

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7685397号
(P7685397)

(45)発行日 令和7年5月29日(2025.5.29)

(24)登録日 令和7年5月21日(2025.5.21)

(51)国際特許分類

F I

G 0 2 F 1/295(2006.01)

G 0 2 F 1/295

G 0 2 B 6/125(2006.01)

G 0 2 B 6/125 3 0 1

請求項の数 3 (全22頁)

(21)出願番号	特願2021-140877(P2021-140877)	(73)特許権者	000004352
(22)出願日	令和3年8月31日(2021.8.31)		日本放送協会
(65)公開番号	特開2023-34575(P2023-34575A)		東京都渋谷区神南2丁目2番1号
(43)公開日	令和5年3月13日(2023.3.13)	(74)代理人	110001807
審査請求日	令和6年7月1日(2024.7.1)		弁理士法人磯野国際特許商標事務所
		(72)発明者	平野 芳邦
			東京都世田谷区砧一丁目10番11号
			日本放送協会放送技術研究所内
		(72)発明者	宮本 裕司
			東京都世田谷区砧一丁目10番11号
			日本放送協会放送技術研究所内
		(72)発明者	三浦 雅人
			東京都世田谷区砧一丁目10番11号
			日本放送協会放送技術研究所内
		(72)発明者	町田 賢司
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光ビーム収束・発散制御デバイス

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

光導波路である1つの光入力部と、光導波路の端部である光出力部のチャネル数と同数の光導波路が並列配置されたマルチチャネル光導波路と、前記光入力部から入力する光を前記光導波路に分配する光分離部と、印加電圧もしくは電流供給により光の位相を制御する位相制御部と、を備え、

前記光分離部は、1入力3出力の少なくとも1つの光分配素子と、前記光分配素子の1出力から出力される光を2つの光導波路に分配する1つのスプリッタと、を備え、

前記光分配素子の1出力と前記スプリッタとの接続部に位相制御部が配置されており、前記光出力部のチャネル数を偶数の所定値nとして、4以上n以下の偶数を変数Nとしたとき、

前記光分配素子は、N本分の光導波路の光強度を有する光を入力して3つに分岐して出力する素子であって、1×N MMI光スプリッタと、(N-2)×1 MMI光コンバイナとを近接配置して構成されており、かつ、

前記光分配素子の3出力のうちの一側の出力端、中央の出力端、他側の出力端の光強度比は、1:(N-2):1である

ことを特徴とする光ビーム収束・発散制御デバイス。

【請求項2】

Nの値が2つつ異なる複数の光分配素子が、光入力側からNの大きい順に縦列に配置され、Nの大きい側の光分配素子の中央の出力端と、Nの小さい側の光分配素子の入力と

の接続部に、位相制御部が配置されている

ことを特徴とする請求項 1 に記載の光ビーム収束・発散制御デバイス。

【請求項 3】

前記位相制御部は、光導波路を挟んで対向して配置された第 1 電極および第 2 電極を備え、

前記第 1 電極と前記第 2 電極とが対向する方向において重複する重複領域は、前記第 1 電極と前記第 2 電極の一方が配置された領域と同じ広さであるかまたはそれよりも狭い領域であり、且つ、他方が配置された領域よりも狭い領域である

ことを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載の光ビーム収束・発散制御デバイス。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

本発明は、光ビームパターンを制御するデバイスに係り、特に、光ビームを収束光にしたり発散光にしたりする光ビーム収束・発散制御デバイスに関する。

【背景技術】

【0002】

空間光通信や奥行センサ、レーダー、LiDAR (Light Detection And Ranging)、3次元映像表示装置などへの応用に向け、光ビームパターンを制御するデバイスの研究開発が進められている。特に、光の位相制御と多光束干渉を基本原理とする光フェーズドアレイ (Optical Phased Array; 以下、OPA) は、機械的な可動部なしに光ビームパターンを自在に制御できるため、小型・軽量で耐久性の高い光ビーム走査デバイスや可変焦点光制御デバイスなどへの応用が期待されている (例えば特許文献 1、非特許文献 1 参照)。

20

【0003】

図 17 は、光導波路を用いた一般的な OPA の構成を示す模式図である。OPA 101 は、基板 102 上に、光入力部 103 と、光分離部 104 と、マルチチャネル光導波路 105 と、を備えている。ここでは、一例として、マルチチャネル光導波路 105 と光出力部 107 のチャネル数 n を 8 としている。マルチチャネル光導波路 105 は、チャネルごとに個別の位相制御部 110 に接続されており、各光導波路 106 の先端は、光出力部 107 として用いられる。なお、図 17 では、光導波路 106 として光導波路コアのみ図示しており、コア周囲のクラッド層の図示を省略している。

30

【0004】

OPA 101 の光分離部 104 には、入射光を 8 本の光導波路 106 からなるマルチチャネル光導波路 105 に光を分配するために、 1×2 マルチモード干渉 (Multi-Mode Interference; MMI) 光スプリッタ 20 が 7 個配置されている。 1×2 MMI 光スプリッタ 20 は、1 つの入射光を 2 つの光導波路に分配する素子である。チャネル数 n が例えば 16 である場合、16 本のマルチチャネル光導波路に分配するには、 1×2 MMI 光スプリッタ 20 を 15 個接続して配置すればよい。また、1 つの入射光を 2 より多い N 本の光導波路に分配する光分配素子として、 $1 \times N$ MMI 光スプリッタやスターカブラなどを用いることも可能である。

40

【0005】

OPA 101 の位相制御部 110 には、外部からの電圧印加あるいはヒーター電極の通電に伴うジュール加熱などにより屈折率が変化する材料が使用される。このような材料には、例えば電気光学 (EO) 効果を有する材料 (以下、EO 材料と称す) や液晶 (LC) 材料、熱光学 (TO) 効果を有する材料 (以下、TO 材料と称す) などが従来利用されている。

【0006】

OPA の基本動作は、入力光を光分離部 104 によりマルチチャネル光導波路 105 へ分配し、チャネルごとの光位相を位相制御部 110 により制御し、光出力部 107 より出射された複数の光の回折・干渉によって光ビームパターンを形成するものである (例えば

50

非特許文献2参照)。OPAでは光導波路の出力端における光位相分布を適切に選ぶことにより、出力される光ビームのパターンを自在に制御することが可能である。特に収束・発散制御による焦点可変は情報取得や撮像・表示、工業用レーザーなどへの応用が期待できる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【文献】米国特許第5093740号明細書

【非特許文献】

【0008】

【文献】Paul F. McManamon, et al., "A Review of Phased Array Steering for Narrow-Band Electrooptical Systems", Proceedings of the IEEE, Vol.97, Issue: 6, June 2009, p.1078-1096

【文献】平野芳邦、外7名、「電気光学ポリマーを用いた4 μ mピッチ光フェーズドアレイによる偏向動作」、映像情報メディア学会誌、2019年、Vol.73, No.2, pp.392-396

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

OPAでは、光導波路を通過する光の位相が位相制御部により電氣的に制御される。したがって、図17の構成のように1つの出力光導波路106に対して1つの位相制御部110が接続される従来の構成では、チャンネル数の増加に伴って位相制御部110の個数が増加し、制御回路の大規模化や消費電力増大の原因となる。

【0010】

本発明は、以上のような問題点に鑑みてなされたものであり、消費電力を低減できる光ビーム収束・発散制御デバイスを提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

前記課題を解決するために、本発明に係る光ビーム収束・発散制御デバイスは、1つの光入力部と、光出力部のチャンネル数と同数の光導波路が並列配置されたマルチチャンネル光導波路と、前記光入力部から入力する光を前記光導波路に分配する光分離部と、印加電圧もしくは電流供給により光の位相を制御する位相制御部と、を備え、前記光分離部は、1入力3出力の少なくとも1つの光分配素子と、前記光分配素子の1出力から出力される光を2つの光導波路に分配する1つのスプリッタと、を備え、前記光分配素子の1出力と前記スプリッタとの接続部に位相制御部が配置されており、前記光出力部のチャンネル数を偶数の所定値 n として、4以上 n 以下の偶数を変数 N としたとき、前記光分配素子は、 N 本の光導波路の光強度を有する光を入力して3つに分岐して出力する素子であって、 $1 \times N$ MMI光スプリッタと、 $(N - 2) \times 1$ MMI光コンバイナとを近接配置して構成されており、かつ、前記光分配素子の3出力のうちの一側の出力端、中央の出力端、他側の出力端の光強度比は、 $1 : (N - 2) : 1$ であることとした。

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、位相制御部の個数を光出力部のチャンネル数の半分よりも少なくして従来よりも位相制御部の電極の総面積を削減できるので、消費電力を低減できる光ビーム収束・発散制御デバイスを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスの構成を示す模式図である。

【図2】本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスの一部省略して光分離部を模式的に示す平面図である。

10

20

30

40

50

【図 3】図 2 における B の領域の X Y 平面に平行な断面図である。

【図 4】本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスの出力する光ビームの模式図であり、(a) は収束、(b) は発散をそれぞれ示している。

【図 5】図 1 で使用する 1 : 6 : 1 光分配素子を模式的に示す平面図である。

【図 6】図 5 に示す光分配素子の構成要素に等価な光部品を模式的に示す平面図であって、(a) は 1 × 8 M M I 光スプリッタ、(b) は 6 × 1 M M I 光コンバイナをそれぞれ示している。

【図 7】図 1 で使用する光分配素子を模式的に示す平面図であって、(a) は 1 : 4 : 1 光分配素子、(b) は 1 : 2 : 1 光分配素子をそれぞれ示している。

【図 8】図 2 における B の領域の Y Z 平面に平行な断面図であって、(a) は電極配置の一例、(b) は電極配置の他の例をそれぞれ示している。

10

【図 9】電極をコア側面に配置した T E モードの偏光を用いる場合の変形例の断面図である。

【図 1 0】本発明の変形例を模式的に示す平面図であって、(a) は 2 段の光分配素子を持つ例、(b) は 1 段の光分配素子を持つ例をそれぞれ示している。

【図 1 1】本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスのシミュレーション結果を示す俯瞰図である。

【図 1 2】本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスのシミュレーション結果（実験 1）を示す図である。

【図 1 3】本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスのシミュレーション結果（実験 2）を示す図である。

20

【図 1 4】本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスのシミュレーション結果（実験 3）を示す図である。

【図 1 5】本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスのシミュレーション結果（実験 4）を示す図である。

【図 1 6】本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスのシミュレーション結果（実験 5）を示す図である。

【図 1 7】従来の光フェーズドアレイの構成を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 4 】

[光ビーム収束・発散制御デバイスの構成]

30

まず、光ビーム収束・発散制御デバイスの構成について図面を参照して説明する。なお、各図面に示される部材のサイズや位置関係は、説明を明確にするため誇張していることがある。また、図 1 では、光導波路コアのみ図示しており、コア周囲のクラッド層の図示を省略している。

【 0 0 1 5 】

図 1 に示すように、光ビーム収束・発散制御デバイス 1 は、基板 2 上に、光導波路である 1 つの光入力部 3 と、光導波路の端部である光出力部 7 のチャネル数と同数の光導波路 6 が並列配置されたマルチチャネル光導波路 5 と、光入力部 3 から入力する光を光導波路 6 に分配する光分離部 4 と、位相制御部 1 0 と、を備えている。位相制御部 1 0 は、印加電圧もしくは電流供給により光の位相を制御する。すなわち、位相制御部 1 0 は、光導波路 6 の入出力面と直交しかつ対向する面それぞれに電極を備え、電極間の電界により光の位相を制御する、もしくは光導波路 6 の入出力面と直交する面に電極を備え、電極への電流供給に伴って発生するジュール熱により光の位相を制御する。光分離部 4 は、1 入力 3 出力の少なくとも 1 つの光分配素子 3 0 と、1 つのスプリッタ 2 0 と、を備えている。スプリッタ 2 0 は、光分配素子 3 0 C の 1 出力から出力される光を 2 つの光導波路 6 に分配する。光分配素子 3 0 C の 1 出力とスプリッタ 2 0 との接続部に位相制御部 1 0 C が配置されている。

40

【 0 0 1 6 】

光出力部 7 のチャネル数と光分配素子 3 0 の入力及び出力について一般化すると、光出力部 7 のチャネル数を偶数の所定値 n として、4 以上 n 以下の偶数を変数 N としたとき、

50

光分配素子 30 は、 N 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を入力して、 $(N - 2)$ 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を 1 つと、1 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を 2 つの、合計 3 つに分岐して出力する素子であり、 $(N - 2)$ 本分の光導波路 6 の光強度を有する光が、位相制御部 10 に出力されることが好ましい。

そして、光分配素子 30 は、 $1 \times N$ MMI 光スプリッタと、 $(N - 2) \times 1$ MMI 光コンバイナとを近接配置して構成されており、かつ、光分配素子 30 の 3 出力のうちの一側の出力端、中央の出力端、他側の出力端の光強度比は、 $1 : (N - 2) : 1$ であることが好ましい。

【0017】

図 1 では、一例として図 17 と対比させるため、マルチチャネル光導波路 5 のチャネル数 n を 8 としている。この場合、前記変数 N は、8 または 6 または 4 となる。

10

光分配素子 30 A は、8 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を入力して 3 つに分岐して出力する素子であって、 1×8 MMI 光スプリッタと、 6×1 MMI 光コンバイナとを近接配置して構成されている。

光分配素子 30 B は、6 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を入力して 3 つに分岐して出力する素子であって、 1×6 MMI 光スプリッタと、 4×1 MMI 光コンバイナとを近接配置して構成されている。

光分配素子 30 C は、4 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を入力して 3 つに分岐して出力する素子であって、 1×4 MMI 光スプリッタと、 2×1 MMI 光コンバイナとを近接配置して構成されている。

20

【0018】

また、 N の値が 2 つずつ異なる複数の光分配素子 30 が、光入力側から N の大きい順に縦列に配置され、 N の大きい側の光分配素子の中央の出力端と、 N の小さい側の光分配素子の入力との接続部に、位相制御部 10 が配置されていることが好ましい。

【0019】

光分配素子 30 は、 N ($N = 4, 6, 8$ のいずれか) 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を入力して 3 つに分岐して出力する素子である。図 1 に示す例では、光分配素子 30 A は 8 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を入力して 3 つに分岐し、光分配素子 30 B は 6 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を入力して 3 つに分岐し、光分配素子 30 C は 4 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を入力して 3 つに分岐する。すなわち、光ビーム収束・発散制御デバイス 1 には、 N の値が 2 つずつ異なる複数の光分配素子 30 A, 30 B, 30 C が、光入力側から N の大きい順に縦列に配置されている。そして、 N の大きい側の光分配素子の中央の出力端と、 N の小さい側の光分配素子の入力との接続部に、位相制御部 10 A, 10 B がそれぞれ配置されている。ここでは、光分配素子 30 A の中央の出力端と、光分配素子 30 B の入力との接続部に位相制御部 10 A が配置されており、光分配素子 30 B の中央の出力端と、光分配素子 30 C の入力との接続部に位相制御部 10 B が配置されている。

30

【0020】

[各部の構成例]

以下、各部の構成例について説明する。なお、光分配素子を区別しない場合、単に光分配素子 30 と表記し、また、位相制御部を区別しない場合、単に位相制御部 10 と表記する。

40

【0021】

基板 2 は、様々な材料を用いて形成することができる。基板材料としては、シリコン基板のほか、ソーダガラスやパイレックス（登録商標）、溶解石英、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3)、タンタル酸リチウム (LiTaO_3)、サファイア (Al_2O_3) 等を用いてもよい。基板 2 の一方の面には、光入力部 3 と、光分離部 4 と、複数の電極線 8 と、が形成されている。

【0022】

光入力部 3 は、外部の光源から光を光分離部 4 へ入射する光導波路から形成される。光

50

源としては、レーザー光源や発光ダイオード（ＬＥＤ）等を適用することができる。光ビーム収束・発散制御デバイス１には、さらに必要に応じて、光源と光入力部３との間に、ボールレンズやシリンドリカルレンズ等を備えるようにしてもよい。

【００２３】

光出力部７は、光導波路６の端部であって、位相が制御された光を外部空間へ放射するものであり、光導波路の幅方向に並設されている。それぞれの光出力部７から放射された光は、それぞれの光位相の関係によって決まる干渉パターンを形成する。なお、光出力部７から出力する光ビームを上方に出射するために、光導波路に回折格子をさらに設けるようにしてもよい。さらに必要に応じて、光出力部７の外部かつ放射された光の照射範囲内に、ボールレンズやシリンドリカルレンズ等を備えるようにしてもよい。

10

【００２４】

光導波路６は、コアとクラッドから形成され、コアはクラッドに比較して屈折率が高い。位相制御部１０の光導波路を形成するコアの材料は、外部信号の印加により屈折率が変化する材料である。印加電圧によって屈折率が変化するＬＣ材料やＥＯ材料、あるいはヒーター電極の通電に伴うジュール加熱によって屈折率が変化するＴＯ材料が利用できる。位相制御部１０のコアの材料には、ＥＯ効果を有する LiNbO_3 や LiTaO_3 などの無機物のほか、ＥＯ効果を有するポリマー材料、あるいはＥＯ効果を有する色素を混合したポリマー材料を用いることができる。位相制御部１０以外の光導波路コアの材料には、酸化チタンなどの無機物のほか、ＥＯ効果を有さない一般的なポリマー材料を用いることができる。クラッドをなす誘電体材料には、酸化シリコン、五酸化タンタル、五酸化ニオブなどの無機誘電体材料に加え、ＰＭＭＡ（ポリメチルメタクリレート）等の有機ポリマー材料やＳＵ－８等のエポキシ樹脂を適用できる。コア材料やクラッド材料は、光導波路の全体を通じて同じ材料でもよいし、各機能部に応じた異なる材料を用いるようにしてもよい。

20

【００２５】

光分離部４は、光入力部３を導波した光を、マルチチャネル光導波路５の各光導波路６に分配するものである。光分離部４は、入力光の強度を各光導波路６に等分配する。マルチチャネル光導波路５には光出力部７のチャネル数と同数の８本の光導波路６が並列配置されている。ここでは、図２において手前側から順に、チャネル ch_0 、 ch_1 、 ch_2 、 ch_3 、 ch_4 、 ch_5 、 ch_6 、 ch_7 とする。なお、光導波路６は、シングルモードで光の伝搬を行うことを前提としている。

30

【００２６】

光分離部４の光分配素子３０Ａは、光入力部３に接続されている。光分配素子３０Ａは、１つの入射光を光強度比１：６：１の３つに分配するものである。光分配素子３０Ａを、以下、１：６：１光分配素子３０Ａと称す。光分配素子３０Ａは、図５に示すように、入力端３１と、一側の出力端３２と、中央の出力端３３と、他側の出力端３４と、を備える。

【００２７】

ここでは、光入力部３が入力端３１に接続されている。一側の出力端３２から伸びる出力光導波路は、チャネル ch_7 の光導波路６を構成している。他側の出力端３４から伸びる出力光導波路は、チャネル ch_0 の光導波路６を構成している。中央の出力端３３から伸びる出力光導波路は、１：６：１光分配素子３０Ａの出力光導波路のうち強度が最大であり、これを以下、６／８出力光導波路６と称す。この６／８出力光導波路６には、図２に示すように光分配素子３０Ｂが接続されている。

40

【００２８】

光分配素子３０Ｂは、１つの入射光を光強度比１：４：１の３つに分配するものである。光分配素子３０Ｂを、以下、１：４：１光分配素子３０Ｂと称す。１：４：１光分配素子３０Ｂの出力光導波路のうち強度が最大のものを、以下、４／６出力光導波路６と称す。この４／６出力光導波路６に、光分配素子３０Ｃが接続されている。光分配素子３０Ｃは、１つの入射光を光強度比１：２：１の３つに分配するものである。光分配素子３０Ｃ

50

を、以下、1 : 2 : 1 光分配素子 30C と称す。1 : 2 : 1 光分配素子 30C の出力光導波路のうち強度が最大のを、以下、2 / 4 出力光導波路 6 と称す。この 2 / 4 出力光導波路 6 に、1 × 2 MMI 光スプリッタ 20 が接続されている。

【0029】

6 / 8 出力光導波路には位相制御部 10A が設けられている。位相制御部 10A を以下、6 / 8 位相制御部 10A と称す。

4 / 6 出力光導波路には位相制御部 10B が設けられている。位相制御部 10B を以下、4 / 6 位相制御部 10B と称す。

2 / 4 出力光導波路には位相制御部 10C が設けられている。位相制御部 10C を以下、2 / 4 位相制御部 10C と称す。

なお、各位相制御部 10 は、図 17 に示す OPA 101 に備わる位相制御部 110 と同様の構造であり、電極面積も等しいものとする。

【0030】

位相制御部 10 は、外部印加電圧等で生じる電界、あるいは電流供給により発生するジュール熱により屈折率が変化する材料を含んでいる。位相制御部 10 は、図 1 に示すように電極線 8 を介して送られる電気信号によって光導波路を形成するコアの屈折率を変化させる。つまり、位相制御部 10 は、電極線 8 から送られる電気信号によって、位相制御部 10 内を伝搬する光の位相が制御可能になっている。外部印加電圧で生じる電界により屈折率が変化する材料を含む位相制御部 10 には、電極（下部電極 11、上部電極 12 : 図 3 参照）が設けられている点が光出力部 7 等の光導波路とは異なっている。電流供給に伴うジュール熱により屈折率が変化する材料を含む位相制御部 10 には、図 3 における下部電極 11 もしくは上部電極 12 のうち 1 つないしは 2 つが設けられている。外部印加電圧で生じる電界により屈折率が変化する材料を含む位相制御部 10 の電極配置においては、電圧印加により生じる基板 2 と垂直な方向の電界成分の分布により屈折率分布が変化する。このため本構成例では、伝播する光として電界の振幅方向が基板 2 と垂直な方向である TM (Transverse Magnetic) モードの偏光を用いる。ただし、後記するように電極をコアの側面に配置し、TE (Transverse Electric) モードの偏光を用いてもよい。

【0031】

電極の材料としては、金、銀、銅、ニッケル、アルミニウム、クロムなどの金属、もしくは金属酸化物や窒化物が好適である。

複数の電極線 8 は、各位相制御部 10 の電極にそれぞれ電気的に接続されている。電極線 8 の材料としては、例えば、Al、Cu、Au、Ti、Cr などの金属を用いることができる。電極線 8 を透明電極としてもよく、その場合、材料としては、IZO (Indium Zinc Oxide : インジウム亜鉛酸化物) や ITO (Indium Tin Oxide : インジウム - スズ酸化物) などを挙げることができる。

【0032】

ここで、位相制御部 10 の動作について、EO 材料の一つである EO ポリマーをコアに適用した光導波路を例に挙げて説明する。外部電界 E を与えたとき、EO ポリマーの屈折率 n は、外部電圧印加のなき場合の屈折率 n_0 に対して、次の式 (1) にしたがって変化する。

$$n = n_0 - 0.5 r_{33} n^3 E \quad \dots \text{式 (1)}$$

この現象を EO 効果 (ポッケルス効果) と呼び、屈折率変化の大きさを示す物性値 r_{33} を EO 係数と呼ぶ。

【0033】

図 3 は、EO ポリマーをコア 61 に、これよりも屈折率の低い材料をクラッド 62 に適用した光導波路 6 の位相制御部 10 における断面構造の一例である。図示するように、位相制御部 10 の下部電極 11 および上部電極 12 は電極線 8 を介して波形発生器 81 に接続されている。光ビーム収束・発散制御デバイス 1 の駆動時には、波形発生器 81 が、位相制御部 10 ごとに定められた波形の駆動電圧を該当の位相制御部 10 に印加する。上部電極 12 と下部電極 11 との間に電位差を与えると、コア 61 に電界が生じるため、E

10

20

30

40

50

〇効果によってコア 6 1 の屈折率が変化する。長さが L である位相制御部 1 0 に入射した波長 λ の光の位相は、位相制御部 1 0 を通過することにより、外部電圧印加のなき場合には $2\pi n_0 L / \lambda$ だけ変化する。これに対し、外部電圧により電界 E が生じたとき、光の位相は $2\pi (n_0 - 0.5 r_{33} n^3 E) L / \lambda$ だけ変化する。したがって、外部電圧の大きさによる位相変化量の違いは $\pi r_{33} n^3 E L / \lambda$ であり、これを用いることで、位相制御部 1 0 による光位相の制御が可能である。たとえば全ての位相制御部 1 0 への入射光の位相が同一であるとき、隣接する位相制御部 1 0 の電界が A だけ異なるように印加電圧を選ぶことにより、隣接する光出力部 7 における光の位相差 F を次の式 (2) で設定することができる。

$$F = \pi r_{33} n^3 A L / \lambda \quad \dots \text{式 (2)}$$

10

【 0 0 3 4 】

[光ビーム収束・発散制御デバイスの動作]

次に、光ビーム収束・発散制御デバイス 1 による収束・発散の動作を説明する。

図 1 および図 2 に示す光ビーム収束・発散制御デバイス 1 において、チャンネル $c h 0$ を通る光の光出力部 7 における位相と、チャンネル $c h 7$ を通る光の光出力部 7 における位相とは、等しい。

同様に、チャンネル $c h 1$ を通る光の光出力部 7 における位相と、チャンネル $c h 6$ を通る光の光出力部 7 における位相とは、等しい。

また、チャンネル $c h 2$ を通る光の光出力部 7 における位相と、チャンネル $c h 5$ を通る光の光出力部 7 における位相とは、等しい。

20

さらに、チャンネル $c h 3$ を通る光の光出力部 7 における位相と、チャンネル $c h 4$ を通る光の光出力部 7 における位相とは、等しい。

【 0 0 3 5 】

図 2 に示す 1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A の最大強度を出力する 6 / 8 出力光導波路 6 に設けた 6 / 8 位相制御部 1 0 A を動作させたとき、その作用は 1 : 4 : 1 光分配素子 3 0 B に入射する光位相に影響を与え、チャンネル $c h 0$, $c h 7$ をそれぞれ通る光の位相に影響を与えない。

【 0 0 3 6 】

また、図 2 に示す 1 : 4 : 1 光分配素子 3 0 B の最大強度を出力する 4 / 6 出力光導波路 6 に設けた 4 / 6 位相制御部 1 0 B を動作させたとき、その作用は 1 : 2 : 1 光分配素子 3 0 C に入射する光位相に影響を与え、チャンネル $c h 0$, $c h 7$ 及びチャンネル $c h 1$, $c h 6$ をそれぞれ通る光の位相に影響を与えない。

30

【 0 0 3 7 】

また、図 2 に示す 1 : 2 : 1 光分配素子 3 0 C の最大強度を出力する 2 / 4 出力光導波路 6 に設けた 2 / 4 位相制御部 1 0 C を動作させたとき、その作用は $1 \times 2 \text{ M M I}$ 光スプリッタ 2 0 に入射する光位相に影響を与え、チャンネル $c h 0$, $c h 7$ 及びチャンネル $c h 1$, $c h 6$ 並びにチャンネル $c h 2$, $c h 5$ をそれぞれ通る光の位相に影響を与えない。

【 0 0 3 8 】

したがって、光ビーム収束・発散制御デバイス 1 において、光出力部 7 におけるチャンネル $c h 0$, $c h 7$ の光位相に対し、チャンネル $c h 1$, $c h 6$ の光位相は 6 / 8 位相制御部 1 0 A により制御できる。

40

また、光出力部 7 におけるチャンネル $c h 1$, $c h 6$ の光位相に対し、チャンネル $c h 2$, $c h 5$ の光位相は 4 / 6 位相制御部 1 0 B により制御できる。

さらに、光出力部 7 におけるチャンネル $c h 2$, $c h 5$ の光位相に対し、チャンネル $c h 3$, $c h 4$ の光位相は 2 / 4 位相制御部 1 0 C により制御できる。

【 0 0 3 9 】

そのため、図 4 (a) および図 4 (b) に示す光ビームの収束・発散制御が可能である。具体的には、チャンネル $c h 0$, $c h 1$, $c h 2$, $c h 3$ (適宜図 2 参照) の互いに隣接する光出力部 7 における位相差が $- F$ であるとき、且つチャンネル $c h 4$, $c h 5$, $c h 6$, $c h 7$ の互いに隣接する光出力部 7 における位相差が $+ F$ であるとき、且つ、チャンネル

50

c h 3 , c h 4 の光出力部 7 における位相差が 0 であるときに、光ビームの波面は図 4 (a) に示す収束波面となり、光ビームは収束光となる。なお、F は、前記した式 (2) で表される。

【 0 0 4 0 】

一方、チャンネル c h 0 , c h 1 , c h 2 , c h 3 の互いに隣接する光出力部 7 の位相差が + F であるとき、且つ、チャンネル c h 4 , c h 5 , c h 6 , c h 7 の互いに隣接する光出力部 7 の位相差が - F であるとき、且つ、チャンネル c h 3 , c h 4 の光出力部 7 における位相差が 0 であるときに、光ビームの波面は図 4 (b) に示す発散波面となり、光ビームは発散光となる。

【 0 0 4 1 】

また、例えば、基準とするチャンネル c h 0 , c h 7 の光位相に比べて、チャンネル c h 1 , c h 6 の光位相を F 1 だけ変化させ、且つ、チャンネル c h 2 , c h 5 の光位相を F 2 だけ変化させ、且つ、チャンネル c h 3 , c h 4 の光位相を F 3 だけ変化させたい場合には、次のように設定すればよい。すなわち、6 / 8 位相制御部 1 0 A による位相制御量を F 1 に設定し、且つ、4 / 6 位相制御部 1 0 B による位相制御量を (F 2 - F 1) に設定し、且つ、2 / 4 位相制御部 1 0 C による位相制御量を (F 3 - F 2) とすれば、所望の位相制御が実現できる。

光ビーム収束・発散制御デバイス 1 によれば、光出力部 7 のチャンネル数 n の光ビームの出力は、n / 2 個より少ない位相制御部 1 0 に電圧印加することで実現されるので、図 1 7 のマルチチャンネル光導波路 1 0 5 と比べて、半分より少ない消費電力を実現する効果を奏することができる。

【 0 0 4 2 】

光ビーム収束・発散制御デバイス 1 によれば、光出力部 7 のチャンネル数 n の光ビームの出力は、n / 2 個より少ない位相制御部 1 0 に電圧印加することで実現される。この結果、光ビーム収束・発散制御デバイス 1 は、図 1 7 のようにマルチチャンネル光導波路 1 0 5 に個別の位相制御部 1 1 0 を有する従来の O P A 1 0 1 に比べて、半分より少ない消費電力を実現する効果を奏する。

【 0 0 4 3 】

[光分配素子の構造の設計例]

次に、光ビーム収束・発散制御デバイス 1 に用いる光分配素子 3 0 の構造について図 5 に示す 1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A を例にとって説明する。

【 0 0 4 4 】

図 5 の 1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A は、1 x 8 スプリッタ部 4 0 A と、6 x 1 コンバイナ部 5 0 A と、を隙間なく配置して備えている。

1 x 8 スプリッタ部 4 0 A は、幅 Ws8 (= po x 8)、長さ Ls8 なる光導波路である。

6 x 1 コンバイナ部 5 0 A は、幅 Wc6 (= po x 6)、長さ Lc6 なる光導波路である。

1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A には、入力部として、1 x 8 スプリッタ部 4 0 A に幅 Wc の光導波路 (光入力部 3) が接続されている。

1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A には、出力部として、1 x 8 スプリッタ部 4 0 A に 2 本の光導波路 6 , 6 が接続されており、且つ、1 x 6 コンバイナ部に 1 本の光導波路 6 が接続されている。

【 0 0 4 5 】

なお、Ws8、Ls8 などのアルファベット 2 文字と数字 1 文字を組み合わせた符号においてアルファベットの L は長さ、W は幅、s はスプリッタ、c はコンバイナを意味しており、数字は符号 po (Output Pitch) で示す幅の係数を意味する。なお、po の具体例については後記する。

【 0 0 4 6 】

1 x 8 スプリッタ部 4 0 A は、幅の狭い光導波路に対して、幅が広い光導波路を接続したときに、幅の広い光導波路内で生じる現象であるマルチモード干渉に基づき、入力部から長さ Ls8 の地点に 8 個の光強度ピークが発生するように設計されたマルチモード光導波

10

20

30

40

50

路である。

【 0 0 4 7 】

1 × 8 スプリッタ部 4 0 A は、図 6 (a) に示す 1 × 8 M M I 光スプリッタの構成部品と等価な部品である。1 × 8 M M I 光スプリッタは、1 つの光導波路を入力部とし、且つ、8 つの光導波路を等しい間隔 (出力ピッチ) p_o で配置した出力部を有するとき、入力部より入射した光を 8 つの光導波路に分配する機能を有している。

【 0 0 4 8 】

図 6 (a) に示す 1 × 8 M M I 光スプリッタの設計においては、まず出力光導波路のピッチ (出力ピッチ) p_o と本数 N (この場合は $N = 8$) とによって、幅 $W_{s8} = 8 \times p_o$ を定める。そして、入力部から光を入射した際に 1 × 8 スプリッタ部 4 0 A 内に生じる光干渉パターンを、ビーム伝搬法などの数値シミュレーションによって求める。なお、光干渉パターンは解析式や近似式によって求めても構わない。得られる光干渉パターンは、伝搬長が特定の値と一致するとき、1 つもしくは複数の光強度ピークをつくり、幅方向の強度分布は入力光導波路の延長線上を中心とする対称なものとなる。幅方向における光強度ピークが 1 つに収束する伝搬長の $4 / 3$ 倍の長さを La_8 とすると、すなわち伝搬長が $3 La_8 / 4$ のとき光強度ピークが一点に収束すると、前記の特定の値は、長さ La_8 の $3 a / b$ 倍 (ただし a と b は整数) となることが理論的に知られている (例えば下記参考文献参照)。

(参考文献) 光導波路解析入門 pp.176-198

なお、上記の長さ La_8 は、図 6 (a) に示す 1 × 8 M M I 光スプリッタの長さ (L_{s8}) に関連付けられた長さを意味する。

【 0 0 4 9 】

前記の理論によって求めた長さ La_8 を用いることにより、1 × 8 スプリッタ部 4 0 A の長さ (L_{s8}) は、 $L_{s8} = 3 La_8 / 3 2$ の関係式によって決定される。なお、一般化した 1 × N スプリッタ部の設計において、出力ピッチ p_o や本数 N が異なるが、その場合も、それに合わせた長さ La の値を求めれば、1 × N スプリッタ部の長さを、 $3 La / (4 N)$ の関係式によって決定することが可能である。

【 0 0 5 0 】

例えば、図示しない 1 × 6 M M I 光スプリッタの設計や、図 7 (a) に示す 1 : 4 : 1 光分配素子 3 0 B に用いる 1 × 6 スプリッタ部 4 0 B の設計においては、幅方向における光強度ピークが一点に収束する伝搬長の $4 / 3$ 倍として長さ La_6 を求め、これを用いればよい。この場合、1 : 4 : 1 光分配素子 3 0 B の 1 × 6 スプリッタ部 4 0 B の長さ (L_{s6}) は、 $L_{s6} = 3 La_6 / 2 4$ の関係式によって決定することができる。なお、上記の長さ La_6 は、図示しない 1 × 6 M M I 光スプリッタの長さ (L_{s6}) に関連付けられた長さを意味する。

【 0 0 5 1 】

図 5 に戻って、1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A に用いる 6 × 1 コンバイナ部 5 0 A の長さ (L_{c6}) は、1 × 6 M M I 光スプリッタの設計で求めた長さ La_6 に基づいて決定する。具体的には、伝搬長が 1 × 6 M M I 光スプリッタの長さ (L_{s6}) と等しいときには、幅方向における光強度ピークが 6 個存在し、伝搬長が La_6 と等しいときには一点に収束することから、次の式 (3) で示される関係式とする。

$$L_{c6} = La_6 - L_{s6} \quad \dots \text{式 (3)}$$

この設計は、図 6 (b) に示す 6 × 1 M M I 光コンバイナを設計することと等価である。6 × 1 M M I 光コンバイナは、6 本の入力光導波路と 1 本の出力光導波路とを備えている。なお、6 × 1 M M I 光コンバイナの幅 (W_{c6}) には、 $W_{c6} = 6 \times p_o$ の関係がある。

【 0 0 5 2 】

上記のように決定された 1 × 8 M M I 光スプリッタと、6 × 1 M M I 光コンバイナとを、中心軸を一致させて近接配置することにより、1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A を構成することができる。

上記の設計を要約すると、1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A は、長さ La_8 に基づいて 1 × 8 スプリッタ部 4 0 A の長さ (L_{s8}) を求め、長さ La_6 に基づいて 6 × 1 コンバイナ部 5 0

Aの長さ(Lc6)を求め、これらを用いることによって設計される。

【0053】

同様に、図7(a)に示す1:4:1光分配素子30Bは、長さLa6に基づいて1×6スプリッタ部40Bの長さ(Ls6)を求め、長さLa4に基づいて4×1コンバイナ部50Bの長さ(Lc4)を求め、これらを用いることによって設計される。

さらに、図7(b)に示す1:2:1光分配素子30Cは、長さLa4に基づいて1×4スプリッタ部40Cの長さ(Ls4)を求め、長さLa2に基づいて2×1コンバイナ部50Cの長さ(Lc2)を求め、これらを用いることによって設計される。

なお、チャネル数が多い場合、1:(N-2):1光分配素子30は、長さLaNに基づいて1×Nスプリッタ部の長さ(LsN)を求め、長さ(La(N-2))に基づいて(N-2)×1コンバイナ部の長さ(Lc(N-2))を求めることで同様に設計される。

10

【0054】

例えば1:6:1光分配素子30Aには、1×8MMI光スプリッタと6×1MMI光コンバイナとをつなぐ導波路がなく、これらは一体で作られており、間をつなぐ導波路が存在しないことから光の損失が少なくなるメリットがある。同様に1:4:1光分配素子30Bは、1×6MMI光スプリッタと4×1MMI光コンバイナの組み合わせに比して光の損失が少ない。また、1:2:1光分配素子30Cは、1×4MMI光スプリッタと2×1MMI光コンバイナの組み合わせに比して光の損失が少ない。

【0055】

[変形例]

20

位相制御部10は、図3の断面図に示すように光導波路6を挟んで対向して配置された下部電極(第1電極)11および上部電極(第2電極)12を備えている。図3は、図2におけるBの領域のXY平面に平行な断面で切断した横断面図である。これに対して図2におけるBの領域のYZ平面に平行な断面で切断した縦断面図の一例を図8(a)に示す。図8(a)に示す例では、下部電極11と上部電極12とが、対向する方向において完全に重なっている。位相制御部10の電極配置は、これに限るものではなく、図8(b)に示すような電極配置でも構わない。図8(b)に示す例では、下部電極11と上部電極12とが対向する方向において重複する重複領域R3は、上部電極12が配置された領域R2よりも狭い領域であり、且つ、下部電極11が配置された領域R1よりも狭い領域である。また、図示を省略するが、重複領域R3は、下部電極11が配置された領域R1と同じ広さであり、且つ、上部電極12が配置された領域R2よりも狭い領域であってもよい。あるいは、重複領域R3は、上部電極12が配置された領域R2と同じ広さであり、且つ、下部電極11が配置された領域R1よりも狭い領域であっても構わない。これらのように、下部電極11と上部電極12とが対向する方向において重なる領域R3を狭くすることで、電力消費に実質的に寄与する電極面積を低減したことになる。ゆえに、消費電力のさらなる低減を実現することができる。

30

【0056】

位相制御部10の電極は、コアの上下方向に配置されるものに限らず、図9に示すようにコア61の側方に配置してもよい。図9は、図2におけるBの領域に対応した斜視図である。基板2の上に下部クラッドを介して電極11A、12Aおよびコア61が設けられ、電極11A、12Aおよびコア61の上に上部クラッドが設けられている。コア61の周囲のクラッド62Aは、電極11A、12Aの周囲の絶縁材料を兼ねている。なお、クラッドをなす誘電体材料と、電極11A、12Aの周囲の絶縁材料を別材料にしてもよい。図9に示す位相制御部10によれば、2つの電極11A、12Aがコア61を側方から挟み込むようにX軸方向に並んで配置されており、TEモードの偏光を用いることができる。図9には、電極11A、12Aおよびコア61の下面の位置は同じであり、電極11A、12Aの高さ(Y方向の長さ)は、コア61の高さ(Y方向の長さ)よりも低い形態を例示した。ただし、電極11A、12Aの位置や高さは、図示した形態に限定されるものではなく、コア61内の電界に基板2と並行な面内の成分があれば良い。例えば、電極11A、12Aの高さがコア61の高さと等しい、もしくは高くても良い。また、電極1

40

50

1 A、1 2 Aの下面の位置はコア 6 1の下面の位置と異なっても良い。さらに、2つの電極 1 1 A、1 2 Aの高さもしくは下面の位置は互いに異なっても良い。

なお、位相制御部 1 0の電極がコアの上下方向（Y方向）に配置される場合、電極の幅（X方向の長さ）をコアの幅より細くすることで、電極の幅とコアの幅が同じである場合に比べて、電力消費に実質的に寄与する電極面積を低減することができる。

【0057】

前記実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイス 1において、チャンネル数 n を 8 であるものとして説明したが、チャンネル数はこれに限らない。例えばチャンネル数 n を 6 にする場合、図 1 0（a）に示す光分離部 4 Bのように、2 段の光分配素子 3 0 B、3 0 C と、1つのスプリッタ 2 0 と、を備えていればよい。また、チャンネル数 n を 4 にして、図 1 0（b）に示す光分離部 4 Cのように、1 段の光分配素子 3 0 C と、1つのスプリッタ 2 0 と、を備える構成であっても収束・発散制御を行うことができる。また、4 段以上の光分配素子 3 0 を設けてもよく、チャンネル数 n を 8 以上の例えば 6 0 や 1 2 0 のようにしてもよい。なお、出力強度が低下する分は入力光の強度を増強して補うことができる。

【0058】

以上、本発明の実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスについて説明したが、本発明の趣旨はこれらの記載に限定されるものではなく、特許請求の範囲の記載に基づいて広く解釈されなければならない。また、これらの記載に基づいて種々変更、改変などしたのもも本発明の趣旨に含まれることはいうまでもない。

【実施例】

【0059】

チャンネル数 n を 8 とした場合の光ビーム収束・発散制御デバイス 1 の構成例について図 1 ～図 3 を参照（適宜図 5 ～図 7 参照）して説明する。

本実施例で用いる光導波路は、図 3 に示す断面構造を有する。作製においては、基板 2 としてシリコン基板を準備し、シリコン基板表面を焼成して厚さ $3\ \mu\text{m}$ の酸化シリコン層により被膜を形成する。そして、基板 2 の被膜の上に、位相制御部 1 0 のパターンに合わせて厚さ $0.1\ \mu\text{m}$ の導電性薄膜を形成して下部電極 1 1 を形成する。その上にクラッド 6 2（下部クラッド）となる厚さ $2.5\ \mu\text{m}$ の誘電体材料（屈折率 1.48）と、コア 6 1 となる厚さ $1.5\ \mu\text{m}$ の E O 材料（屈折率 1.62）を順次積層する。必要に応じて E O 材料の配向処理を行ったのち、E O 材料層を幅 $1.5\ \mu\text{m}$ の後記する光導波路パターンにエッチングする。光導波路パターンを形成したのち、その上にクラッド 6 2（上部クラッド）となる厚さ $2.5\ \mu\text{m}$ の誘電体材料（屈折率 1.48）を積層する。その上に、位相制御部 1 0 のパターンに合わせて厚さ $0.1\ \mu\text{m}$ の導電性材料で被覆し、上部電極 1 2 とする。

【0060】

なお、酸化シリコン層は形成せずともよい。また、上部電極 1 2 および下部電極 1 1 は、位相制御部 1 0 である光導波路にのみ配置されるが、位相制御部 1 0 以外の光導波路にも、上部電極 1 2 および下部電極 1 1 の片方のみが配置されても構わない。また、E O 材料を上部・下部クラッドのいずれか、もしくは両方に用いてもよいが、クラッド材料の屈折率はコア材料の屈折率に比して小さいものとする。また、コア材料に関し、位相制御部 1 0 以外の部分において、位相制御部 1 0 とは異なる誘電体材料を積層し、コアとしてパターンニングしてもよい。

【0061】

図 2 に示すように、光ビーム収束・発散制御デバイス 1 の光導波路のパターンは次のような接続関係を有している。すなわち、光入力部 3 となる光導波路には、1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A が接続されている。1 : 6 : 1 光分配素子 3 0 A には、マルチチャンネル光導波路 5 のチャンネル ch_0 、 ch_7 と、6 / 8 位相制御部 1 0 A が接続されている。6 / 8 位相制御部 1 0 A には 1 : 4 : 1 光分配素子 3 0 B が接続されている。1 : 4 : 1 光分配素子 3 0 B には、マルチチャンネル光導波路 5 のチャンネル ch_1 、 ch_6 と、4 / 6 位相制御部 1 0 B が接続されている。4 / 6 位相制御部 1 0 B には 1 : 2 : 1 光分配素子 3 0 C

が接続されている。1 : 2 : 1 光分配素子 30C には、マルチチャネル光導波路 5 のチャネル ch2, ch5 と、1 x 2 MMI 光スプリッタ 20 が接続されている。1 x 2 MMI 光スプリッタ 20 には、マルチチャネル光導波路 5 のチャネル ch3, ch4 が接続されている。

【0062】

光ビーム収束・発散制御デバイス 1 の各光部品のサイズは次の通りである。

光入力部 3 となる光導波路の長さは 100 μm 以上とした。

1 : 6 : 1 光分配素子 30 は、1 x 8 スプリッタ部 40A と、6 x 1 コンバイナ部 50A とを備えている。

1 x 8 スプリッタ部 40A のサイズは、幅 80 μm 、長さ 826 μm とした。

10

6 x 1 コンバイナ部 50A のサイズは、幅 60 μm 、長さ 3106 μm とした。

1 x 8 スプリッタ部 40A には、幅方向の両端から各 5 μm の位置を中心として、マルチチャネル光導波路のチャネル ch0, ch7 がそれぞれ接続される。

6 x 1 コンバイナ部 50A における幅方向の中心且つ長さ方向の終端部に、光導波路を介して長さ 0.1 mm の 6 / 8 位相制御部 10A が接続される。

【0063】

1 : 4 : 1 光分配素子 30B は、1 x 6 スプリッタ部 40B と、4 x 1 コンバイナ部 50B とを備えている。

1 x 6 スプリッタ部 40B のサイズは、幅 60 μm 、長さ 625 μm とした。

4 x 1 コンバイナ部 50B のサイズは、幅 40 μm 、長さ 1264 μm とした。

20

1 x 6 スプリッタ部 40B には、幅方向の両端から各 5 μm の位置を中心として、マルチチャネル光導波路のチャネル ch1, ch6 がそれぞれ接続される。

4 x 1 コンバイナ部 50B における幅方向の中心且つ長さ方向の終端部に、光導波路を介して長さ 0.1 mm の 4 / 6 位相制御部 10B が接続される。

【0064】

1 : 2 : 1 光分配素子 30C は、1 x 4 スプリッタ部 40C と、2 x 1 コンバイナ部 50C とを備えている。

1 x 4 スプリッタ部 40C のサイズは、幅 40 μm 、長さ 424 μm とした。

2 x 1 コンバイナ部 50C のサイズは、幅 20 μm 、長さ 222 μm とした。

1 x 4 スプリッタ部 40C には、幅方向の両端から各 5 μm の位置を中心として、マルチチャネル光導波路のチャネル ch2, ch5 がそれぞれ接続される。

30

2 x 1 コンバイナ部 50C における幅方向の中心且つ長さ方向の終端部に、光導波路を介して長さ 0.1 mm の 2 / 4 位相制御部 10C が接続される。

【0065】

1 x 2 MMI 光スプリッタ 20 のサイズは、幅 20 μm 、長さ 223 μm とした。

1 x 2 MMI 光スプリッタ 20 には、幅方向の中心から各 5 μm の位置を中心として、マルチチャネル光導波路のチャネル ch3, ch4 がそれぞれ接続される。

【0066】

6 / 8 位相制御部 10A と、4 / 6 位相制御部 10B と、2 / 4 位相制御部 10C は、同一の構造とした。位相制御部 10 のコア材料には EO 効果を有する色素を混合した EO ポリマーを使用した。EO ポリマーの屈折率は 1.62 であるが、EO ポリマーに 10 V の電圧を印加すると、色素の作用に基づく EO 効果によって屈折率が 1.618579 に変化するものとした。

40

【0067】

上記構造の光ビーム収束・発散制御デバイスについて行った数値シミュレーションについて図 11 を参照（適宜、図 1、図 2、図 3 および図 5 参照）して説明する。数値シミュレーションには、光学機器設計に実績のある、ビーム伝搬法シミュレーションソフトウェア OptiBPM（Optiwave 社製）を使用した。また、数値シミュレーションにける入射光は、波長 1.55 μm の CW（Continuous Wave）レーザー光とした。

【0068】

50

図 1 1 は、図 2 の平面図に対応したシミュレーション結果の俯瞰図であり、光導波路パターンを基板上方から見た場合の光振幅分布である。図 1 1 の横軸の単位は、縦軸の単位と 3 桁異なっている。なお、図面上のサイズは、前記した部品サイズと同じとは限らず誇張している場合がある。ここでは、光導波路を通る光の振幅（振幅強度）の数値をカラー化して示している。振幅強度 0 は、青（濃淡で示すときには最も淡い白）に対応している。振幅強度 0.391 は、赤（濃淡で示すときには最も濃い黒）に対応している。振幅強度の数値が高くなるにつれて色は青→緑→黄色→赤のように変化する（濃淡で示すときには白から黒へ徐々に変化する）。図 1 1 によれば、マルチチャネル光導波路へ光が分配・入力され、光出力部まで伝搬していることが分かる。

【0069】

10

図 1 1 の干渉縞において、横軸 Z の所定値のときに縦軸に沿って見てみると、光が強め合う箇所（ピーク）が光入力部側（左）に多数あり、それを横軸の値の大きくなる方向に沿って見てみると、ピークは 1 個ずつ減少していき、ピークの個数が 8 個になるところが、1×8 スプリッタ部 40A と 6×1 コンバイナ部 50A との境界になっている。あるいは、横軸 Z の値が、およそ $2.0 \times 10^3 \mu\text{m}$ の付近を縦軸に沿って見てみると、2 個のピークがあり、入力側（左）にたどっていくとピークの個数が 3 個、4 個、...、8 個となることが分かる。すなわち、1×8 スプリッタ部が 8 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を入力して、そのうち 6 本分の光導波路 6 の光強度を有する光を 6×1 コンバイナ部 50A に入力し、そこで 1 つにまとめて後段に出力するという設計どおりの様子が分かる。

【0070】

20

この数値シミュレーションでは、以下の実験 1～実験 5 を行い、上記構造の光ビーム収束・発散制御デバイスを伝搬した光の光出力部における位相分布によって収束・発散の制御性を確認した。

実験 1：位相制御部に電圧印加を行わない場合の光位相分布の確認

実験 2：1 つの位相制御部に電圧を印加した場合の光位相分布の確認

実験 3：全ての位相制御部に電圧を印加した場合の光位相分布の確認

実験 4：発散光となる光位相分布の確認

実験 5：収束光となる光位相分布の確認

【0071】

（実験 1）

30

図 1 2 は、位相制御部に電圧印加を行わない場合の光出力部における光導波路断面の光位相分布を示す図である。ここでは、光入力部における光位相を基準（0）とした相対位相値をカラー化して示している。相対位相値 - π は、青（濃淡で示すときには最も淡い白）に対応している。基準位相値（相対位相値 0）は、緑（濃淡で示すときにはグレー）に対応している。相対位相値 + π は、赤（濃淡で示すときには最も濃い黒）に対応している。また、図 1 2 において、等間隔で並ぶ 8 個の枠（Y 軸方向を長手方向とする矩形状の枠）は、8 チャネル分の光出力部の光導波路断面に相当する領域をそれぞれ示している。枠の下から 2.5 μm までの範囲の下部クラッドと、その上の 1.5 μm 厚のコアとが分かるように仕切り（水平の線）がついているが、その上の 2.5 μm 厚の上部クラッド部は図示を省略している。これらの枠の幅は、光導波路の幅（1.5 μm ）であり、前記した E O 材料層をエッチングにより幅 1.5 μm の光導波路パターンにすることに対応している。

40

【0072】

図 1 2 において、チャネル ch0, ch1, ch2, ch3 の相対位相は、それぞれ、-0.24, 1.24, -2.24, 2.69 である。また、チャネル ch4, ch5, ch6, ch7 の相対位相は、それぞれ、チャネル ch3, ch2, ch1, ch0 の相対位相と等しいことが示されている。言い換えると、全 8 チャネルの中央に対して対称な位相分布を光に持たせていることが分かる。

【0073】

（実験 2）

50

図 1 3 は、6 / 8 位相制御部 1 0 A に 1 0 . 3 V の電圧を印加した場合の光出力部における光導波路断面の光位相分布を示す図である。なお、図の表示方法は図 1 2 と同様である。図 1 3 において、チャンネル c h 0 , c h 1 , c h 2 , c h 3 の相対位相は、それぞれ、- 0 . 2 4 , - 0 . 2 4 , 2 . 4 6 , 1 . 1 2 である。また、チャンネル c h 4 , c h 5 , c h 6 , c h 7 の相対位相は、それぞれ、チャンネル c h 3 , c h 2 , c h 1 , c h 0 の相対位相と等しいことが示されている。図 1 3 により、図 1 2 と比べると、6 / 8 位相制御部 1 0 A への電圧印加によって、チャンネル c h 0 , h 7 を除くチャンネルの相対位相を制御することができ、チャンネル c h 0 , c h 1 , c h 0 , c h 7 を等位相にできることが示された。よって、6 / 8 位相制御部 1 0 A が設計通りに機能することが示された。

【 0 0 7 4 】

10

(実験 3)

図 1 4 は、6 / 8 位相制御部 1 0 A に 1 0 . 3 V の電圧を印加し、4 / 6 位相制御部 1 0 B に 7 . 7 V の電圧を印加し、2 / 4 位相制御部 1 0 C に 3 . 1 V の電圧を印加した場合の光出力部における光導波路断面の光位相分布を示す図である。なお、図の表示方法は図 1 2 と同様である。

図 1 4 において、チャンネル c h 0 ~ c h 7 の相対位相は全て - 0 . 2 4 である。図 1 4 により、6 / 8 位相制御部 1 0 A、4 / 6 位相制御部 1 0 B および 2 / 4 位相制御部 1 0 C への電圧印加によってチャンネル c h 0 ~ c h 7 の全チャンネルを等位相にでき、正面から平行光を出せることが示された。

【 0 0 7 5 】

20

(実験 4)

図 1 5 は、6 / 8 位相制御部 1 0 A に 1 1 . 3 V の電圧を印加し、4 / 6 位相制御部 1 0 B に 8 . 7 V の電圧を印加し、2 / 4 位相制御部 1 0 C に 4 . 1 V の電圧を印加した場合の光出力部における光導波路断面の光位相分布を示す図である。なお、図の表示方法は図 1 2 と同様である。図 1 5 において、チャンネル c h 0 , c h 1 , c h 2 , c h 3 の相対位相は、それぞれ、- 0 . 2 4 , 0 . 1 9 , 0 . 6 9 , 1 . 1 7 である。チャンネル c h 4 , c h 5 , c h 6 , c h 7 の相対位相は、それぞれ、チャンネル c h 3 , c h 2 , c h 1 , c h 0 の相対位相と等しい。これは、中央部分から外側に向かって位相が遅れ、中央部分の方が進んでいて中央に対して対称な位相分布を光に持たせたこと(図 4 (b) 参照)に相当する。図 1 5 により、チャンネル c h 0 ~ c h 7 の位相分布を発散波面にでき、発散光を出せることが示された。

30

【 0 0 7 6 】

(実験 5)

図 1 6 は、6 / 8 位相制御部 1 0 A に 9 . 3 V の電圧を印加し、4 / 6 位相制御部 1 0 B に 6 . 7 V の電圧を印加し、2 / 4 位相制御部 1 0 C に 2 . 1 V の電圧を印加した場合の光出力部における光導波路断面の光位相分布を示す図である。なお、図の表示方法は図 1 2 と同様である。図 1 6 において、チャンネル c h 0 , c h 1 , c h 2 , c h 3 の相対位相は、それぞれ、- 0 . 2 4 , - 0 . 6 8 , - 1 . 1 6 , - 1 . 6 3 である。また、チャンネル c h 4 , c h 5 , c h 6 , c h 7 の相対位相は、それぞれ、チャンネル c h 3 , c h 2 , c h 1 , c h 0 の相対位相と等しい。これは、中央部分から外側に向かって位相が進み、中央部分の方が遅れていて中央に対して対称な位相分布を光に持たせたこと(図 4 (a) 参照)に相当する。図 1 6 により、チャンネル c h 0 ~ c h 7 の位相分布を収束波面にでき、収束光を出せることが示された。

40

【 0 0 7 7 】

前記実験 3 ~ 5 に示した等位相波面、発散波面、収束波面を図 1 7 に示す O P A 1 0 1 により得るためには、チャンネル c h 0 ~ c h 7 に個別に備わる個別の位相制御部 1 1 0 で電圧印加を行うため、同一の条件であっても、2 倍の消費電力が必要である。

【 0 0 7 8 】

6 / 8 位相制御部 1 0 A は、図 1 7 の 6 個の位相制御部 1 1 0 で行う必要がある制御を単独で果たすことができる。

50

4 / 6 位相制御部 1 0 B は、図 1 7 の 4 個の位相制御部 1 1 0 で行う必要がある制御を単独で果たすことができる。

2 / 4 位相制御部 1 0 C は、図 1 7 の 2 個の位相制御部 1 1 0 で行う必要がある制御を単独で果たすことができる。

図 1 7 の O P A 1 0 1 が 8 個の位相制御部 1 1 0 を必要とするのに対し、上記構造の光ビーム収束・発散制御デバイスであれば、3 個の位相制御部 1 0 しか必要としないため、消費電力は 3 / 8 で済む。

【産業上の利用可能性】

【0079】

本実施形態に係る光ビーム収束・発散制御デバイスは、光フェーズドアレイ、小惑星探査機の母船とその衛星との通信に使うアンテナ等の空間光通信、車載用レーダーに使うビームスキャン装置、奥行センサ、レーダー、L i D A R、可視光ビームスキャン装置、立体ディスプレイ等、種々の光制御デバイスに幅広く利用することができる。

【符号の説明】

【0080】

1 光ビーム収束・発散制御デバイス

2 基板

3 光入力部

4 光分離部

5 マルチチャネル光導波路

6 光導波路

7 光出力部

8 電極線

1 0 位相制御部

1 0 A 6 / 8 位相制御部 (位相制御部)

1 0 B 4 / 6 位相制御部 (位相制御部)

1 0 C 2 / 4 位相制御部 (位相制御部)

1 1 下部電極 (第 1 電極)

1 1 A 電極 (第 1 電極)

1 2 上部電極 (第 2 電極)

1 2 A 電極 (第 1 電極)

2 0 1 × 2 M M I 光スプリッタ (スプリッタ)

3 0 光分配素子

3 0 A 1 : 6 : 1 光分配素子 (光分配素子)

3 0 B 1 : 4 : 1 光分配素子 (光分配素子)

3 0 C 1 : 2 : 1 光分配素子 (光分配素子)

3 1 入力端

3 2 一側の出力端

3 3 中央の出力端

3 4 他側の出力端

4 0 A 1 × 8 スプリッタ部

4 0 B 1 × 6 スプリッタ部

4 0 C 1 × 4 スプリッタ部

5 0 A 6 × 1 コンバイナ部

5 0 B 4 × 1 コンバイナ部

5 0 C 2 × 1 コンバイナ部

6 1 コア

6 2 , 6 2 A クラッド

10

20

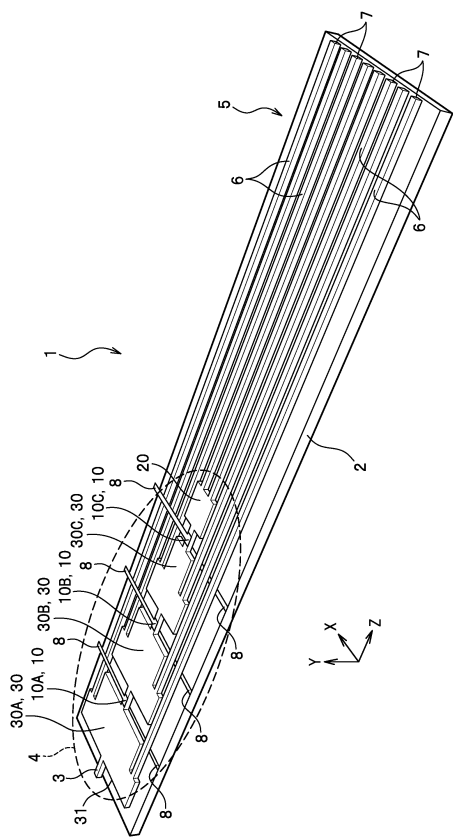
30

40

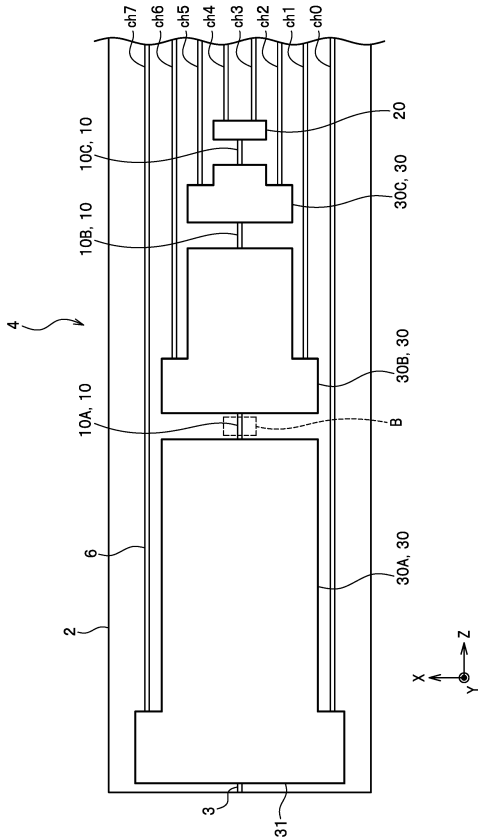
50

【図面】

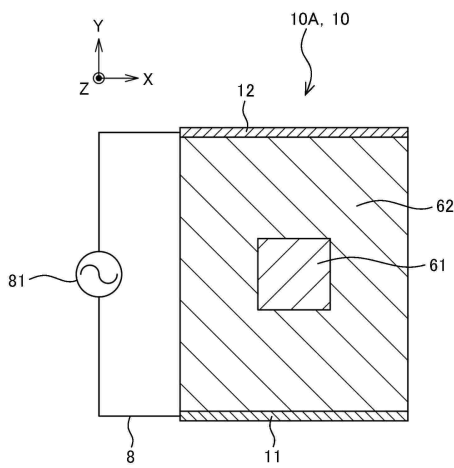
【図 1】



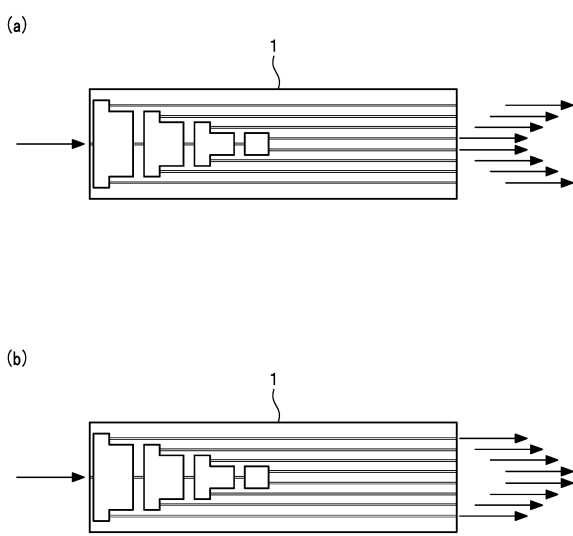
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

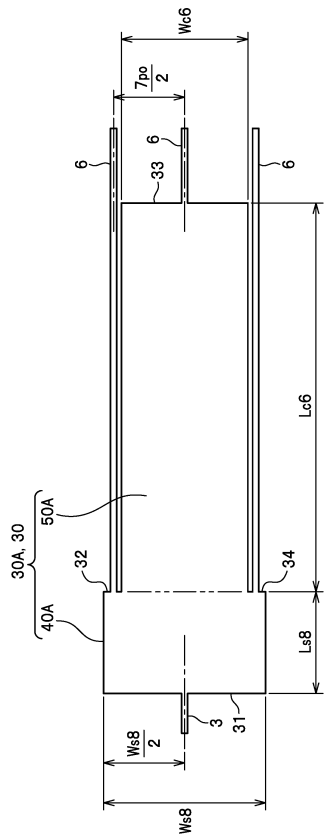
20

30

40

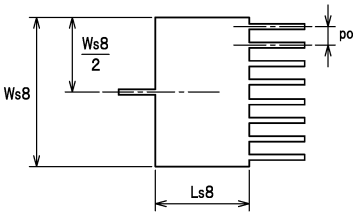
50

【図 5】



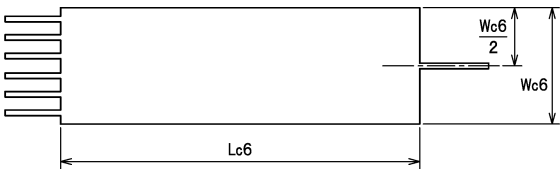
【図 6】

(a) 1×8 MMI光スプリッタ



10

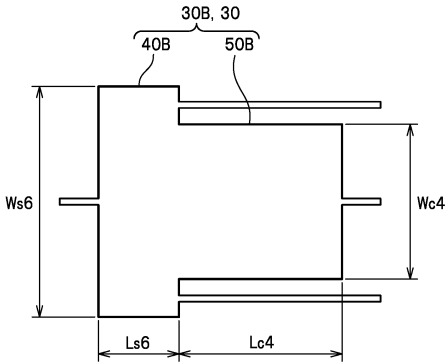
(b) 6×1 MMI光コンパイナ



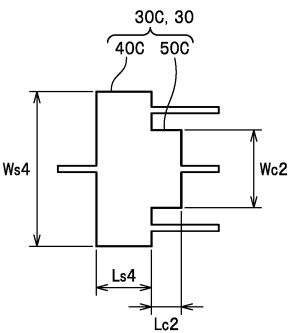
20

【図 7】

(a)

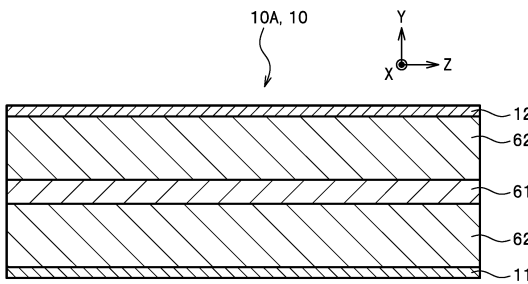


(b)



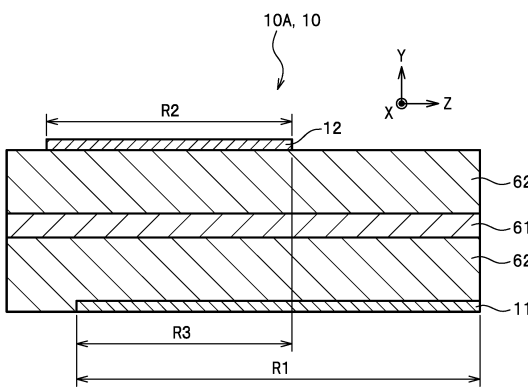
【図 8】

(a)



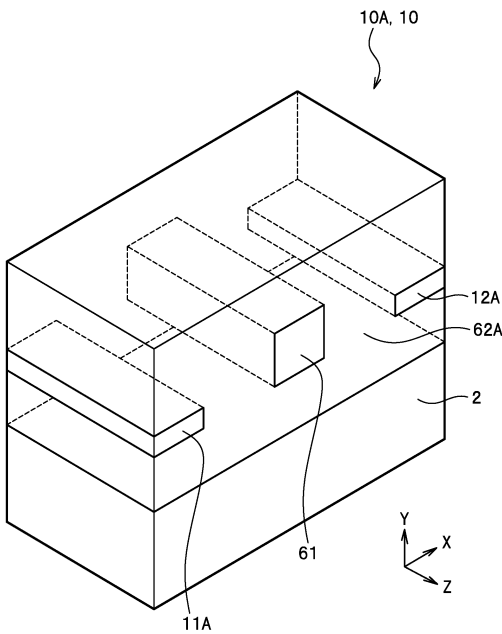
30

(b)

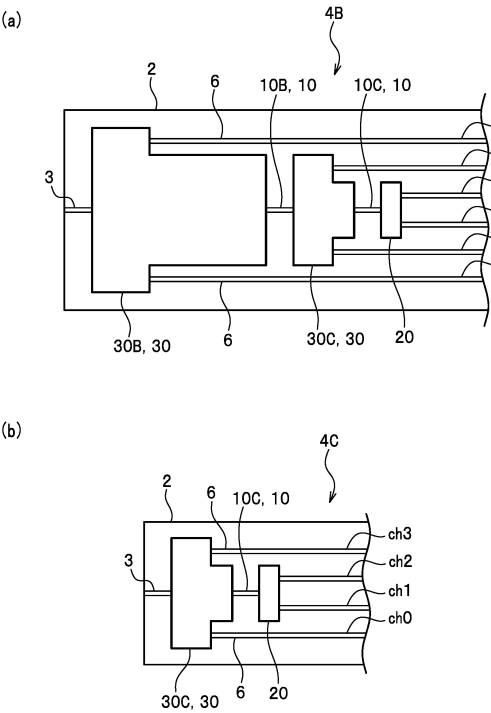


40

【図 9】



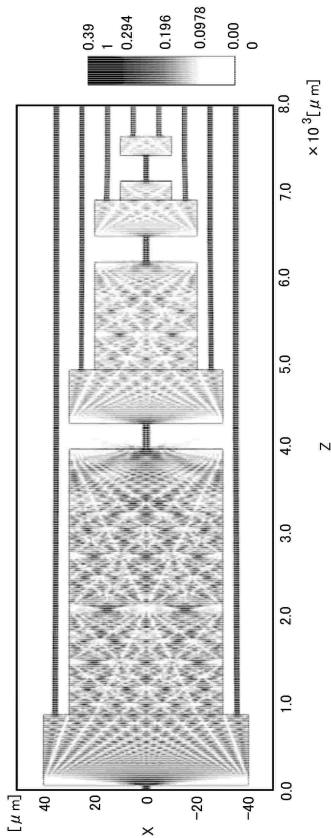
【図 10】



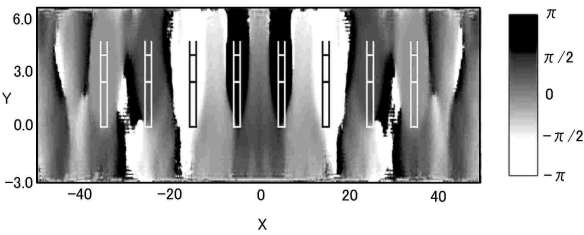
10

20

【図 11】



【図 12】



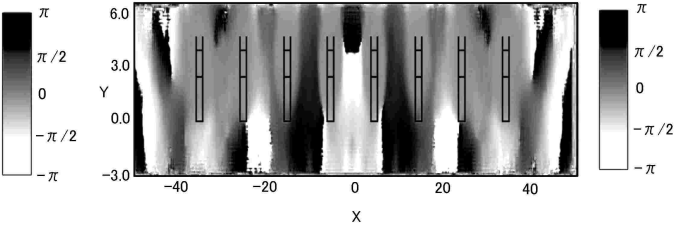
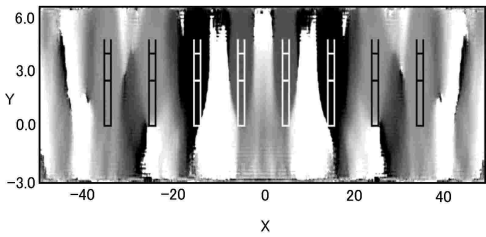
30

40

50

【図 1 3】

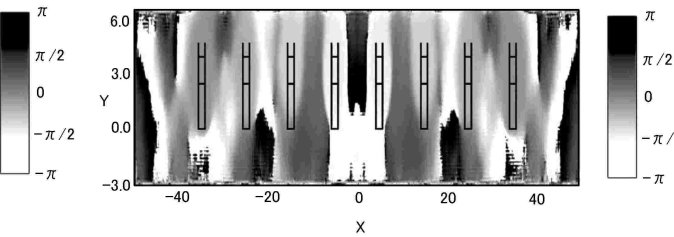
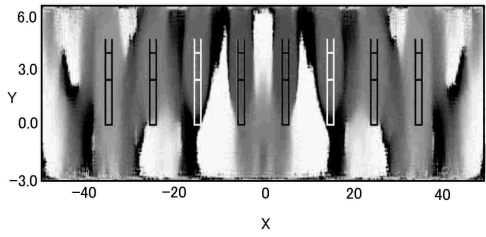
【図 1 4】



10

【図 1 5】

【図 1 6】



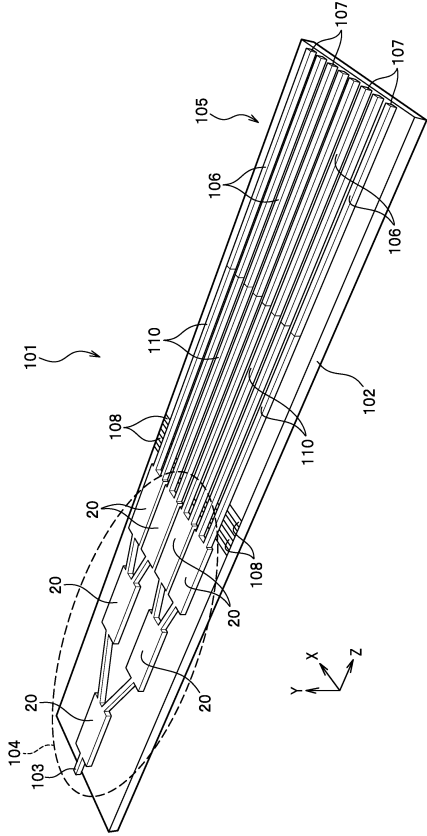
20

30

40

50

【図 17】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

東京都世田谷区砧一丁目10番11号 日本放送協会放送技術研究所内

審査官 林 祥恵

- (56)参考文献 特表2016-508235(JP,A)
特表平03-501065(JP,A)
米国特許出願公開第2018/0321569(US,A1)
米国特許出願公開第2019/0056634(US,A1)
HEATON, J.M. et al., "A phased array optical scanning (PHAROS) device used as a 1-to-9 way switch", IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992年03月, Vol. 28, No. 3, p. 678-685, DOI: 10.1109/3.124993
CHANG, C.-C. et al., "A beam-shaping phased antenna array based on true-time delay technologies", Twenty Seventh International Conference on Infrared and Millimeter Waves, 2020年, Vol. 12, No. 2, p.6600807-1- 6600807-7, DOI: 10.1109/ICIMW.2002.1076103
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
G02F 1/00 - 1/125
G02F 1/21 - 1/39
G02B 6/12 - 6/14
JSTPlus/JST7580(JDreamIII)
JSTChina(JDreamIII)
IEEE Explore