一致させた場合を計算した。他の条件は、第 1 の参考例と同じ条件とした。図 2.7 は、計算例 1 の第 2 参考例におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。フォトニック結晶 1 において、低屈折率層 (物質 5 b) に電場が局在した第 2 バンドによる伝搬光のみが発生していることが図 2.7 よりわかる。

15 (計算例 2)

1 次元フォトニック結晶の端面に、位相格子を介して平面波を入射させた場合の計算例 2 について説明する。計算例 2 においては図 1.2 を参照して説明する。フォトニック結晶 1 の入射端面 1 a 側に位相格子 8 設置して、平面波である入射光 2 d を位相格子 8 に対して垂直入射させた場合の計算例である。

(1) フォトニック結晶 1 の構造条件

フォトニック結晶 1 は、物質 5 a と物質 5 b とを周期的に交互に重ねたものである。

(物質 5 a) 厚さ $t_A = 0.30a$ 屈折率 $n_A = 2.1011$

25 (物質 5 b) 厚さ $t_B = 0.70a$ 屈折率 $n_B = 1.4578$

このフォトニック結晶 1 の TE 偏光に対するバンド図を図 2.8 に示す。

なお、図 28 において矢印 610 は入射光の波数ベクトルを示し、矢印 611 は第 1 バンドにおける伝搬光のエネルギー進行方向を示し、矢印 612 は第 2 バンドにおける伝搬光のエネルギー進行方向を示している。

(2) 入射光 (平面波 2d) の条件

- 5 (真空中の波長) $\lambda_0 = 1.321a$ ($a/\lambda_0 = 0.7571$)
(偏光) TE 偏光 (電場の向きが X 軸方向)

(3) 位相格子 8 の構造

位相格子 8 は、物質 8a および物質 8b を交互に周期的に積層した構造である。位相格子 8 の形状は、 ± 1 次回折光が強くなるように最適化
10 した。

(物質 8a) Y 軸方向厚さ $t_c = 0.7358a$ 屈折率 $n_c = 1.45$

(物質 8b) Y 軸方向厚さ $t_D = 1.2642a$ 屈折率 $n_D = 1.00$

- 15 位相格子 8 の周期 ($t_c + t_D$) $2a$

位相格子 8 の Z 軸方向厚さ $t_z = 1.5094a$

位相格子 8 と空気層の間隔 t_E (層 8c (図 29 参照) の幅) $0.9434a$

位相格子 8 と空気層との間の屈折率 1.4578

- 20 以上、位相格子 8 の形状は、 ± 1 次回折光が強くなるように最適化した。

(4) 位相格子 8 の配置

- 位相格子 8 は、フォトニック結晶 1 の入射端面 1a に接するように設置した。また、位相格子 8 の各層 (物質 8a および物質 8b) の中心が
25 フォトニック結晶 1 の高屈折率層 (物質 5a) の中心から $0.2a$ だけ Y 方向にずれた位置に配置されている。入射光 2d は、屈折率 1.00

(空気)の自由空間から層 8 c を介して、位相格子 8 に入射する。

図 29 は、計算例 2 におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。計算例 2 において、位相格子 8 の設置により入射光 2 d が位相変調された光波の腹の部分に、高屈折率層 (物質 5 a) および低屈折率層 (物質 5 b) の両方がくるような配置である。これにより、第 1 バンドによる伝搬光と第 2 バンドによる伝搬光が発生し、これら 2 つの波動が重なり、電場形状が山と谷を繰り返す特徴的な伝搬形状が出現していることが図 29 よりわかる。

(計算例 3)

10 導波層部分である 1 次元フォトニック結晶の上下両面に、閉じ込め層部分である 1 次元フォトニック結晶が設置された 1 次元フォトニック結晶に (1) 式を満足する入射角 θ で平面波を入射させた場合の計算例 3 について説明する。なお、計算方法は、時間領域有限差分法を用いた。

まず、計算例 3 で用いるフォトニック結晶の構造について説明する。

15 図 30 は、計算例 3 で用いるフォトニック結晶の構成を示す断面図である。図 30 に示すように、計算例 3 のフォトニック結晶 100 は、導波層部分であるフォトニック結晶 1 の周期方向に垂直な 2 つの面に閉じ込め層部分であるフォトニック結晶 101 がそれぞれ設置された構成である。これらの周期方向は同一方向である。このように、導波層部分であるフォトニック結晶 1 を挟むように、閉じ込め層部分であるフォトニック結晶 101 を設けたので、フォトニック結晶 1 の周期方向に垂直な方向から、光が漏れることはない。また、フォトニック結晶 1 およびフォトニック結晶 101 は周期方向が同じであるため、容易に作製することができる。各フォトニック結晶 101 の構造条件と、入射光 2 g の条件
25 は以下のとおりである。

(1) 導波層部分であるフォトニック結晶 1 の構造条件

フォトニック結晶 1 は、物質 5 a と物質 5 b とを周期的に交互に重ね、15 周期積層したものである (図 30 参照)。

(物質 5 a) 厚さ $t_A = 0.3a$ 屈折率 $n_A = 2.1011$

(物質 5 b) 厚さ $t_B = 0.7a$ 屈折率 $n_B = 1.4578$

5 (2) 閉じ込め層部分であるフォトニック結晶 101 の構造条件

各フォトニック結晶 101 は、物質 101 a と物質 101 b とを周期的に交互に重ね、10 周期積層したものである。なお、物質 101 a および物質 101 b の厚さは t_G および厚さ t_H であり、屈折率は n_G および屈折率 n_H である。

10 (物質 101 a) 厚さ $t_G = 0.15a$ 屈折率 $n_G = 2.1011$

(物質 101 b) 厚さ $t_H = 0.35a$ 屈折率 $n_H = 1.4578$

このフォトニック結晶 1 のバンド図は図 28 に示すものと同一である。
15 なお、上側 (Y 軸の + 方向) のフォトニック結晶 101 の外側の媒質は屈折率 1.00 であり、下側 (Y 軸の - 方向) のフォトニック結晶 101 の外側の媒質は屈折率 1.4578 とする。

(3) 入射光 2g の条件

(真空中の波長) $\lambda_0 = 1.4a$ ($a/\lambda_0 = 0.7142$)

20 (偏光) TE 偏光 (電場の向きが X 軸方向)

(入射角) $\theta = 44.43^\circ$

以上の入射光 2g の条件は (1) 式の条件を満足している。

このようなフォトニック結晶 1 中の電場形状は、山と谷を繰り返す特徴的な伝搬形状である。ここで、出射端面 1b がこの電場の谷部分の位置となるように、フォトニック結晶の Z 方向の長さ (伝搬光路長) を 1.1733a としてシミュレーションを行った。図 31 は、計算例 3 にお
25

けるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。出射光は0次光9方向と1次回折光10方向の2方向へ出現している。

(計算例4)

5 計算例3のフォトニック結晶において、伝搬光の電場形状の谷と山部分の中間に出射端面が設置されるような、伝搬光路長を有するフォトニック結晶とした場合の計算例4について説明する。

10 計算例4のフォトニック結晶100および入射光2gの構成は、計算例3のフォトニック結晶と同一であるが、伝搬光路長が異なる。つまり、出射端面1bが、伝搬光の電場形状の谷と山部分の中間位置となるような伝搬光路長とする。具体的には、フォトニック結晶100の伝搬光路長は、9.0666aとしてシミュレーションを行った。図32は、計算例4におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。出射光は1次回折方向の伝搬がなく、0次光9方向のみが出現していることが図32よりわかる。

15 (計算例5)

計算例3のフォトニック結晶において、伝搬光の電場形状の山と谷部分の中間位置に出射端面が設置されるような、伝搬光路長を有するフォトニック結晶とした場合の計算例5について説明する。

20 計算例5のフォトニック結晶100および入射光2gの構成は、計算例3のフォトニック結晶と同一であるが、伝搬光路長が異なる。つまり、出射端面1bが、伝搬光の電場形状の山と谷部分の中間位置となるような伝搬光路長とする。具体的には、フォトニック結晶100の伝搬光路長は、1.0666aとしてシミュレーションを行った。図33は、計算例5におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。
25 出射光は0次光方向の伝搬がなく、1次回折光10方向のみ出現していることが図33よりわかる。

(計算例6)

図6を参照して、フォトニック結晶1の入射端面1aに平面波を入射させた場合について計算した。

(1) フォトニック結晶1の構造条件

- 5 フォトニック結晶1は、物質5aと物質5bとを周期的に交互に重ね15周期積層したものである。

(物質5a) 厚さ $t_A = 0.30a$ 屈折率 $n_A = 2.1011$

(物質5b) 厚さ $t_B = 0.70a$ 屈折率 $n_B = 1.4578$

- 10 このフォトニック結晶1のバンド図は図28と同一である。なお、フォトニック結晶1の上側(Y軸の+方向)の媒質は屈折率1.00であり、下側(Y軸の-方向)の媒質は屈折率1.4578とする。

(2) 入射光2bの条件

(真空中の波長) $\lambda_0 = 1.4286a$ ($a/\lambda_0 = 0.7$)

(偏光) TE偏光(電場の向きがX軸方向)

- 15 (入射角) $\theta = 45.58^\circ$

以上の入射光2bの条件は(1)式の条件を満足している。

- 20 このフォトニック結晶1中においては、電場形状が山と谷を繰り返す特徴的な伝搬形状が出現している。また、このときの、周期 $\Lambda (= (\lambda_{z_1} \cdot \lambda_{z_2}) / (\lambda_{z_2} - \lambda_{z_1}))$ の値から、出射光が1次回折光9方向へ出射されるフォトニック結晶1の伝搬光路長を求めた。この伝搬光路長が約 $50\mu\text{m}$ であるので、フォトニック結晶1の伝搬光路長を $50\mu\text{m}$ として計算を行った。図34Aは、計算例6におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。図34Aより、出射光が1次回折光10方向へ伝搬しているのが確認できる。

- 25 (計算例7)

計算例6のフォトニック結晶1の高屈折率層(物質5a)の屈折率が

1 %増加した場合の計算例7を説明する。

(1) フォトニック結晶1の構造

フォトニック結晶1は、物質5aと物質5bとを周期的に交互に重ね15周期積層したものである。

5 (物質5a) 厚さ $t_A = 0.30a$ 屈折率 $n_A = 2.12211$
1

(物質5b) 厚さ $t_B = 0.70a$ 屈折率 $n_B = 1.4578$

なお、フォトニック結晶1の上側(Y軸の+方向)の媒質は屈折率1.00であり、下側(Y軸の-方向)の媒質は屈折率1.4578とする。

10 (2) 入射光2bの条件

(真空中の波長) $\lambda_0 = 1.4286a$ ($a/\lambda_0 = 0.7$)

(偏光) TE偏光(電場の向きがX軸方向)

(入射角) $\theta = 45.58^\circ$

以上の入射光の条件は(1)式の条件を満足している。

15 以上の条件は、屈折率 n_A の値が計算例6の条件と異なるだけで、あとは計算例6の条件と同一である。

図34Bは、計算例7におけるシミュレーション結果である電場の強度分布図である。図34Bより、出射光が0次光9方向へ伝搬しているのが確認できる。

20 計算例6および計算例7のように、規格化周波数 $a/\lambda_0 = 0.7$ とすると、屈折率変化による伝搬ベクトル k_z の変化が小さいため、フォトニック結晶1の長さを $50\mu\text{m}$ 程度とすると、フォトニック結晶1を構成している少なくとも1つの媒質の屈折率変化が大きいことが必要になる。具体的には、1%の屈折率変化が必要である(計算例6および計算例7参照)。
25 25 計算例7参照)。しかし、 a/λ_0 の値がこれより小さい値であれば、屈折率変化による伝搬ベクトル k_z の変化が大きくなるため、小さな屈折率

変化であっても必要なフォトニック結晶1の長さは数 μm 程度で済むことになる。

5 以上説明したように、本実施の形態の光路変換素子によれば、ブリルアンゾーン境界上の第1バンドおよび高次バンド（第2バンド）を利用してフォトニック結晶内を伝搬させた光を、フォトニック結晶のフォトニックバンド構造あるいは伝搬光路長を変化させることで、出射光の方向を変換する。つまり、フォトニック結晶内における、第1あるいは第2バンド光の波動の重なりによって生じる特徴的な伝搬形状の周期を変化させることで、出射光の方向を変換する。あるいは、伝搬方向における
10 りるフォトニック結晶の長さ（伝搬光路長）を変化させ、出射端面における伝搬光の伝搬形状を変化させることで出射光の方向を変換する。したがって、スイッチング機能を有する光路変換素子を実現できる。

この、本実施の形態に係る光路変換素子は、小型化および集積化することができる。また、伝搬光の損失が低い。

15

産業上の利用可能性

本発明の光路変換素子は、光通信、光交換システムあるいは光インタコネクションなどの分野に用いる光集積回路等の部品として用いることができる。

20

請 求 の 範 囲

1. 1方向に屈折率周期性を有し、前記屈折率周期方向と略平行である端面の1つを入射端面とし、前記入射端面に対向する端面を出射端面とするフォトニック結晶と、

前記フォトニック結晶中にブリルアンゾーン境界上のバンドによる伝搬光を生じさせるように入射光を前記入射端面から入射する入射部と、

- 前記フォトニック結晶のフォトニックバンド構造を変化させる手段および/または前記入射端面から前記出射端面までの距離である伝搬光路長を変化させる手段とを備えた光路変換素子。

2. 前記入射光の真空中における波長を λ_0 とし、前記入射端面と接触している媒質の屈折率を n とし、前記フォトニック結晶の周期を a とした場合に、前記入射部は、前記入射光を前記入射端面に対して、以下の式を満たす入射角 θ で入射する請求項1に記載の光路変換素子。

$$0.45 < n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) < 0.55$$

3. 前記入射部は、前記入射端面に近接もしくは接触して配置された回折格子または位相格子を備えている請求項2に記載の光路変換素子。

20

4. 前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶にエネルギーを供給することで、前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つの屈折率を変化させ、前記フォトニック結晶の前記フォトニックバンド構造を変化させる請求項1に記載の光路変換素子。

25

5. 前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つは電気光学効果を有する材料であり、

前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に電界を印加する電界印加部である請求項4に記載の光路変換素子。

5

6. 前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つは半導体材料であり、

前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に電流を注入する電流注入部である請求項4に記載の光路変換素子。

10

7. 前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つは音響光学材料であり、

前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に超音波を印加する超音波印加部である請求項4に記載の光路変換

15 素子。

8. 前記フォトニック結晶を構成する材料のうち少なくとも1つの1部または全部は非線形光学材料であり、

20 前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に光を照射する光源である請求項4に記載の光路変換素子。

9. 前記フォトニックバンド構造を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に外力を印加することで前記フォトニック結晶の周期を変化させて、前記フォトニックバンド構造を変化させる周期変化手段である請求
25 項1に記載の光路変換素子。

10. 前記周期変化手段は、前記フォトニック結晶の前記屈折率周期方向に垂直な端面の少なくともどちらか一方に接続された外力印加部と、
前記外力印加部および前記フォトニック結晶における、前記フォトニック結晶の前記屈折率周期方向の長さを固定する支持筐体とを備え、

5 前記外力印加部の体積が変化することで、前記フォトニック結晶に外力を印加する請求項9に記載の光路変換素子。

11. 前記外力印加部は圧電素子である請求項10に記載の光路変換素子。

10

12. 前記周期変化手段は、前記フォトニック結晶を挟んで前記フォトニック結晶の前記屈折率周期方向に対向配置された一对の電磁石を備え、
前記電磁石同士の引力を用いて前記フォトニック結晶に外力を印加する請求項9に記載の光路変換素子。

15

13. 前記周期変化手段は、前記フォトニック結晶を挟んで前記フォトニック結晶の前記屈折率周期方向に対向配置された電磁石および磁性体を備え、

20 前記電磁石と前記磁性体との引力を用いて前記フォトニック結晶に外力を印加する請求項9に記載の光路変換素子。

14. 前記周期変化手段は、前記フォトニック結晶に接続された基板と、前記基板を加熱あるいは冷却できる温度可変装置とを備え、

25 前記温度可変装置によって加熱あるいは冷却された前記基板の膨張あるいは収縮を用いて、前記フォトニック結晶に外力を印加する請求項9に記載の光路変換素子。

1 5. 前記伝搬光路長を変化させる手段は、前記入射端面および前記出射端面の少なくともどちらか一方に接続された外力印加部と、

前記外力印加部および前記フォトニック結晶における、前記フォトニック結晶の前記伝搬光路長方向の長さを固定する支持筐体とを備え、

前記外力印加部の体積が変化することで、前記フォトニック結晶に外力を印加する請求項 1 に記載の光路変換素子。

1 6. 前記外力印加部は圧電素子である請求項 1 5 に記載の光路変換素子。

1 7. 前記伝搬光路長を変化させる手段は、前記フォトニック結晶を挟んで前記フォトニック結晶の前記伝搬光路長方向に対向配置された一対の電磁石を備え、

前記電磁石同士の引力を用いて前記フォトニック結晶に外力を印加する請求項 1 に記載の光路変換素子。

1 8. 前記伝搬光路長を変化させる手段は、前記フォトニック結晶を挟んで前記フォトニック結晶の前記伝搬光路長方向に対向配置された電磁石および磁性体を備え、

前記電磁石と前記磁性体との引力を用いて前記フォトニック結晶に外力を印加する請求項 1 に記載の光路変換素子。

1 9. 前記伝搬光路長を変化させる手段は、前記フォトニック結晶に接続された基板と、前記基板を加熱あるいは冷却できる温度可変装置とを備え、

前記温度可変装置によって加熱あるいは冷却された前記基板の膨張あるいは収縮を用いて、前記フォトニック結晶に外力を印加する請求項1に記載の光路変換素子。

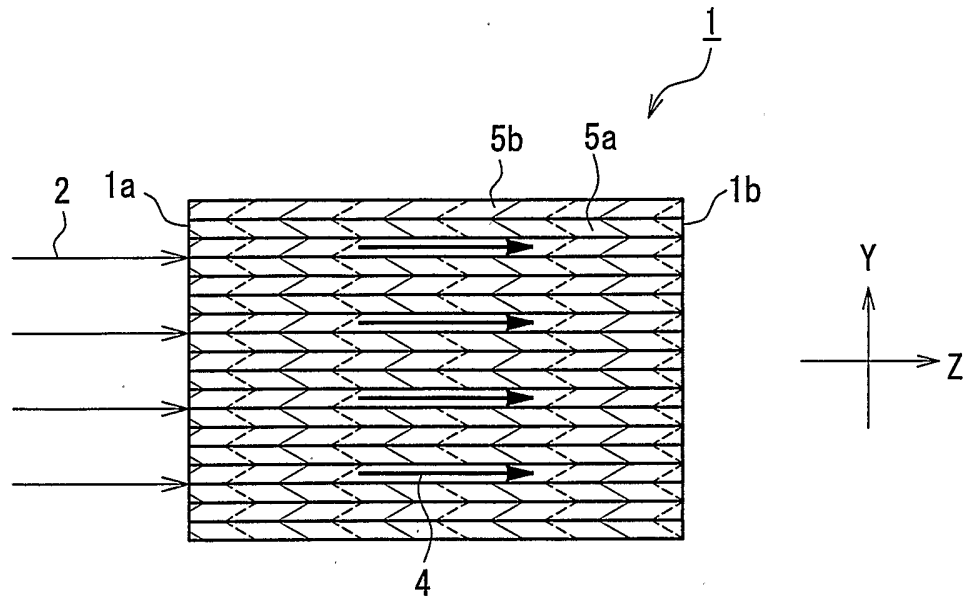


FIG. 1

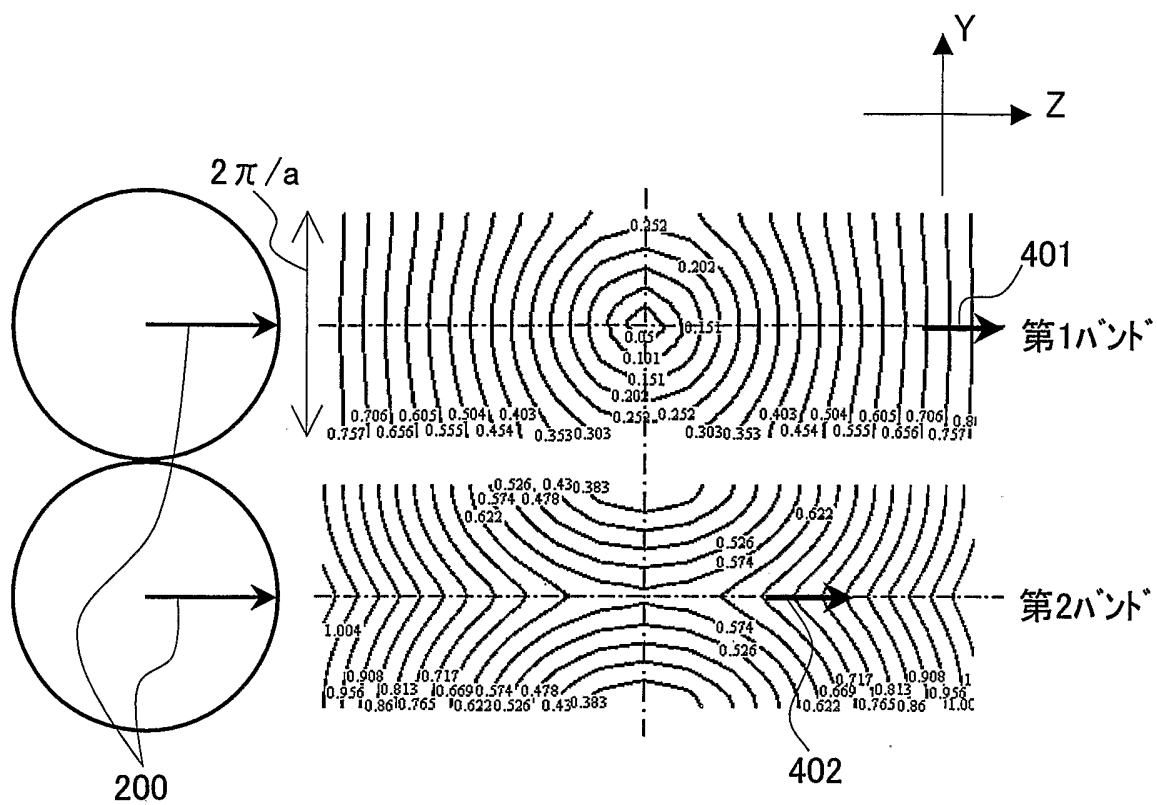


FIG.2

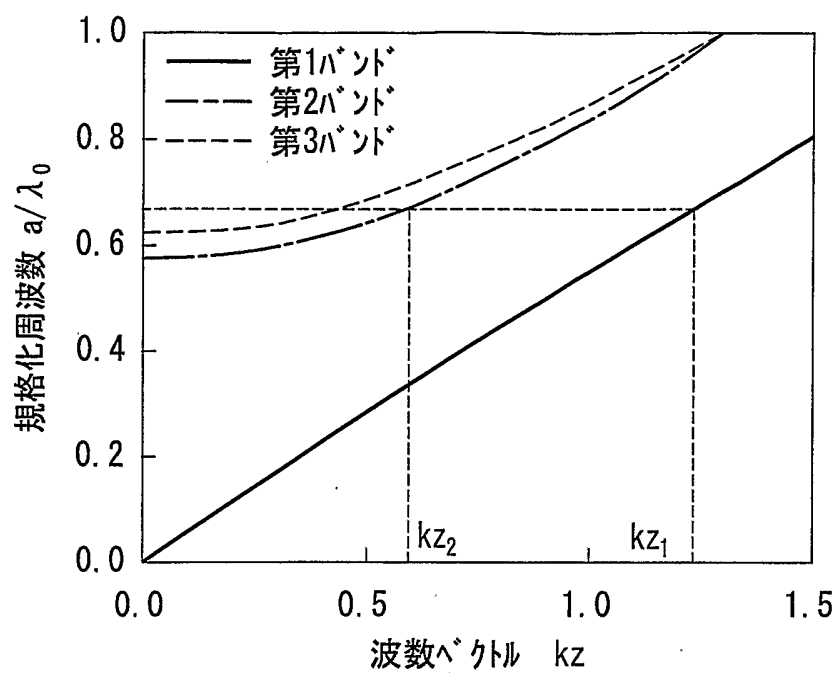


FIG. 3

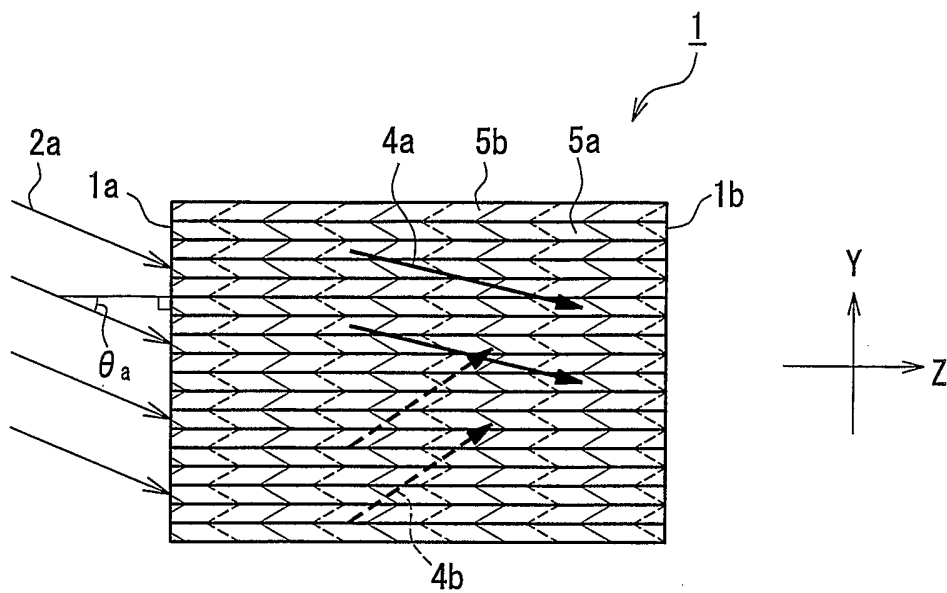


FIG. 4

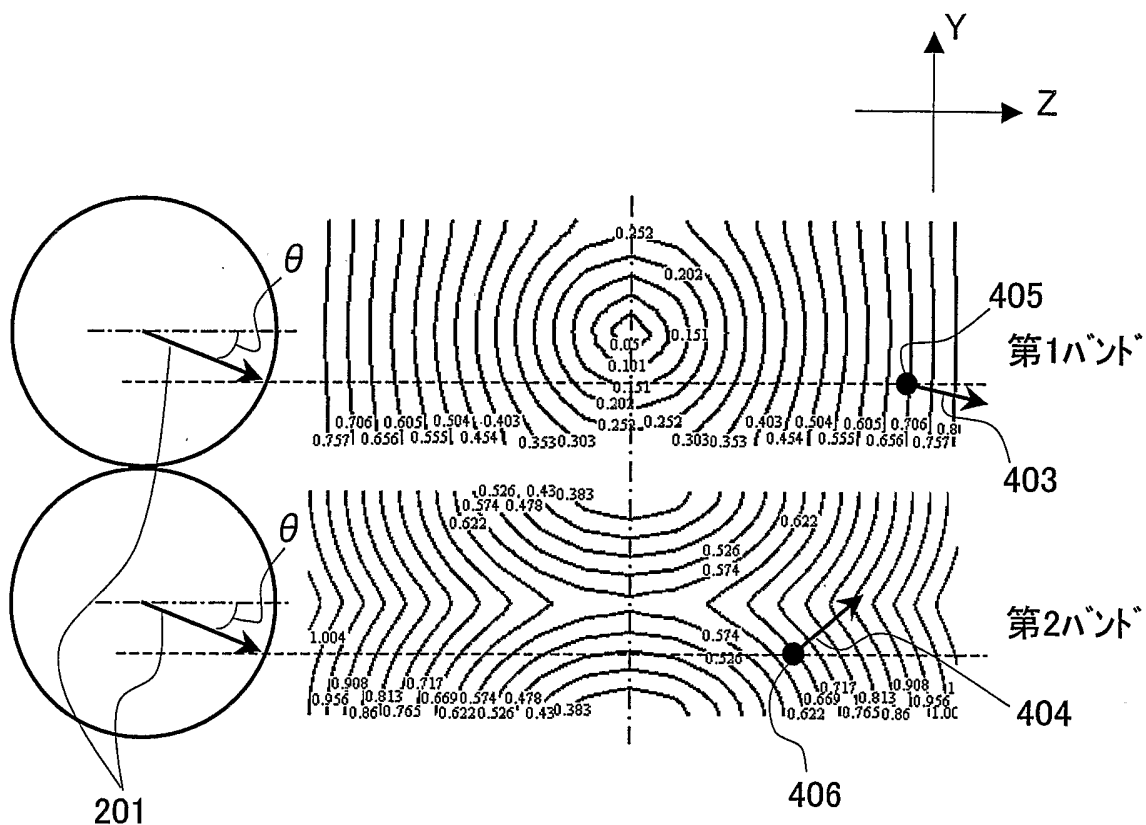


FIG.5

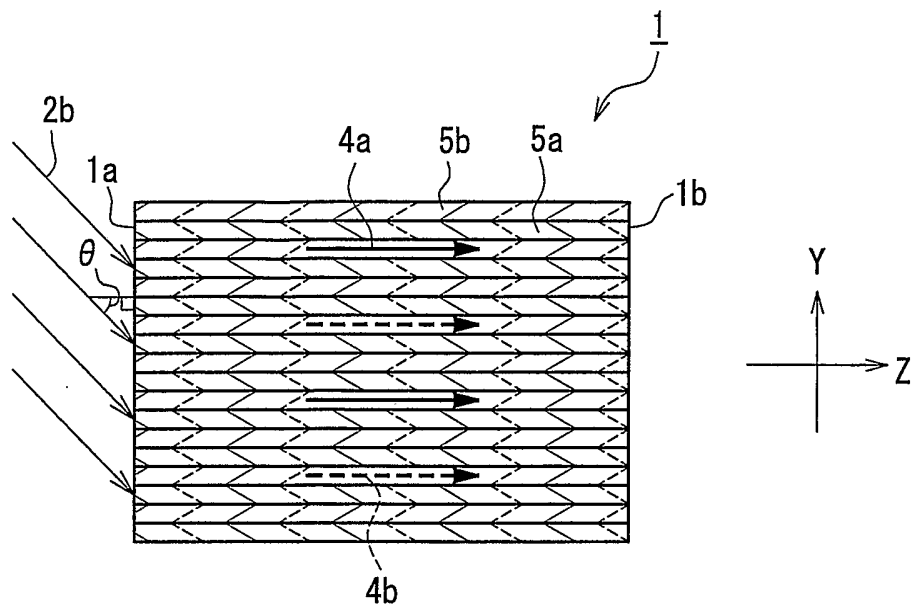


FIG. 6

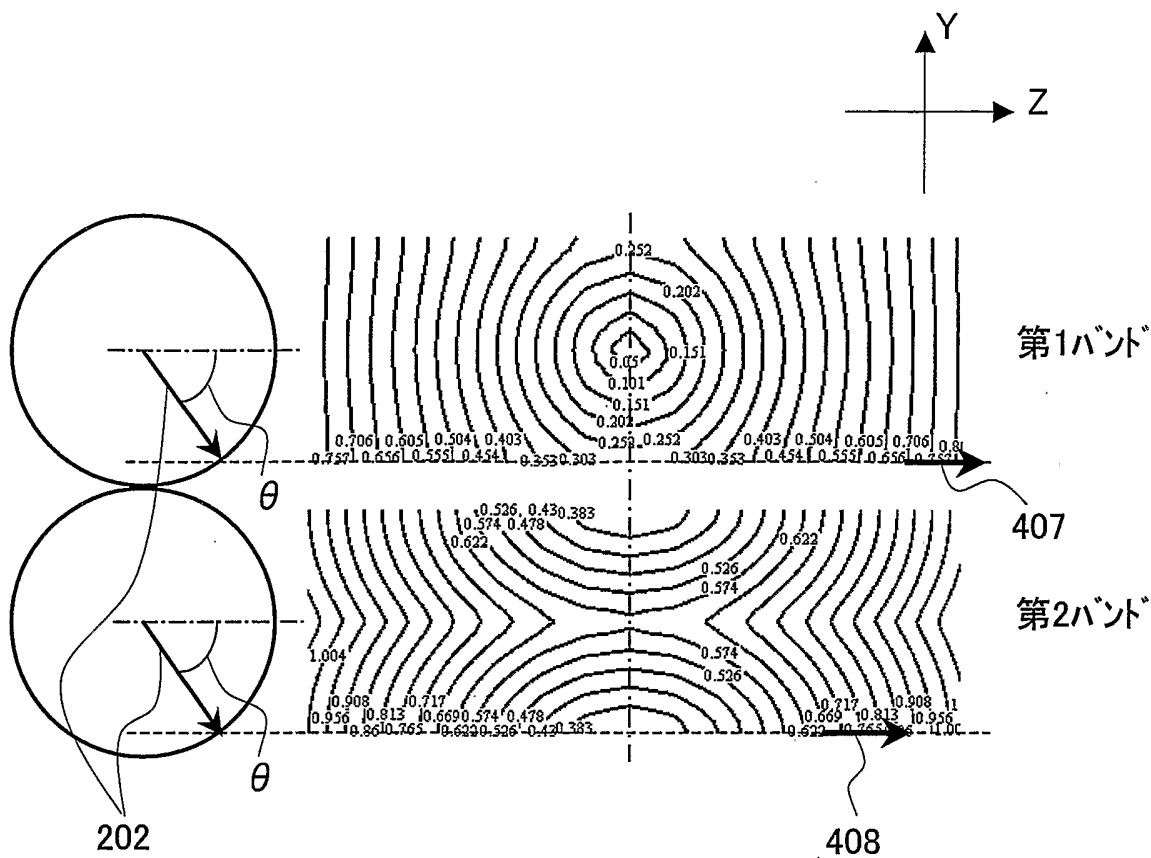


FIG.7

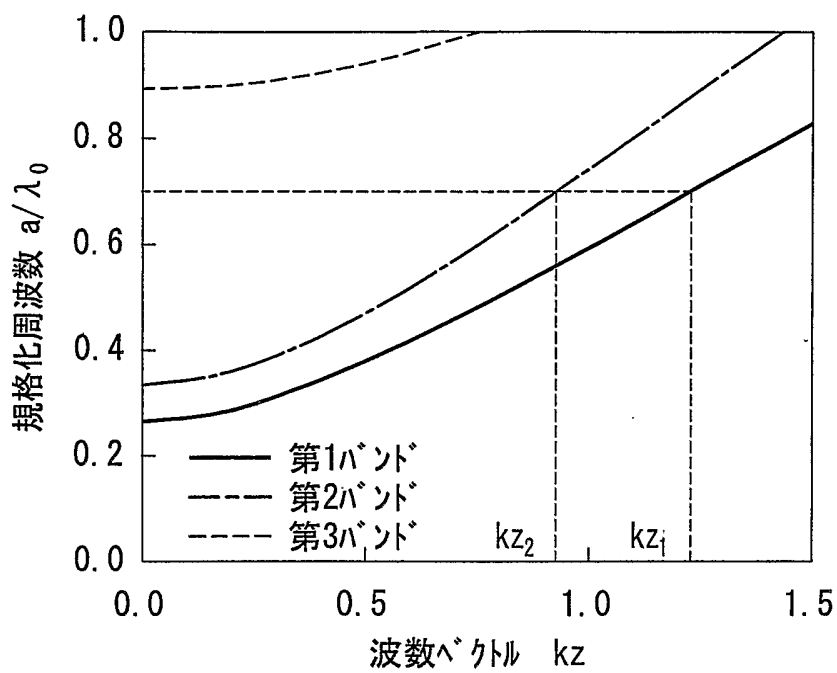


FIG. 8

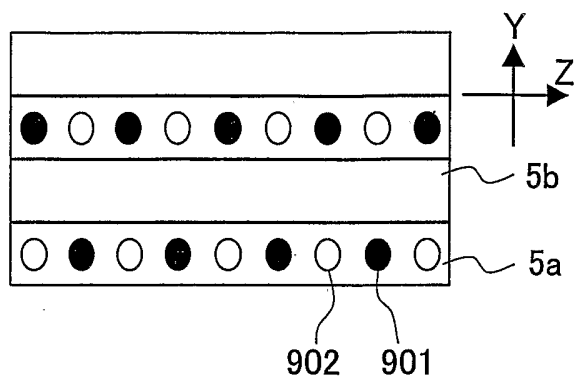


FIG. 9A

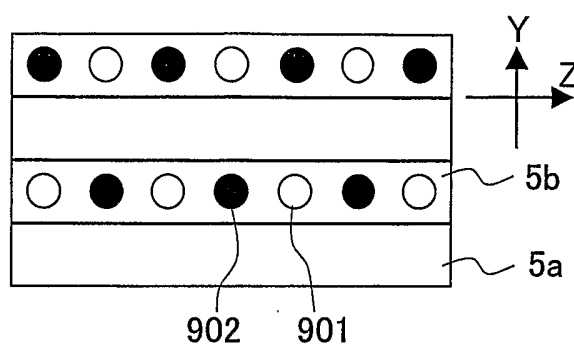


FIG. 9C

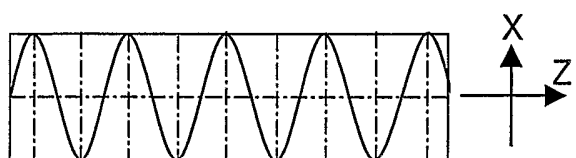


FIG. 9B

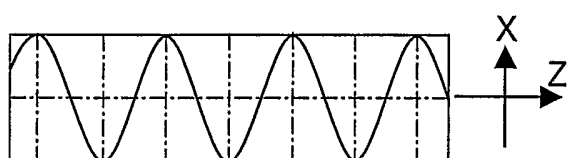


FIG. 9D

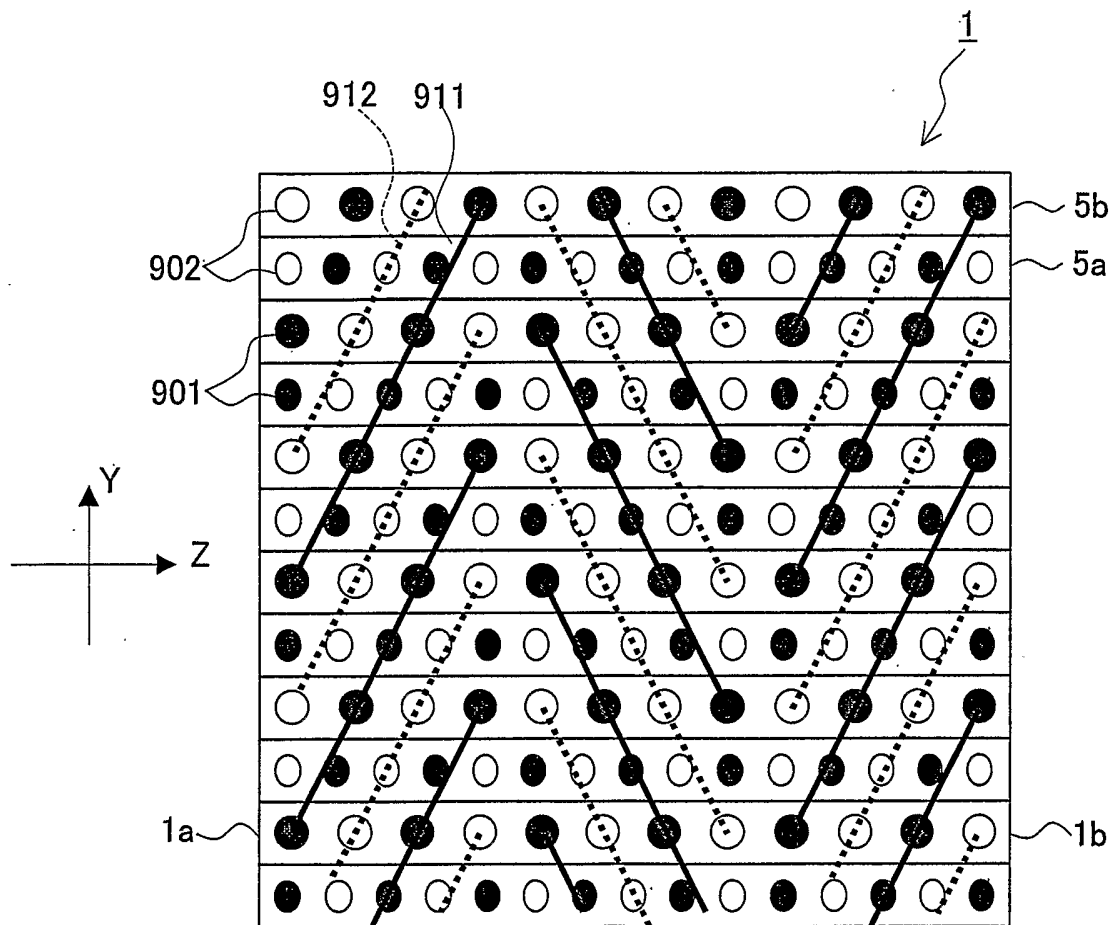


FIG.10

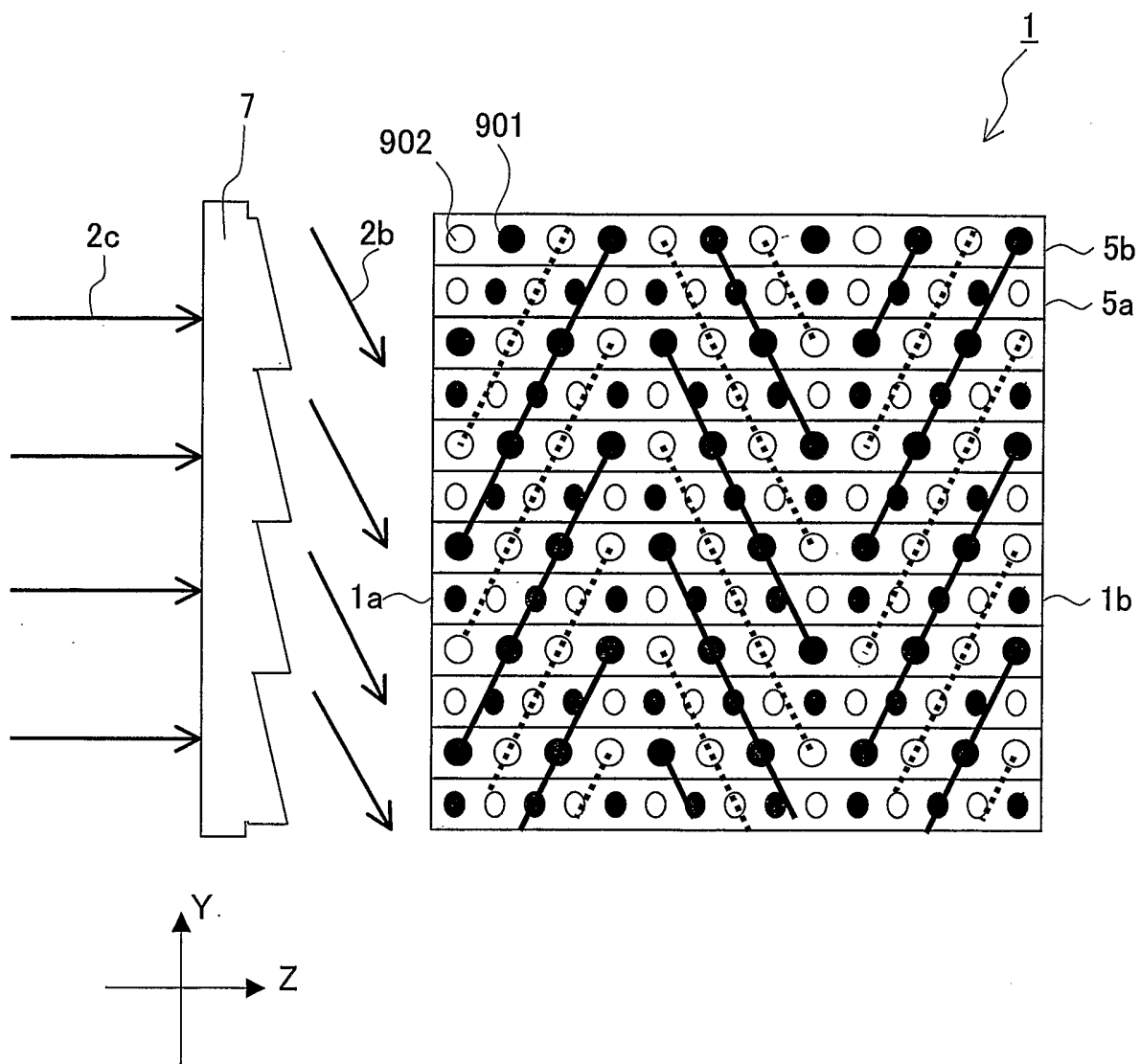


FIG.11

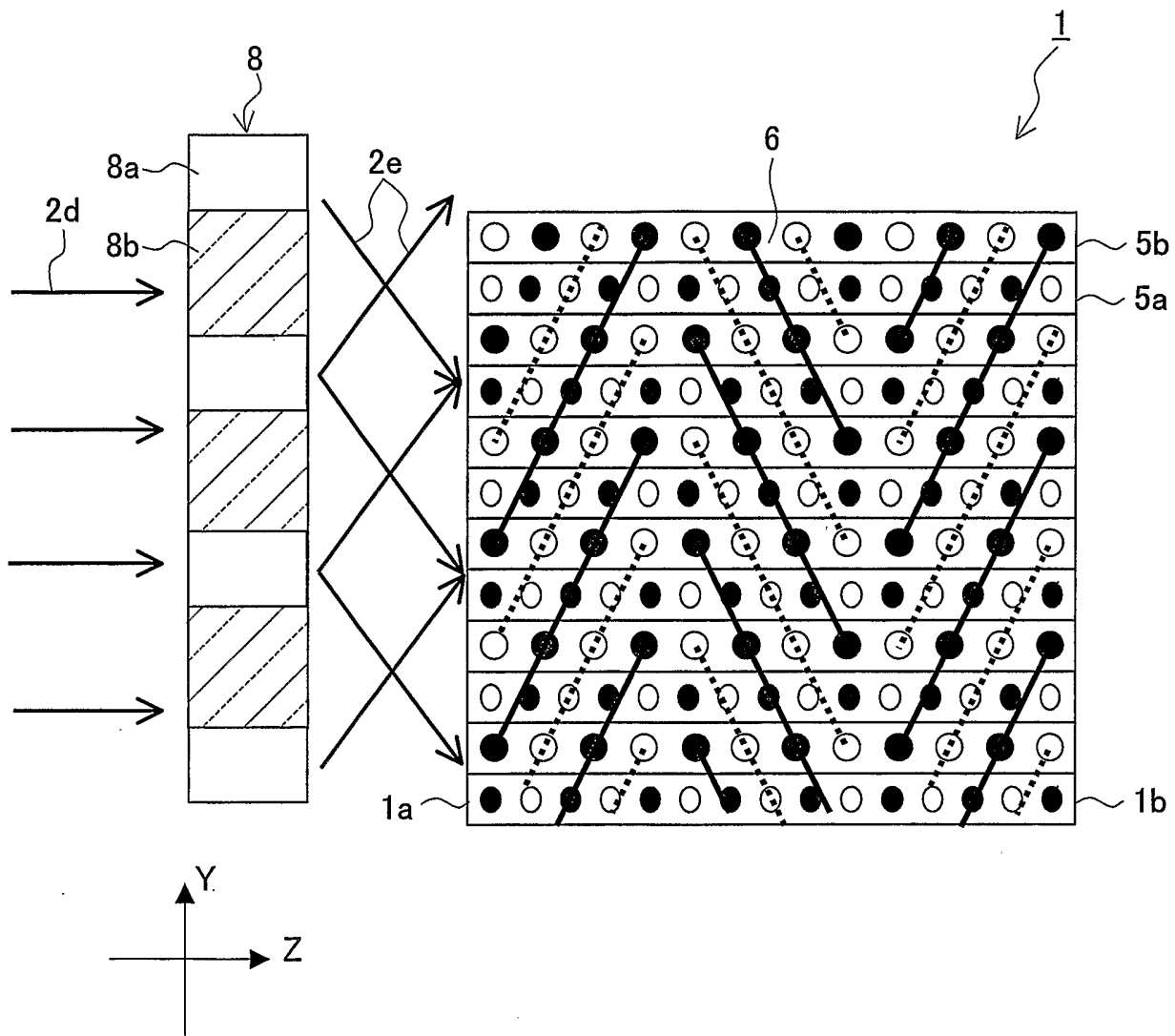


FIG.12

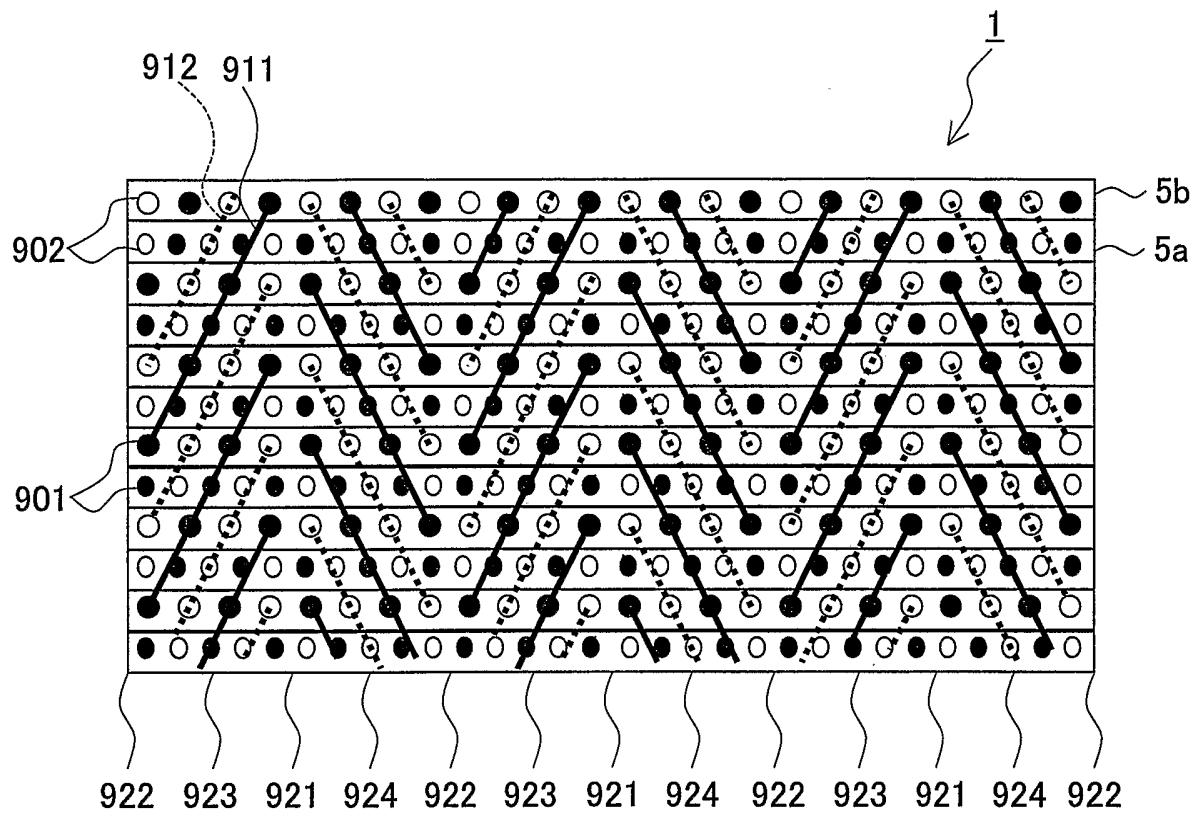


FIG.13

FIG.14A

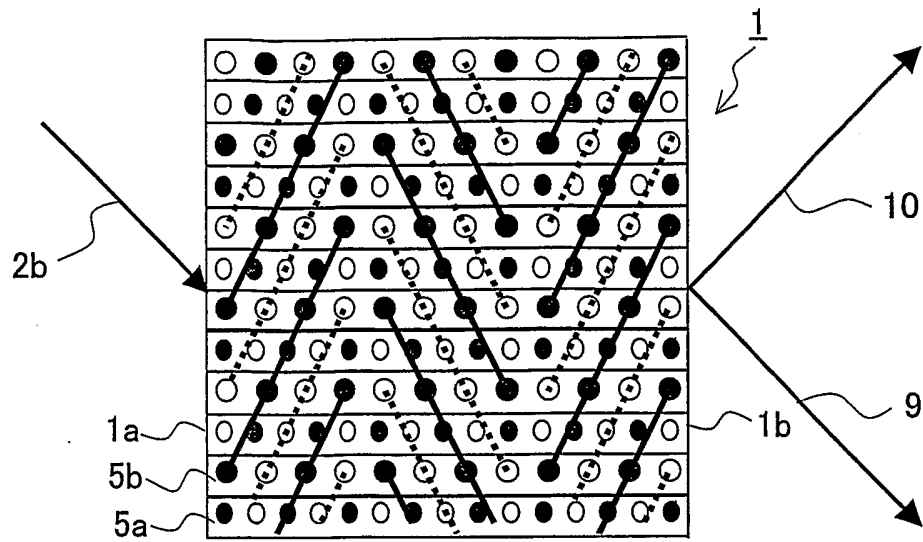


FIG.14B

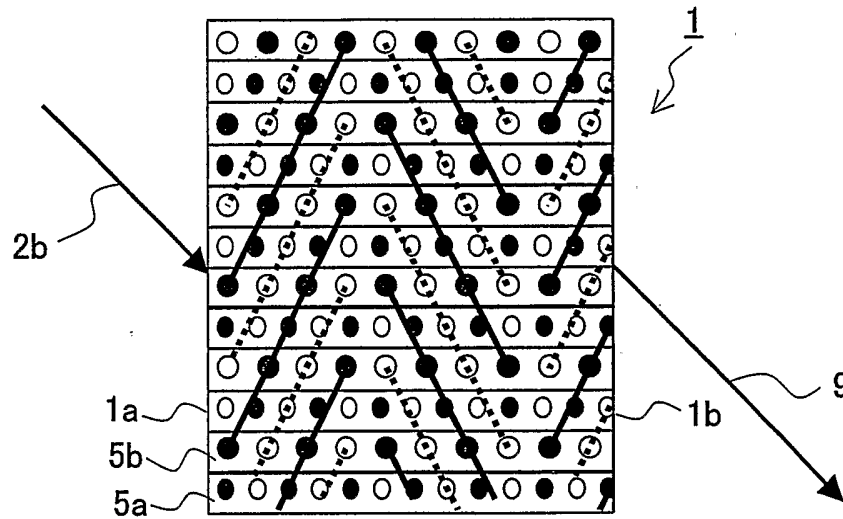
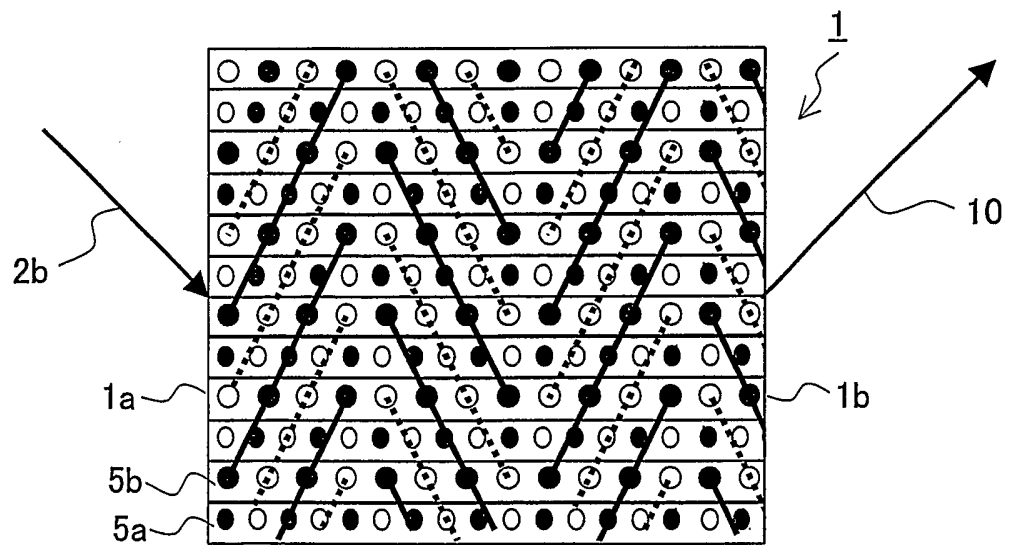


FIG.14C



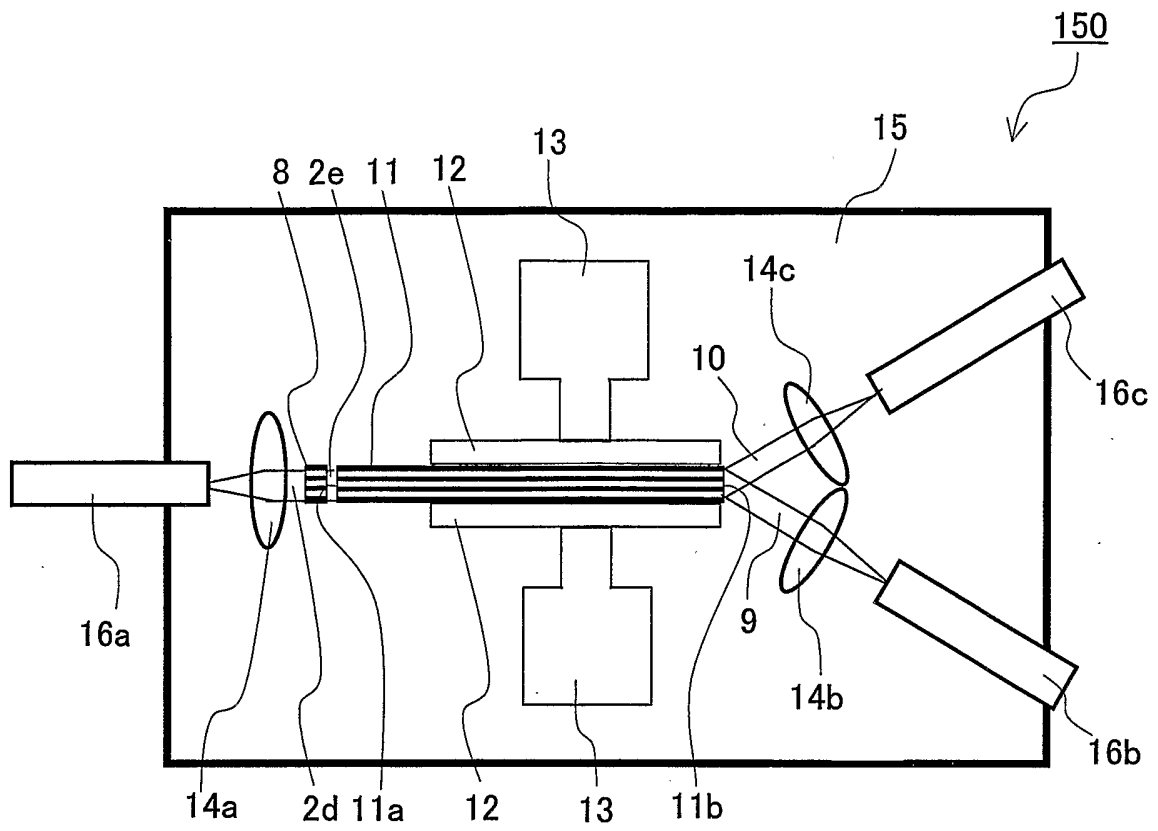


FIG.15

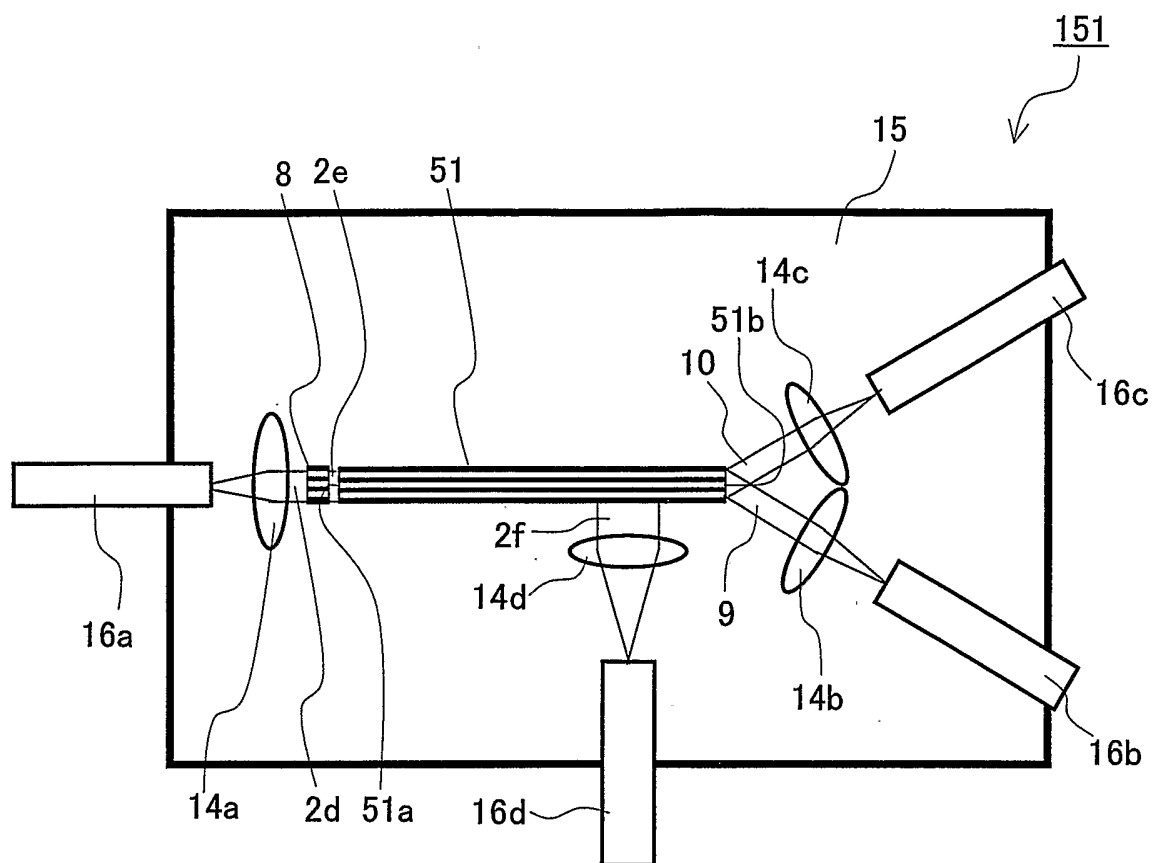


FIG.16

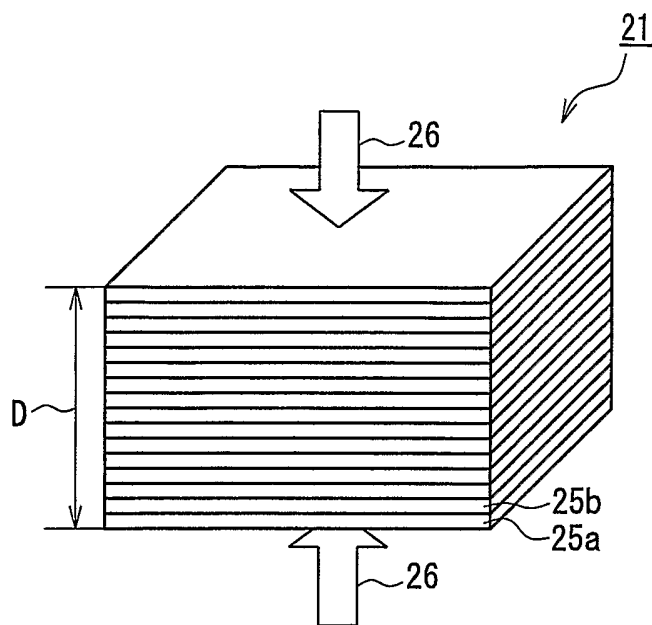


FIG. 17

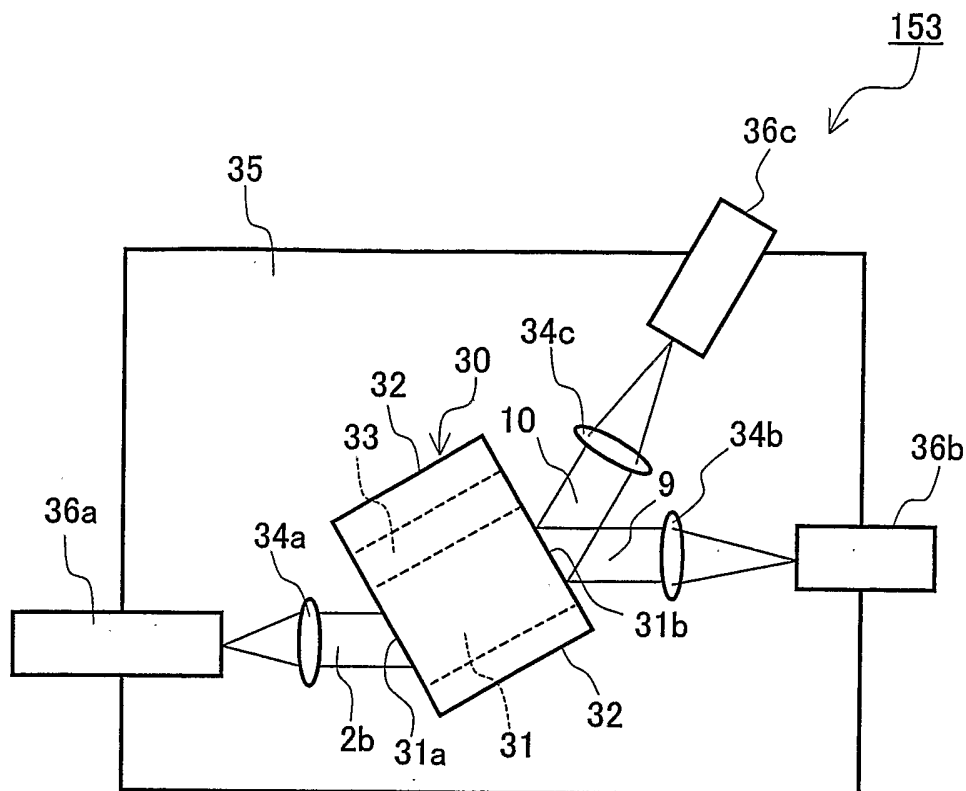


FIG. 18A

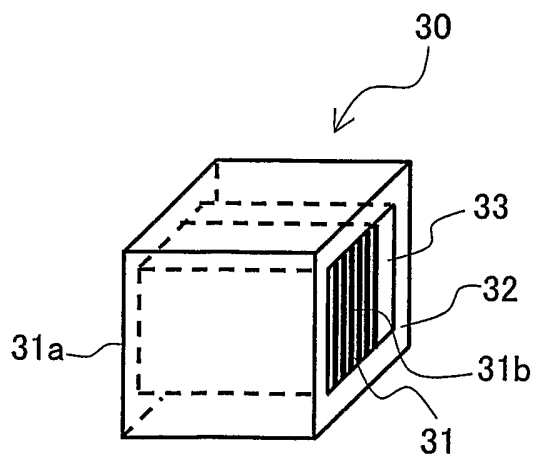


FIG. 18B

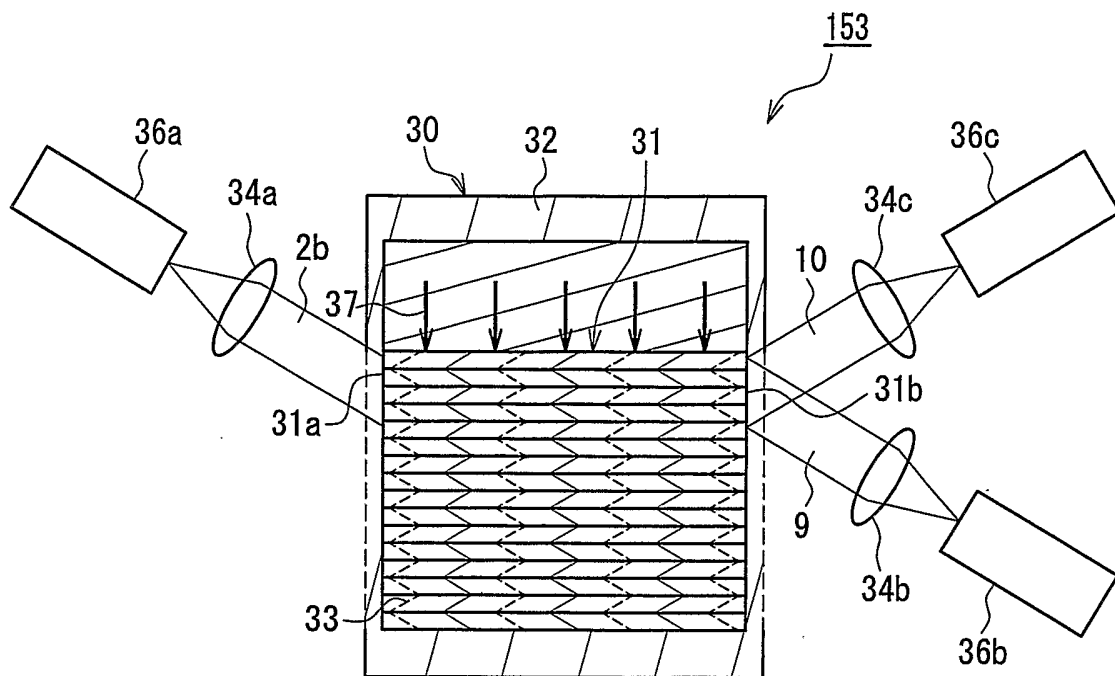


FIG. 18C

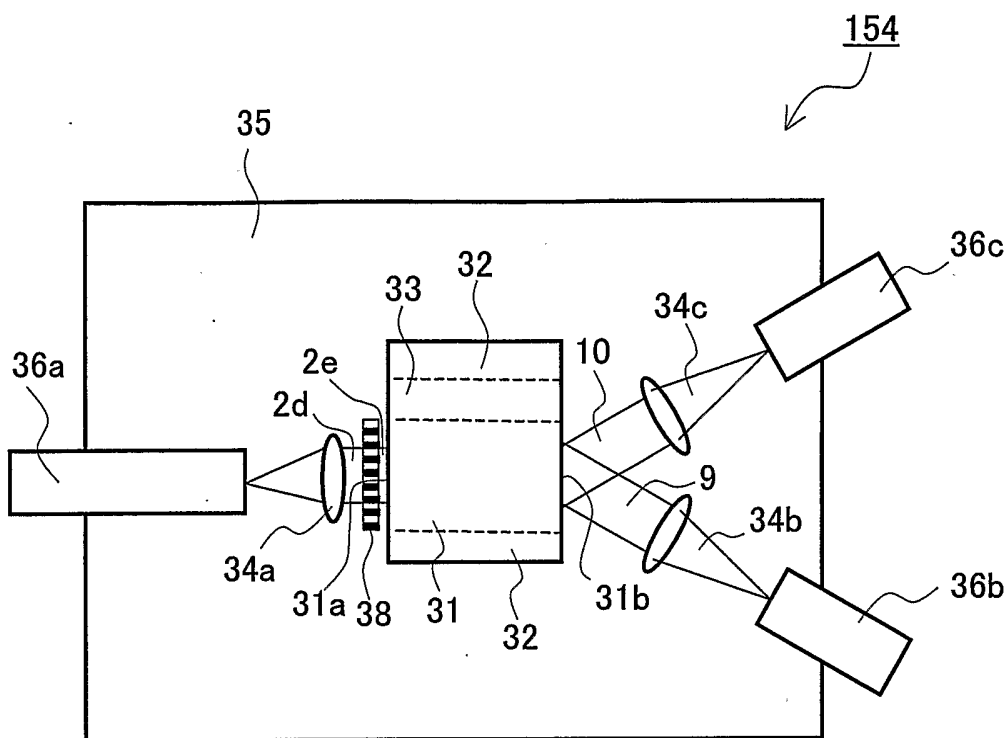


FIG.19

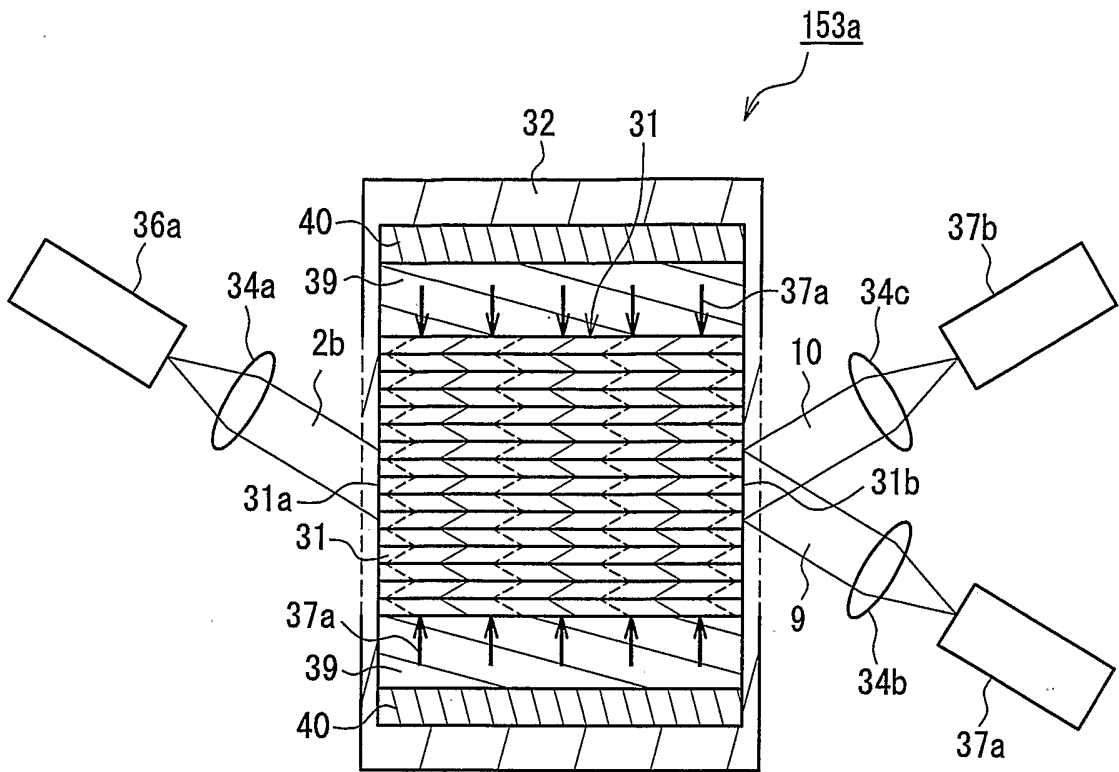


FIG. 20A

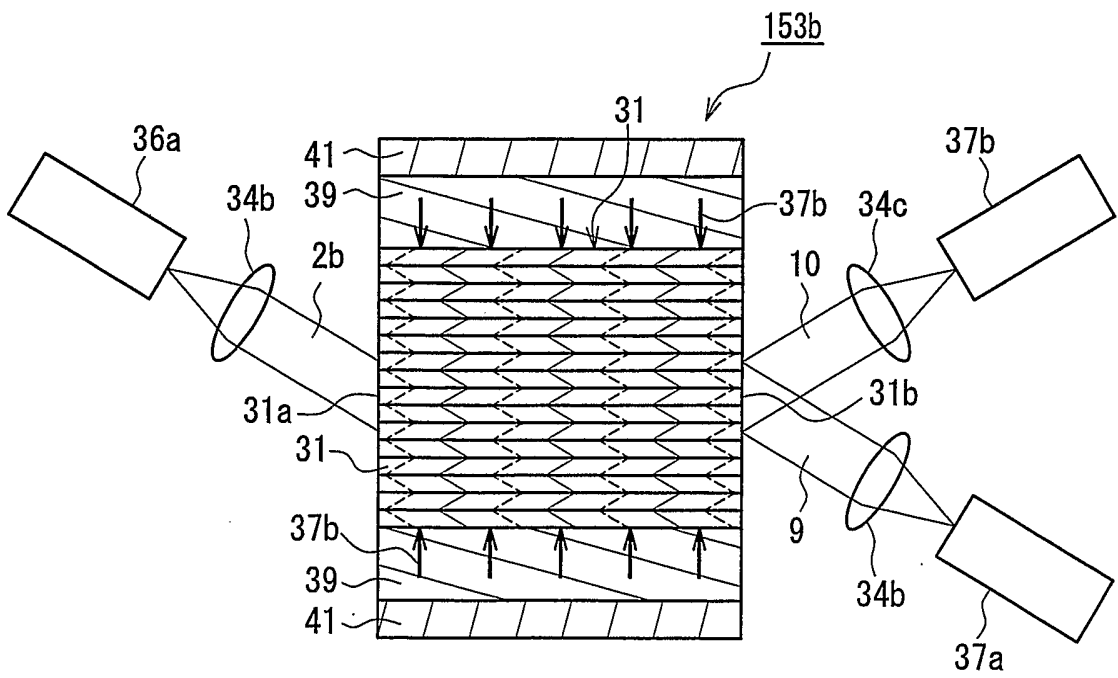


FIG. 20B

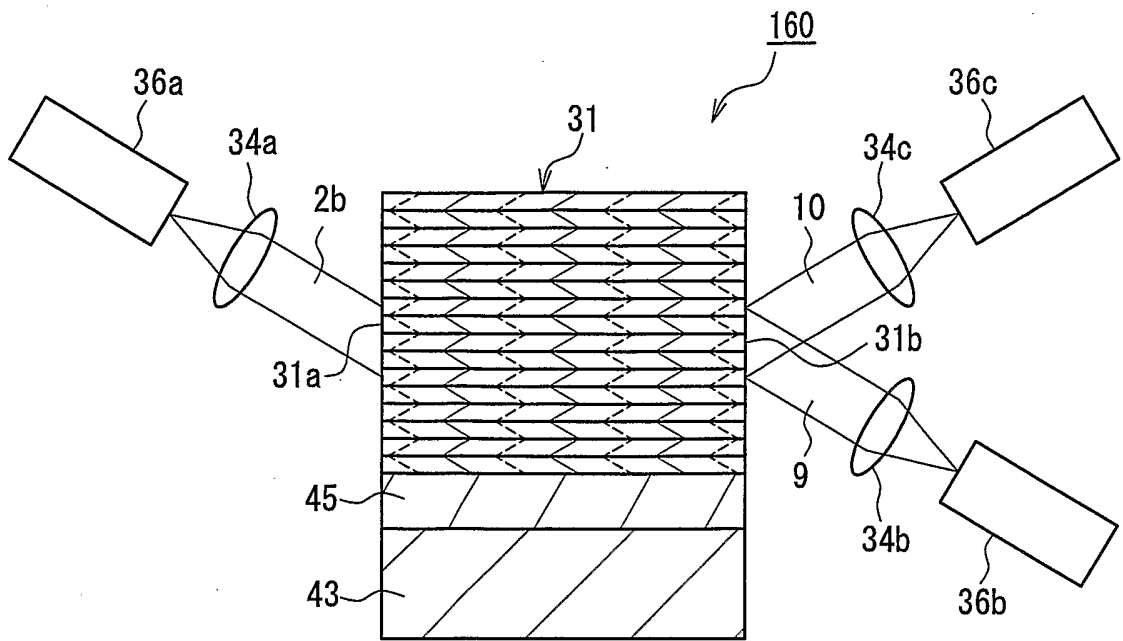


FIG. 21A

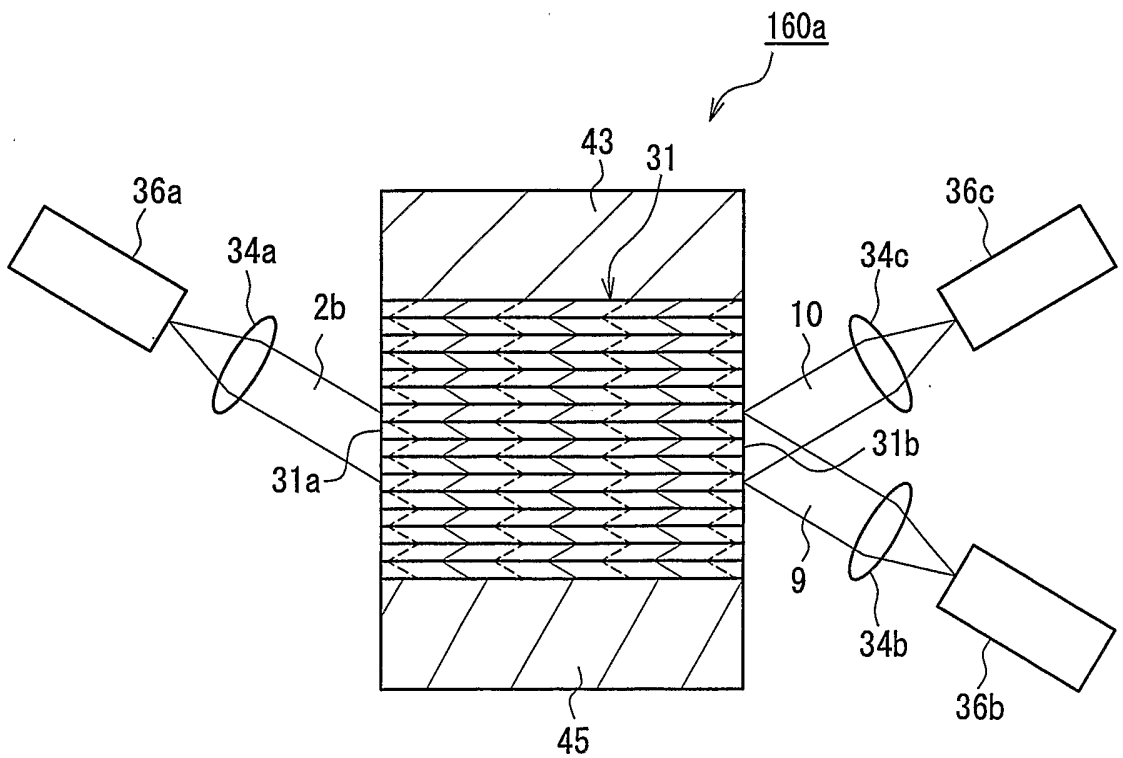


FIG. 21B

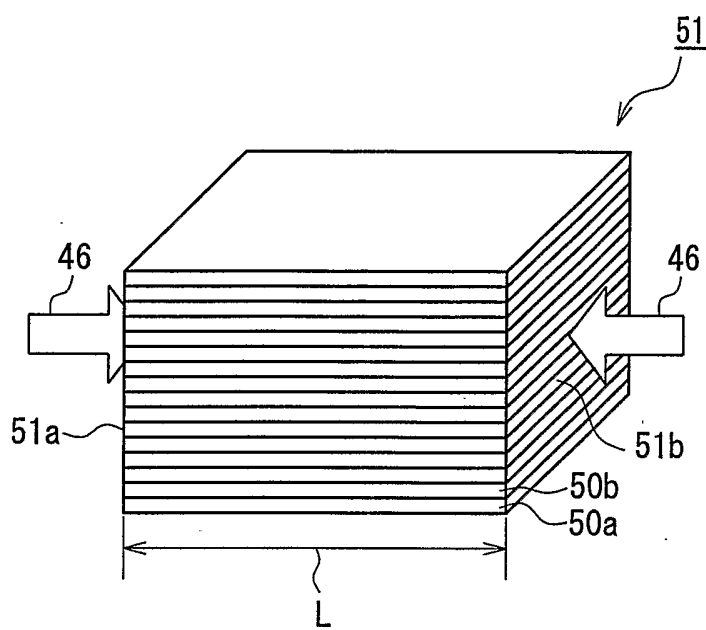


FIG. 22

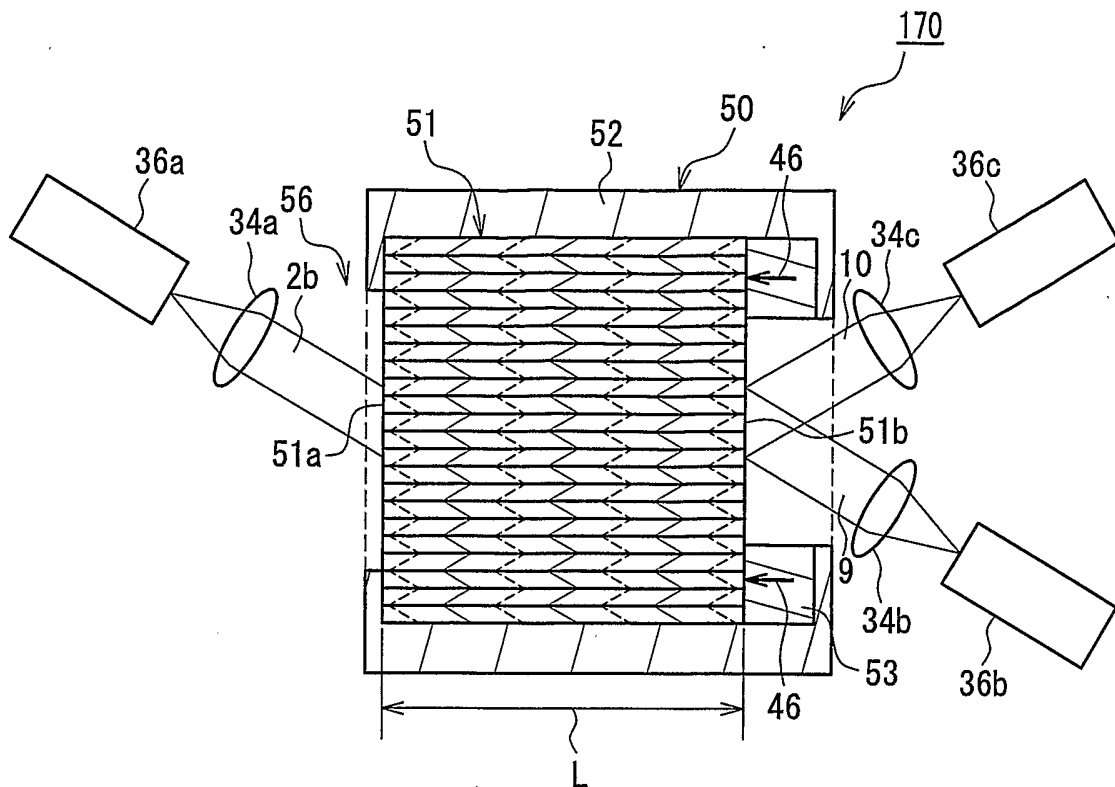


FIG. 23A

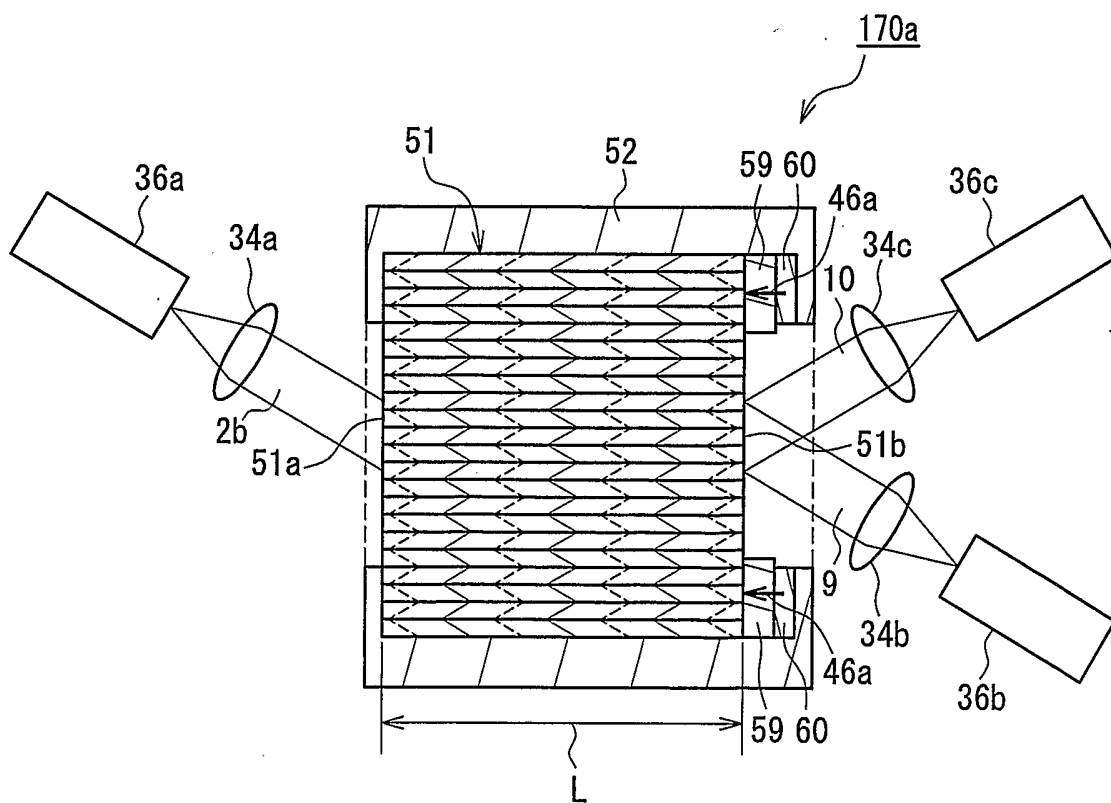


FIG. 23B

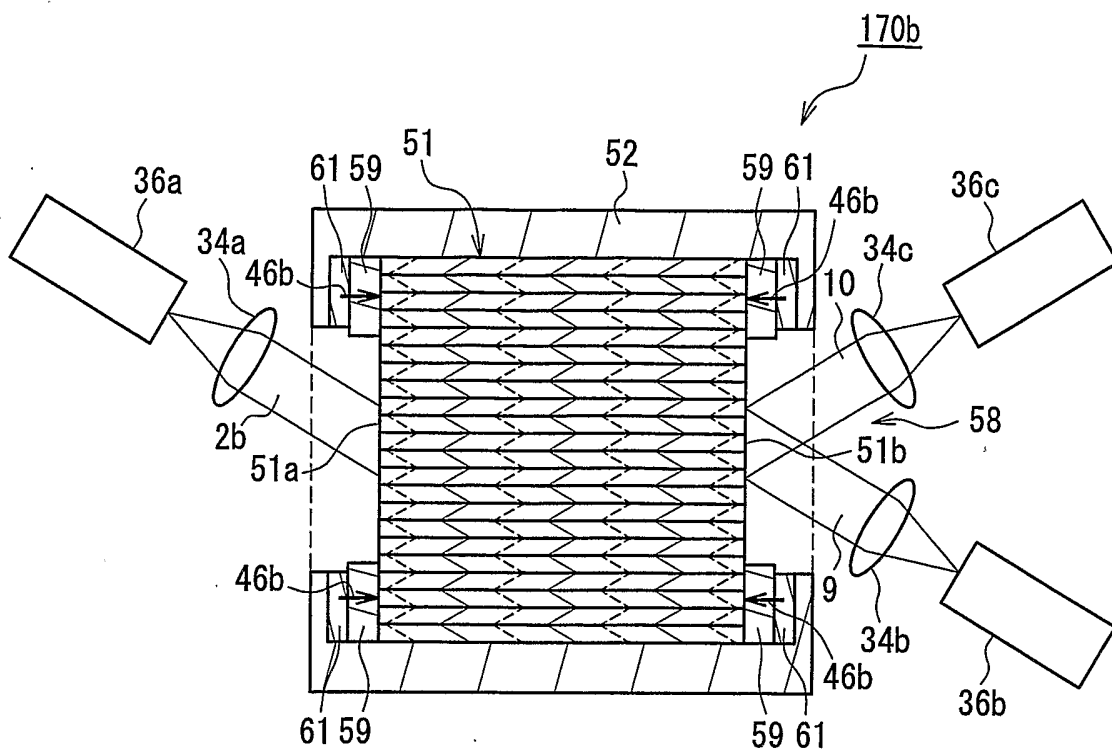


FIG. 23C

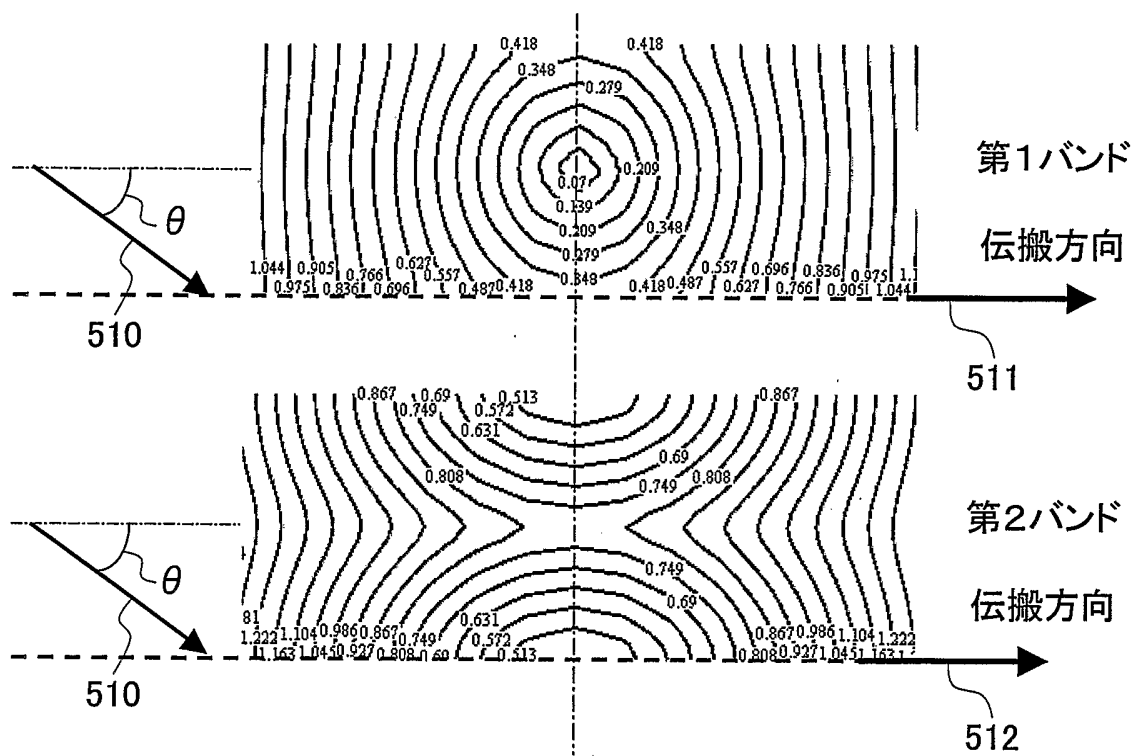


FIG.24

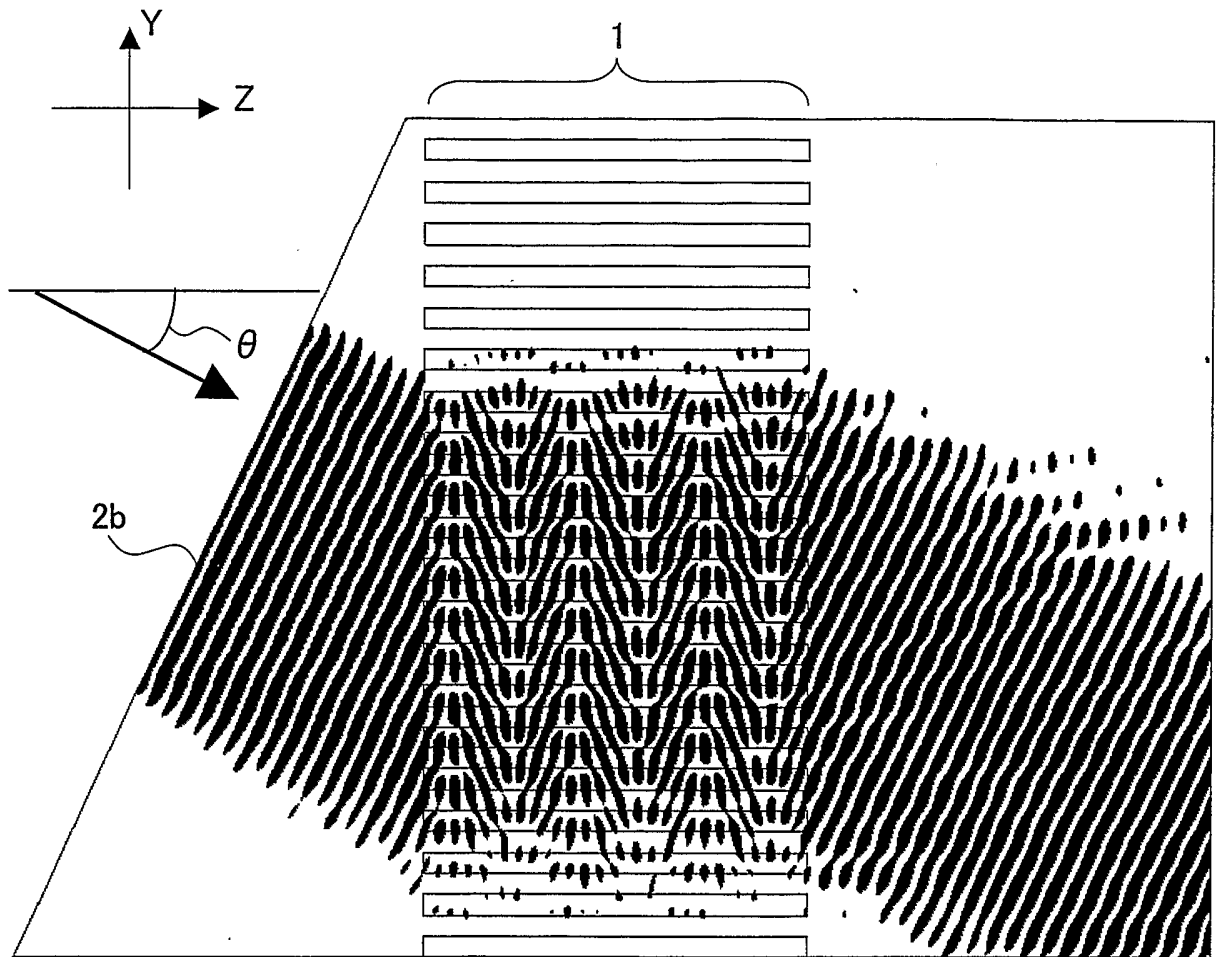


FIG.25

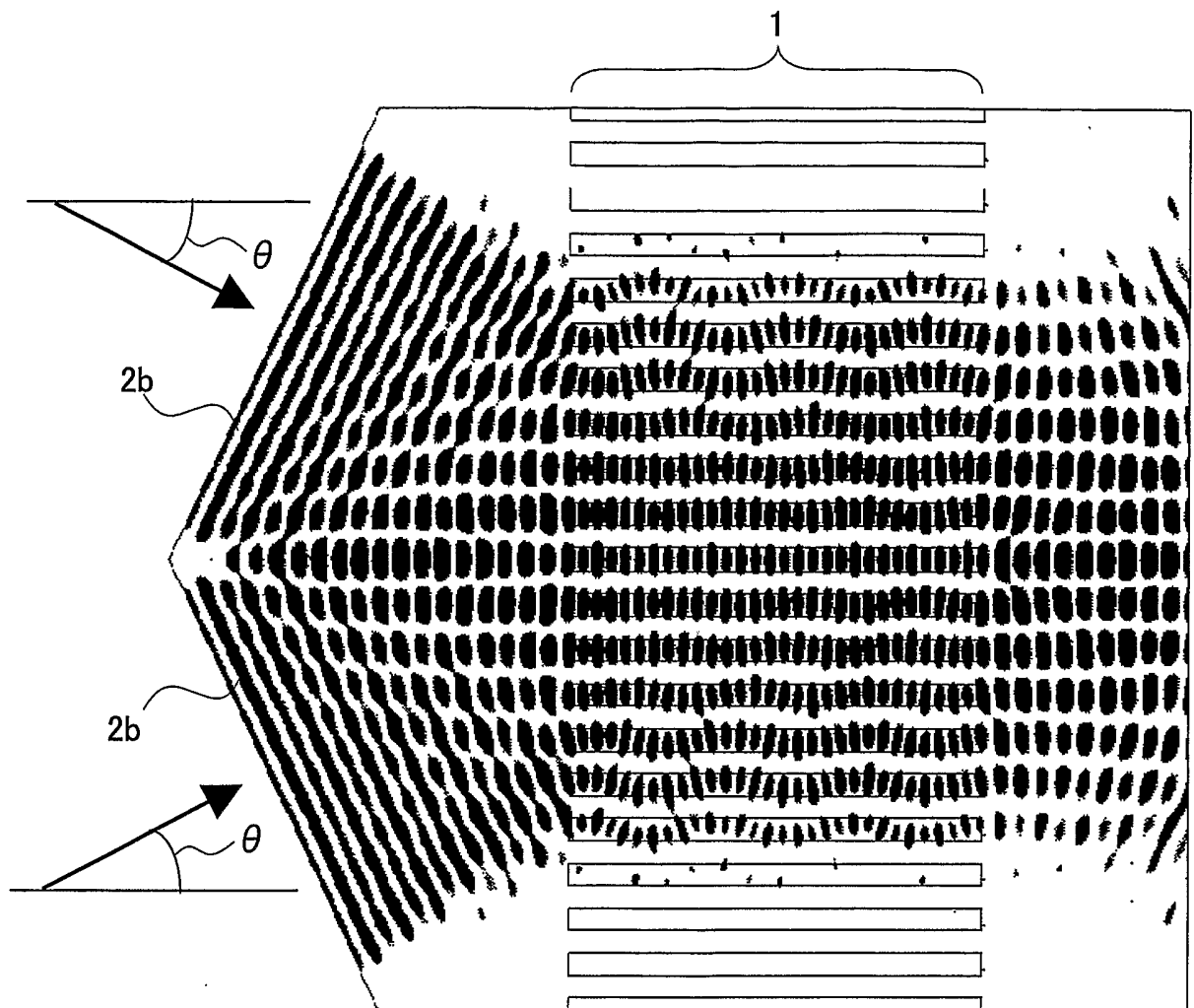


FIG.26

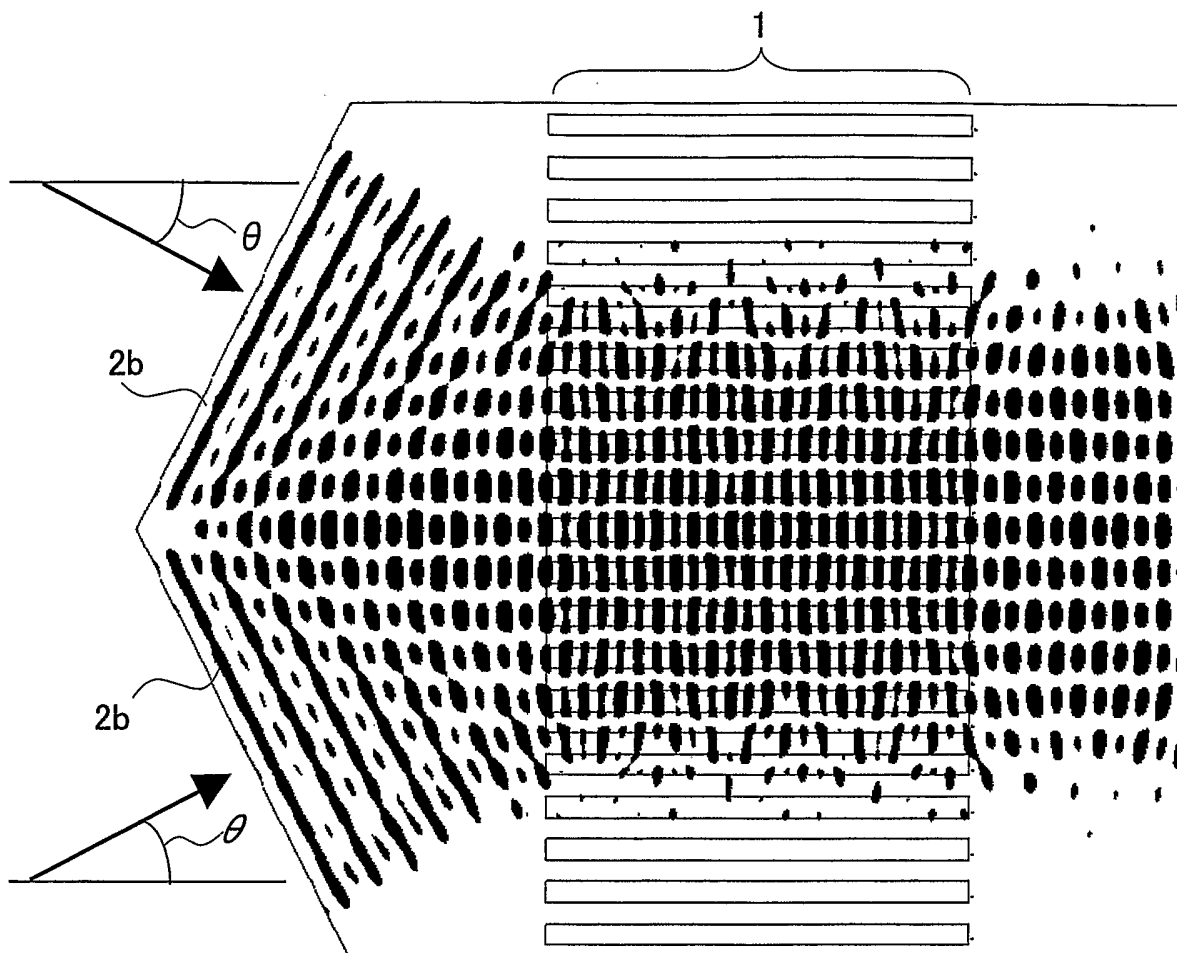


FIG.27

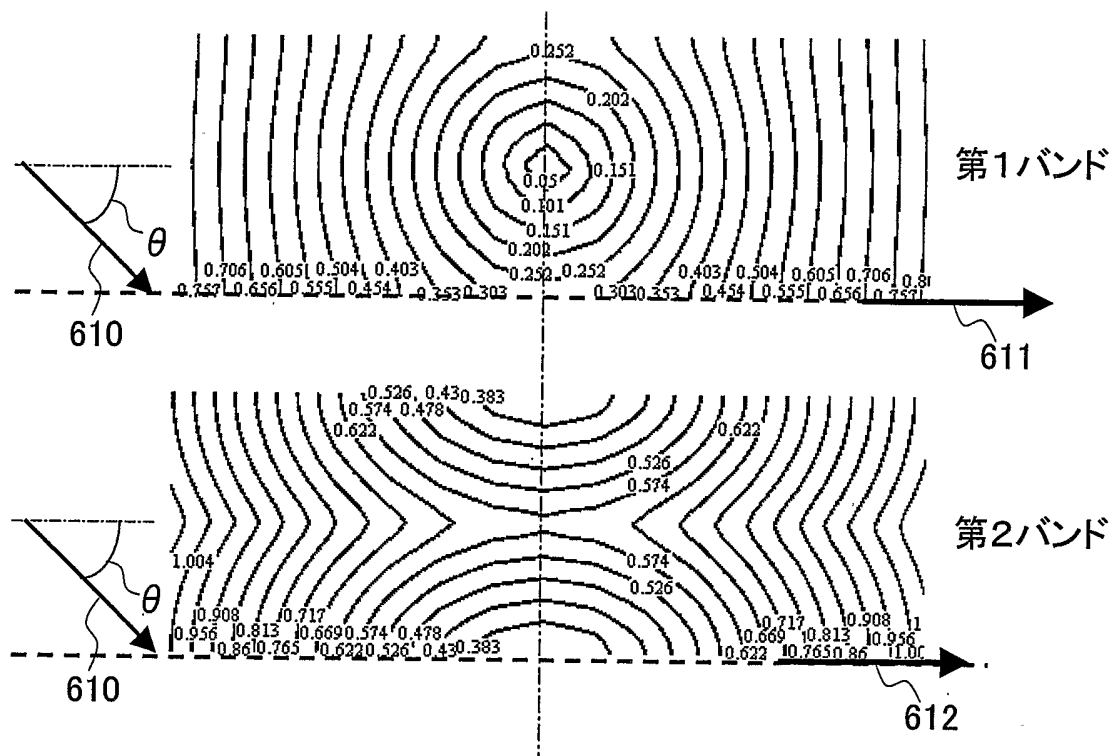


FIG.28

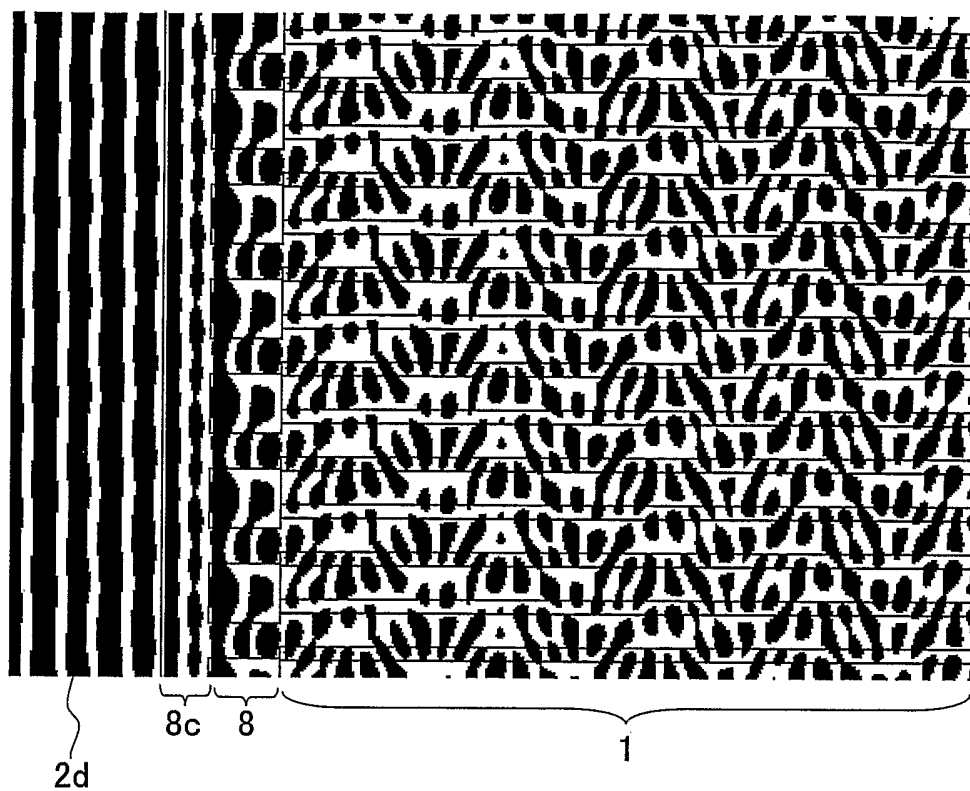


FIG.29

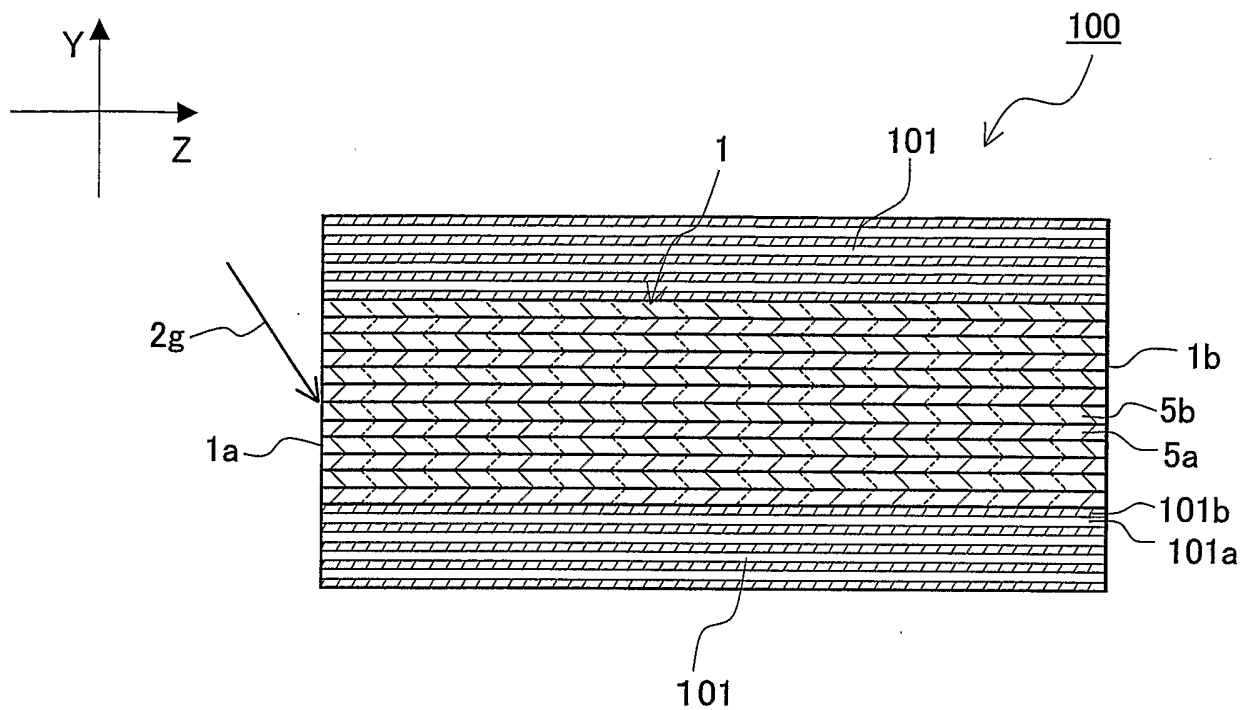


FIG.30

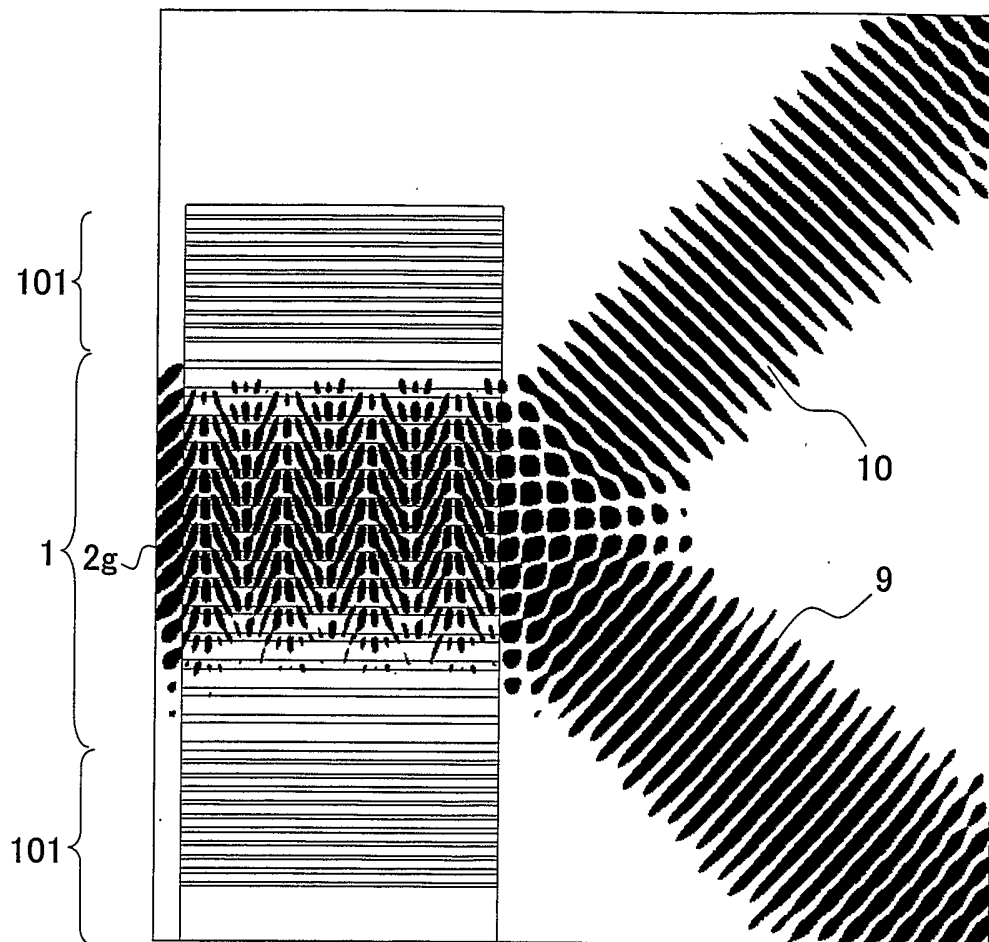


FIG.31

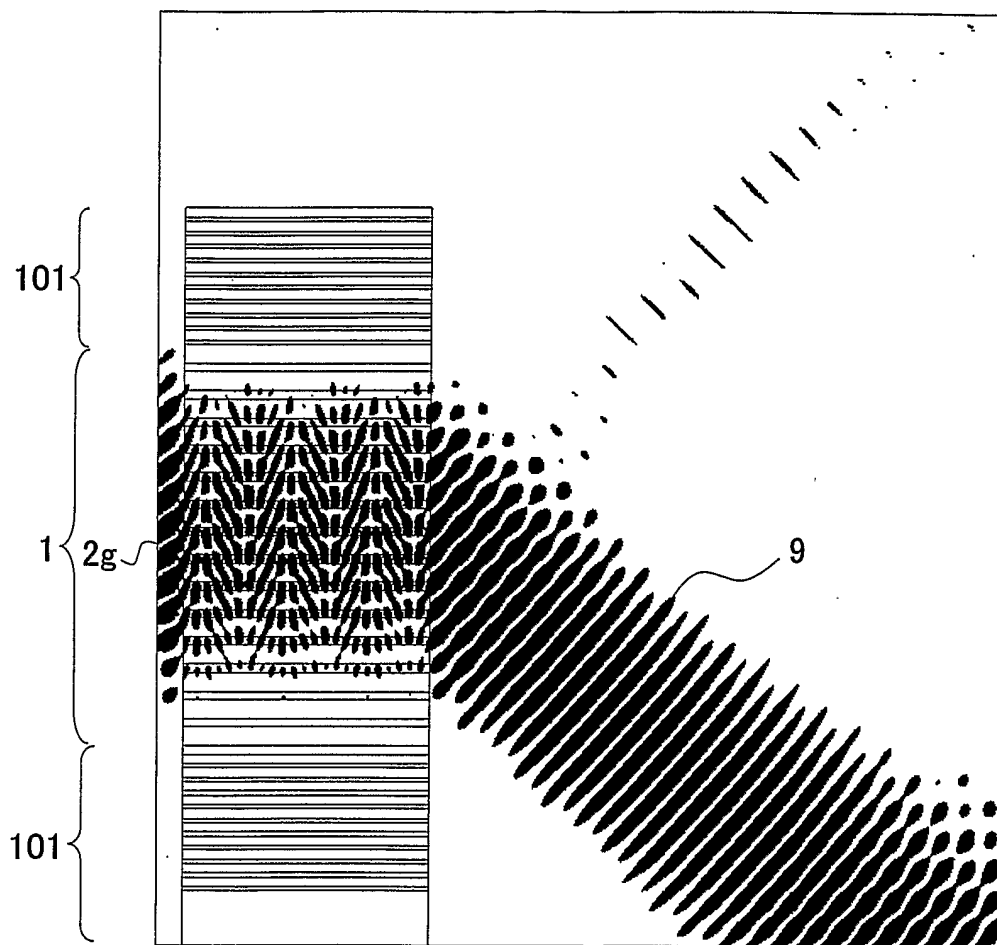


FIG.32

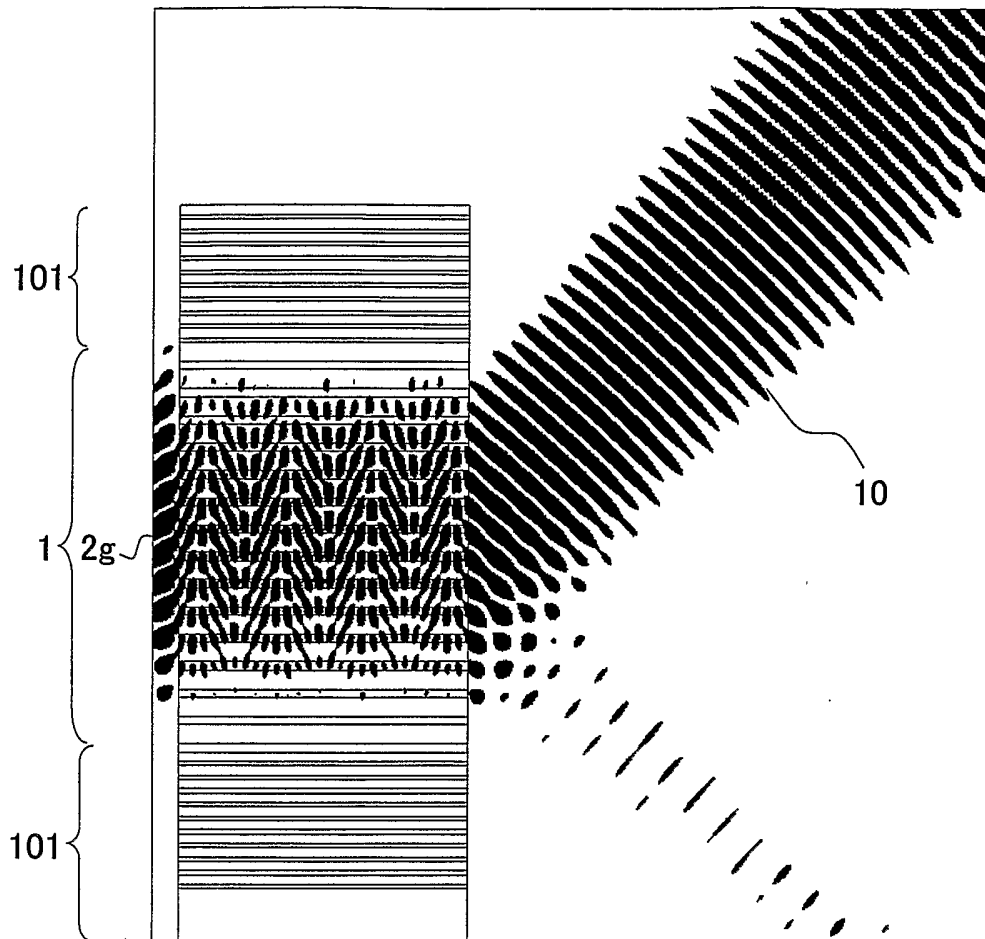


FIG.33

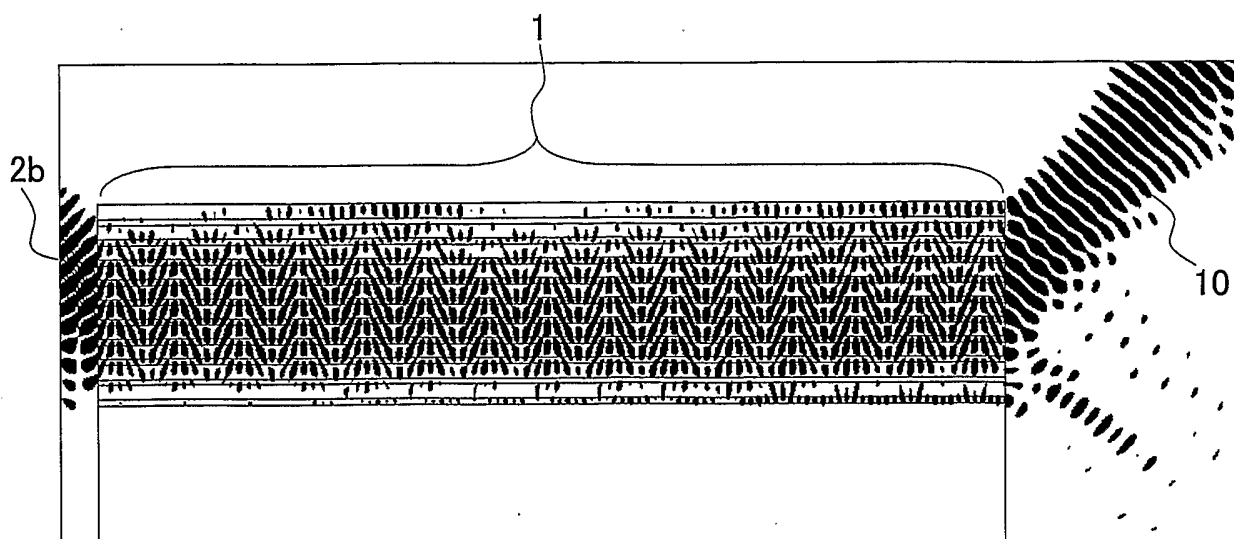


FIG.34A

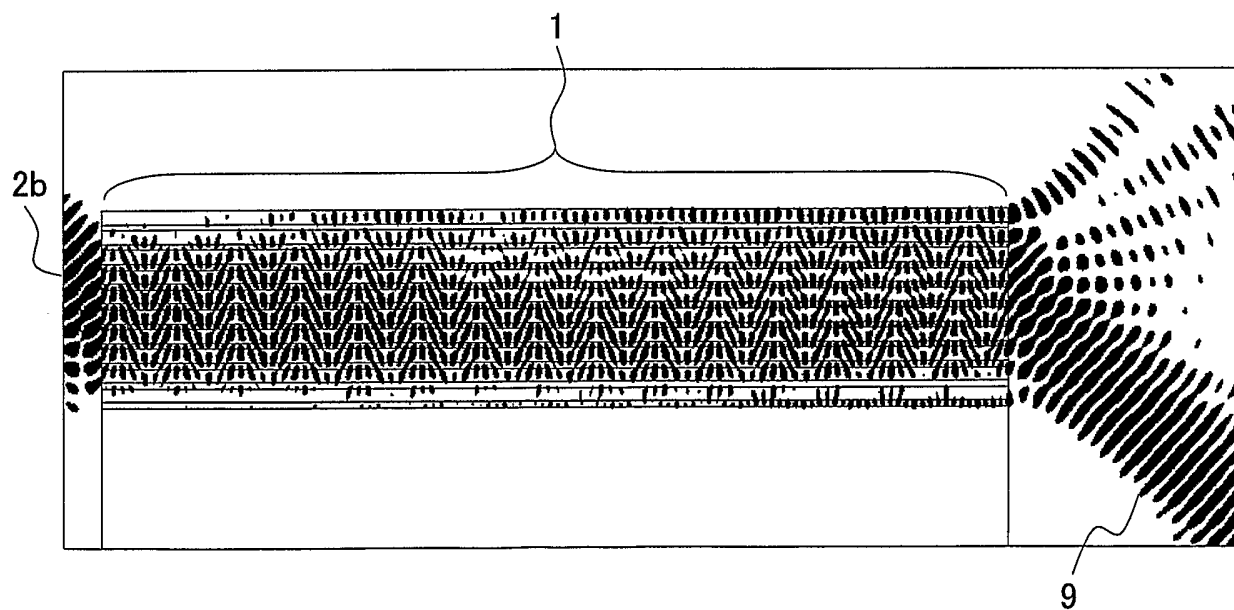


FIG.34B

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/008160

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G02F1/31

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G02F1/31, G02B6/12, G02B26/08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JICST, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|-----------------------|
| A | Shigeo KITAKA, et al., "1D Photonic Kessho ni yoru Hacho Bunsan", Dai 49 Kai Oyo Butsurigaku kankei Rengo Koenkai Koen Yokoshu, No.3, 28p-ZF-14, March, 2002, page 1035 | 1-19 |
| A | JP 2002-267845 A (Nippon Sheet Glass Co., Ltd.), 18 September, 2002 (18.09.02), & EP 1184708 A & US 2002/0027655 A1 & CN 1342910 A | 1-19 |
| A | JP 2002-350908 A (Matsushita Electric Works, Ltd.), 04 December, 2002 (04.12.02), & EP 1243966 A & US 2002/135863 A1 & CA 2377286 A & CN 1376941 A | 1-19 |

 Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

25 August, 2004 (25.08.04)

Date of mailing of the international search report

14 September, 2004 (14.09.04)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
 Int. Cl⁷ G02F1/31

B. 調査を行った分野
 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
 Int. Cl⁷ G02F1/31 G02B6/12 G02B26/08

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの
 日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2004年
 日本国登録実用新案公報 1994-2004年
 日本国実用新案登録公報 1996-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)
 JICST
 INSPEC

C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
|-----------------|--|------------------|
| A | 橋高重雄, 他4名, 1Dフォトニック結晶による波長分散, 第49回 応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 28p-ZF-14, 2002.0 3, p. 1035 | 1-19 |
| A | JP 2002-267845 A (日本板硝子株式会社) 200 2.09.18 & EP 1184708 A & US 20 02/0027655 A1 & CN 1342910 A | 1-19 |
| A | JP 2002-350908 A (松下電工株式会社) 200 2.12.04 & EP 1243966 A & US 20 | 1-19 |

C欄の続きにも文献が列挙されている。 パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献
 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 25.08.2004
 国際調査報告の発送日 14.9.2004

| | | | |
|--|---------------------------|----|------|
| 国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号 | 特許庁審査官 (権限のある職員) 佐藤 宙子 | 2X | 9316 |
| 電話番号 03-3581-1101 内線 3293 | | | |

| C (続き) . 関連すると認められる文献 | | |
|-----------------------|---|------------------|
| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
| | 02/135863 A1 & CA 2377286 A & CN 1376941 A | |