(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2024年2月1日(01.02.2024)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2024/024569 A1

(51) 国際特許分類:
G02B 6/32 (2006.01) *G02B 5/18* (2006.01)
G02B 3/08 (2006.01) *G02B 6/30* (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2023/026257

(22) 国際出願日： 2023年7月18日(18.07.2023)

(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 2022-121727 2022年7月29日(29.07.2022) JP

(71) 出願人: 住 友 化 学 株 式 会 社 (SUMITOMO CHEMICAL COMPANY, LIMITED) [JP/JP]; 〒1036020 東京都中央区日本橋二丁目７番１号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 松 浦 拓 哉 (MATSUURA, Takuya); 〒5548558 大阪府大阪市此花区春日出中三丁目１番９８号住友化学株式会社内 Osaka (JP). 福浦 知浩 (FUKUURA, Tomohiro); 〒5548558 大阪府大阪市此花区春日出中三丁目１番９８号住友化学株式会社内 Osaka (JP).

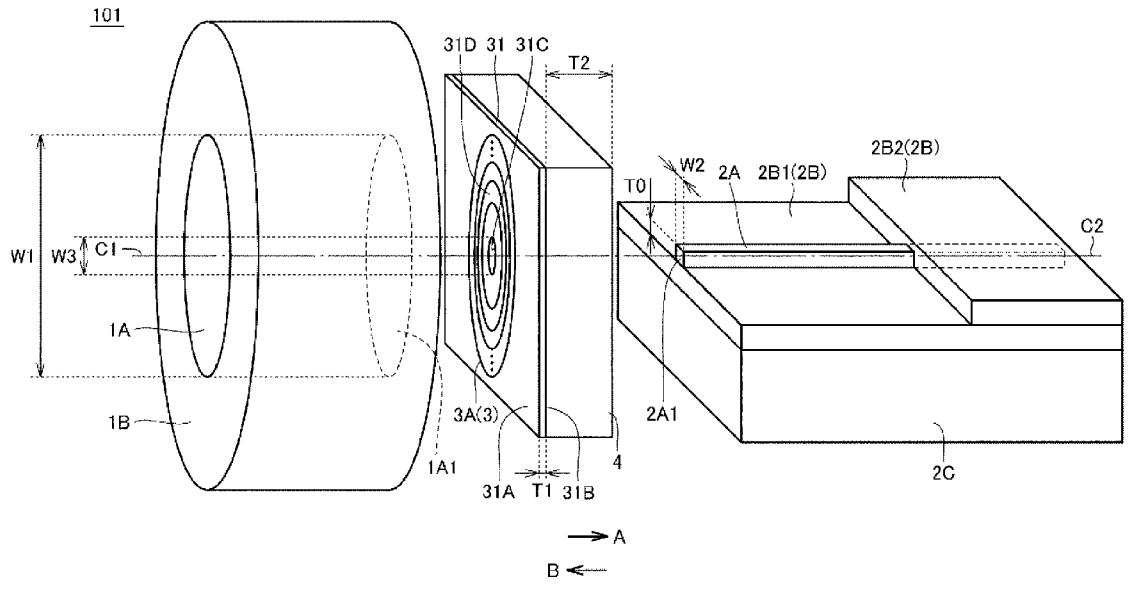
(74) 代理人: 中山 亨, 外(NAKAYAMA, Tohru et al.); 〒5418550 大阪府大阪市中央区北浜四丁目５番３３号住友化学株式会社内 Osaka (JP).

(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, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN,

(54) **Title:** OPTICAL SYSTEM

(54) 発明の名称： 光学システム

図1



(57) **Abstract:** An optical system (101) comprises: a core (1A); an Si waveguide (2A) having an optical spot size different from that of the core (1A); and a metalens (3) that optically connects the core (1A) and the Si waveguide (2A). The metalens has a first surface (31A) facing a first waveguide, and a second surface (31B) facing the opposite side from the first surface. In the metalens, a through-hole (31C) penetrating a space between the first surface and the second surface is formed. The hole diameter of the through-hole is smaller than an object wavelength. The metalens is configured from

WO 2024/024569 A1

[続葉有]

CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

— 国際調査報告（条約第21条(3)）

an electric conductor. On the first surface of the metalens, a plurality of relief structures configured from the first surface and a plurality of annular grooves (31D) recessed from the first surface are formed. The plurality of relief structures are annularly formed so as to surround the through-hole in plan view.

(57) 要約：光学システム（１０１）は、コア（１Ａ）と、光スポットサイズがコア（１Ａ）とは異なるＳｉ導波路（２Ａ）と、コア（１Ａ）とＳｉ導波路（２Ａ）との間を光学的に接続するメタレンズ（３）とを備える。メタレンズは、第１導波路と対向する第１面（３１Ａ）と、第１面とは反対側を向いている第２面（３１Ｂ）とを有する。メタレンズには、第１面と前記第２面との間を貫通する貫通孔（３１Ｃ）が形成されている。貫通孔の孔径は、対象波長よりも小さい。メタレンズは、導電体により構成されている。メタレンズの第１面には、第１面と、第１面に対して凹んでいる複数の環状溝（３１Ｄ）とにより構成されている複数の凹凸構造が形成されている。複数の凹凸構造は、平面視において貫通孔を囲むように環状に形成されている。

明　細　書

発明の名称 ： 光学システム

技術分野

[0001]　本発明は、光学システムに関し、特にサイズの異なる２つの光導波路間を接続できる光学システムに関する。

背景技術

[0002]　国際公開第２０１８／１０５７１２号（特許文献１）には、サイズの異なる２つの光導波路間を接続するためのポリマー導波路型のスポットサイズ変換器が記載されている。

[0003]　特開２０２１－１４８８５１号公報（特許文献２）には、複数の導波路コアを含む光集積回路と、複数の導波路コアの各々を光ファイバのコアとを接続するための光路変換部とを備える光電融合モジュールが記載されている。光路変換部は、スポットサイズコンバータ、曲面ミラー、メッキミラー、及びポリマー導波路を含む。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：国際公開第２０１８／１０５７１２号

特許文献2：特開２０２１－１４８８５１号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005]　従来のスポットサイズ変換器及び光路変換部では、複数の導波路コアの各々と光ファイバのコアとの間の光路長が長くなる場合があり、小型化に改善の余地があった。

[0006]　本発明の１つの目的は、サイズの異なる２つの光導波路間を接続できる光学システムであって、従来よりも光路長を短くできる光学システムを提供することにある。

課題を解決するための手段

[0007] 本発明は、以下に示される光学システムを提供する。

[0008] ［１］ 第１導波路と、光スポットサイズが前記第１導波路とは異なる第２導波路と、前記第１導波路の第１端面と前記第２導波路の第２端面との間を光学的に接続するメタレンズとを備え、前記メタレンズは、前記第１導波路と対向する第１面と、前記第１面とは反対側を向いている第２面とを有し、前記メタレンズには、前記第１面と前記第２面との間を貫通する貫通孔が形成されており、前記貫通孔の孔径は、対象波長よりも小さく、前記メタレンズは、導電体により構成されており、前記メタレンズの少なくとも前記第１面には、前記第１面と、前記第１面に対して凹んでいる複数の環状溝とにより構成されている複数の凹凸構造が形成されており、前記複数の凹凸構造は、平面視において前記貫通孔を囲むように環状に形成されている、光学システム。

[0009] ［２］ 対象波長λ（単位：ｎｍ）に対する前記複数の凹凸構造の各々の間隔Ｐ（単位：ｎｍ）の比率（Ｐ／λ）が、３０％以上１４０％以下である、［１］に記載の光学システム。

[0010] ［３］ 前記貫通孔の中心軸に対する径方向における前記複数の凹凸構造の各々の前記間隔Ｐに対して、前記複数の環状溝の各々の幅Ｗ５（単位：ｎｍ）が成す比率（Ｗ５／Ｐ）は、１０％以上９５％以下である、［２］に記載の光学システム。

[0011] ［４］ 平面視において、前記複数の凹凸構造の各々の中心は、前記貫通孔の中心と重なっている、［１］～[３］のいずれかに記載の光学システム。

[0012] ［５］ 平面視において、前記複数の凹凸構造の中心は、前記貫通孔の中心と重なっていない、［１］～[３］のいずれかに記載の光学システム。

[0013] ［６］ 前記複数の凹凸構造の各々の前記中心が、同一直線上に互いに等しい距離を隔てて並んで配置されており、前記貫通孔の中心軸と前記第２導波路の中心軸とが第１角度Θ_1を成しており、前記第１角度Θ_1が３°以上６０°以下である、［５］に記載の光学システム。

[0014] ［７］ 前記第１角度Θ_1が５°以上である場合、前記間隔Ｐ及び前記距離

Ｓ（単位：ｎｍ）が以下の関係式（１）を満足する、［６］に記載の光学システム。

[数1]

$$\frac{P}{\left(0.036\theta_1-\frac{0.1123}{\theta_1}+0.0671\right)}\leq S\leq\frac{P}{\left(0.066\theta_1-\frac{0.0605}{\theta_1}+0.0671\right)}\quad\cdots(1)$$

[0015] ［８］ 前記対象波長の光に対して透明でありかつ前記メタレンズの前記第２面と接する第３面を有する基板をさらに備え、前記複数の環状溝の各々は、前記メタレンズの前記第１面と前記第２面との間を貫通し、かつ前記第３面の一部を露出させるように形成されている、［１］～［７］のいずれかに記載の光学システム。

[0016] ［９］第１導波路と、光スポットサイズが前記第１導波路とは異なる第２導波路と、前記第１導波路の第１端面と前記第２導波路の第２端面との間を光学的に接続するメタレンズと、対象波長の光に対して透明でありかつ前記光の伝搬方向に交差する第３面を有する基板とを備え、前記メタレンズは、前記第３面上に配置されておりかつ前記対象波長の光に位相差を与える位相格子であり、前記メタレンズは、前記第３面上に互いに間隔を空けて配置されている複数の凸部を含み、

[0017] 前記複数の凸部の各々は、前記第３面の第１領域上に互いに間隔を空けて配置されている第１群の凸部と、前記第３面の第２領域上に互いに間隔を空けて配置されている第２群の凸部とを含み、前記第１群の凸部の各々の高さ、最大幅、及びピッチの少なくともいずれかは、前記第２群の凸部の各々の高さ、最大幅、及びピッチの少なくともいずれかと異なる、光学システム。

[0018] ［１０］前記メタレンズは、前記第１群の凸部及び前記第２群の凸部を含みかつ前記複数の凸部の各々の高さ、最大幅、及びピッチの少なくともいずれかが連続的または段階的に変化する構造単位が前記メタレンズの中心軸に対する径方向に周期的に配置されて成る周期構造を有している、［９］に記載の光学システム。

[0019] ［１１］前記メタレンズの前記周期構造に含まれる複数の前記構造単位の

うち、前記中心軸に最も近い位置にある第１構造単位の前記径方向の幅は、前記中心軸に２番目に近い位置にある第２構造単位の前記径方向の幅よりも広い、［９］に記載の光学システム。

[0020] ［１２］ 前記第１構造単位の前記径方向の幅は、１．００μｍ以上７．００μｍ以下である、［１１］に記載の光学システム。

[0021] ［１３］ 前記複数の凸部の各々は、柱状体または球状体であり、

[0022] 前記複数の凸部の各々の最大幅は、前記対象波長よりも短い、［９］に記載の光学システム。

[0023] ［１４］ 前記複数の凸部のうち前記メタレンズの中心軸に対する径方向において最外に位置する前記凸部の前記第３面側に位置する最外端部と、前記第２導波路の中心軸と前記第２端面との交点とを結ぶ第１仮想直線が、前記メタレンズの前記中心軸と前記第３面との交点と、前記第２導波路の前記中心軸と前記第２端面との交点とを結ぶ第２仮想直線に対して成す集光角度が、２０°以上７０°以下である、［９］～［１３］のいずれかに記載の光学システム。

[0024] ［１５］ 前記第１導波路は、光ファイバの少なくとも１つのコアであり、前記第２導波路は、細線導波路、リブ型導波路、又はフォトニック結晶導波路であり、前記メタレンズは、前記第１導波路と前記第２導波路との間に配置されている、［１］または［９］のいずれかに記載の光学システム。

[0025] ［１６］ 前記第２端面の面積に対する前記第１端面の面積の比率が１０以上である、［１５］に記載の光学システム。

[0026] ［１７］ 前記第１導波路は、離散的に配置されている複数のコアにより構成されており、前記メタレンズは、前記複数のコアの各々と前記第２導波路との間を光学的に接続する、［１５］に記載の光学システム。

[0027] ［１８］ 前記メタレンズは、前記複数のコアの各々から出射した光が前記第１導波路及び前記第２導波路の各々の中心軸と同一直線上に焦点を結ぶように設けられている、［１７］に記載の光学システム。

[0028] ［１９］ 前記第１導波路及び前記第２導波路の一方と光学的に接続され

ている情報出力部と、前記第１導波路及び前記第２導波路の他方と光学的に接続されている情報入力部とをさらに備える、［１］または［９］のいずれかに記載の光学システム。

[0029] ［２０］ 前記情報出力部は、前記第１導波路と光学的に接続されており、前記情報入力部は、前記第２導波路と光学的に接続されている、［１９］に記載の光学システム。

発明の効果

[0030] 本発明によれば、サイズの異なる２つの光導波路間を接続できる光学システムであって、従来よりも光路長が短い光学システムを提供できる。

図面の簡単な説明

[0031] [図1]実施の形態１に係る光学システムを説明するための分解斜視図である。

[図2]図１に示されるメタレンズを説明するための正面図である。

[図3]図２中の矢印ＩＩＩ－ＩＩＩから視たメタレンズ及び基板の断面図である。

[図4]実施の形態１に係る光学システムを説明するための断面図である。

[図5]実施の形態１に係る光学システムのメタレンズの第１変形例を説明するための正面図である。

[図6]図５中の矢印ＶＩ－ＶＩから視たメタレンズ及び基板の断面図である。

[図7]図５及び図６に示されるメタレンズを備える光学システムの第１例を説明するための断面図である。

[図8]図５及び図６に示されるメタレンズを備える光学システムの第２例を説明するための断面図である。

[図9]図５及び図６に示されるメタレンズの変形例を説明するための断面図である。

[図10]実施の形態１に係る光学システムのメタレンズの第２変形例を説明するための断面図である。

[図11]実施の形態１に係る光学システムのメタレンズの第３変形例を説明するための断面図である。

[図12]実施の形態１に係る光学システムのメタレンズの第４変形例を説明するための断面図である。

[図13]実施の形態２に係る光学システムを説明するための分解斜視図である。

[図14]図１３に示されるメタレンズを説明するための部分拡大正面図である。

[図15]図１３及び図１４に示されるメタレンズを説明するための部分拡大斜視図である。

[図16]実施の形態２に係る光学システムのメタレンズの集光角度を説明するための断面図である。

[図17]実施の形態３に係る光学システムを説明するための分解斜視図である。

[図18]図１７に示されるメタレンズを説明するための部分拡大斜視図である。

[図19]実施の形態４に係る光学システムを説明するための分解斜視図である。

[図20]実施の形態５に係る光学システムを説明するための分解斜視図である。

[図21]実施の形態６に係る光学システムを説明するための分解斜視図である。

[図22]実施の形態６に係る光学システムのメタレンズの一例を説明するための部分拡大平面図である。

[図23]実施の形態６に係る光学システムの変形例を説明するための分解斜視図である。

[図24]実施の形態７に係る光学システムの第１例を説明するための図である。

[図25]実施の形態７に係る光学システムの第２例を説明するための図である。

発明を実施するための形態

[0032] 以下、図面を参照して、本発明の実施の形態について説明する。なお、以下の図面において同一または相当する部分には、同一の参照符号を付し、その説明は繰り返さない。

[0033] 本実施の形態において幾何学的な文言および位置・方向・大小関係を表す文言、たとえば「直交」、「同軸」、「同等」などの文言が用いられる場合、それらの文言は、製造誤差ないし若干の変動を許容する。

[0034] ＜光学システムの構成＞

[0035] 本実施の形態に係る光学システムは、第１導波路と、光スポットサイズが第１導波路とは異なる第２導波路と、第１導波路と第２導波路との間を光学的に接続するメタレンズとを備える。

[0036] 本明細書において、「光スポットサイズ」とは、伝搬する光の光電力分布がガウシアンであると仮定した場合に、その光電力が最大値の１／ｅ^{2}になる領域の幅を意味する。第１導波路は、メタレンズと対向する第１端面を有する。第２導波路は、メタレンズと対向する第２端面を有する。本明細書では、第１導波路の第１端面での光スポットサイズを、第１導波路の「光スポットサイズ」と記載する。第２導波路の第２端面での光スポットサイズを、第２導波路の「光スポットサイズ」と記載する。第１導波路の光スポットサイズは、第２導波路の光スポットサイズよりも大きい。

[0037] 本明細書において「メタレンズ」とは、少なくとも１つのメタサーフェスを含み、第１導波路の第１端面及び第２導波路の第２端面のうちの一方から入射した光を他方において集光させる構造体を意味する。本明細書において「メタサーフェス」とは、第１端面と第２端面との間を光が伝搬する方向と交差する方向に配列されている複数の電磁波散乱体から成る構造体を意味する。複数の電磁波散乱体は、第１端面と第２端面との間の光の伝搬方向に対して直交する方向に配列していてもよい。複数の電磁波散乱体は、第１端面と第２端面との間の光の伝搬方向に対して鈍角または鋭角を成して傾斜する方向に配列していてもよい。

[0038] 本実施の形態に係るメタレンズの集光原理は、特に制限されないが、その代表例を以下に列記する。第１例は、開口幅が対象波長よりも小さい微小開口が形成されているメタレンズにおいて、対象波長の光が照射されたときに、微小開口から漏れ出した光を回収するというものである。第１例では、好ましくは、メタサーフェスが光を微小開口に集めて微小開口から漏れ出す光の強度を増強させるように設けられている。第１例のメタレンズは、例えばブルズアイ構造のメタサーフェスを有している。第２例は、位相格子が形成されているメタレンズにおいて、対象波長の光が照射されたときに、位相格子の空間的に異なる部分で回折した光に位相差を与えて集光するというものである。第２例のメタレンズは、例えば金属又は誘電体からなる複数の微粒子と光を共鳴させることにより位相差を与えるように設けられている共鳴型位相格子を含んでいてもよい。また、第２例のメタレンズは、例えば複数の誘電体導波路又は金属ギャップ導波路（MIM（Metal-Insulator-Metal）導波路）の各々を伝搬する光に位相差を与えるように設けられている導波路型位相格子を含んでいてもよい。

[0039] 本実施の形態に係る光学システムでは、対象波長の光は、光スポットサイズが相対的に大きい第１導波路から、メタレンズを経て、光スポットサイズが相対的に小さい第２導波路へ伝搬してもよい。本実施の形態に係る光学システムは、光スポットサイズが相対的に大きい第１導波路から、メタレンズを経て、光スポットサイズが相対的に小さい第２導波路へ伝搬する形態に、特に好適である。他方、本実施の形態に係る光学システムでは、対象波長の光は、上記とは逆方向に、第２導波路からメタレンズを経て、第１導波路に伝搬してもよい。後者の場合、メタレンズの焦点が第２導波路の第２端面にあっていれば、第２端面から出射される光は、メタレンズを経由して増径されたうえで第１導波路の第１端面側へ平行光として出射される。

[0040] 本明細書では、メタレンズから第１端面に伝搬する光の第１端面での光スポットサイズを第１光スポットサイズと記載する。メタレンズから第２端面に伝搬する光の第２端面での光スポットサイズを第２光スポットサイズと記

載する。好ましくは、メタレンズ３は、第１光スポットサイズとコア１Ａの光スポットサイズとの差が可能な限り小さく、かつ第２光スポットサイズとＳｉ導波路２Ａの光スポットサイズとの差が可能な限り小さくなるように、設けられている。このようにすれば、第１導波路と第２導波路との間での光の伝達効率が高められる。より好ましくは、メタレンズは、第１光スポットサイズがコア１Ａの光スポットサイズと等しく、かつ第２光スポットサイズがＳｉ導波路２Ａの光スポットサイズと等しくなるように、設けられている。このようにすれば、第１導波路と第２導波路との間での光の伝達効率が最も高められる。

[0041] 光が第１導波路から第２導波路に伝搬する場合において、メタレンズは、第１導波路から入射した光を第２導波路に集める。言い換えると、メタレンズは、第１導波路から入射した光のスポットサイズを第２光スポットサイズと同等程度にまで小さくする。メタレンズは、光が第２導波路から第１導波路に伝搬する場合において、前者の場合とは逆の過程を生じさせて、第２導波路から入射した光を第１導波路に拡げる。言い換えると、メタレンズは、第２導波路から入射した光のスポットサイズを第１光スポットサイズと同等程度にまで大きくする。

[0042] 本実施の形態に係る光学システムは、メタレンズを備えるため、第１導波路と第２導波路とを光学的に接続するポリマー導波路を備える従来の光学システムと比べて、第１導波路と第２導波路との間の光路長が短くなり得る。

[0043] 本明細書において、「平面視」とは、第１導波路と第２導波路との間で光が伝搬する方向（以下、光軸方向とも記載する）からメタレンズを視た視点を意味する。平面視において、複数の電磁波散乱体の配列は、周期的又は非周期的である。複数の電磁波散乱体の各々の光軸方向の寸法（以下、厚さとも記載する）、光軸方向と直交する方向の寸法（以下、幅とも記載する）、及び隣り合う２つの電磁波散乱体の間隔の少なくともいずれかは、光学システムを伝搬する光の波長（以下、対象波長とも記載する）と同等あるいは対象波長未満である。好ましくは、複数の電磁波散乱体の各々の厚さ、幅、及

び間隔が、いずれも対象波長以下である。

[0044] なお、複数の電磁波散乱体の各々の厚さ、幅、及び間隔のいずれかは、例えば対象波長を超えていてもよい。この場合、複数の電磁波散乱体の各々の厚さ、幅、及び間隔のうちの他のパラメータが、対象波長未満であればよい。また、この場合、対象波長を超えている複数の電磁波散乱体の各々の厚さ、幅、または間隔は、対象波長の２倍以下である。

[0045] 対象波長は、特に制限されないが、例えば３００ｎｍ以上３ｍｍ以下である。言い換えると、光学システムは、例えば可視光、赤外線、及びテラヘルツ波の少なくともいずれかを伝搬するように設けられている。

[0046] 本実施の形態に係る第１導波路は、例えば光ファイバのコアである。第１導波路は、例えばシングルコアファイバ又はマルチコアファイバのコアである。本実施の形態に係る第２導波路は、例えば細線導波路、リブ型導波路、又はフォトニック結晶導波路である。

[0047] 以下に、本実施の形態に係る光学システムを例示する。

[0048] （実施の形態１）

[0049] ＜光学システム１０１の構成＞

[0050] 図１に示されるように、実施の形態１に係る光学システム１０１は、光ファイバ１、フォトニクス素子２、メタレンズ３、及び基板４を備える。光学システム１０１の対象波長は、シリコン（Ｓｉ）において基礎吸収が生じ得る１１００ｎｍよりも長く、例えば１２６０ｎｍ以上１５６５ｎｍ以下である。

[0051] （１）光ファイバ

[0052] 光ファイバ１は、シングルコアファイバであり、第１導波路としてのコア１Ａと、クラッド１Ｂとを含む。光ファイバ１は、例えば対象波長の光をシングルモードで伝搬させるシングルモードファイバである。コア１Ａは、メタレンズ３と対向する第１端面１Ａ１を有する。第１端面１Ａ１は、コア１Ａの中心軸Ｃ１と交差する平面である。第１端面１Ａ１は、例えばコア１Ａの中心軸Ｃ１と直交する。第１端面１Ａ１の形状は、例えば円形状である。

クラッド１Ｂは、コア１Ａの中心軸Ｃ１に対する周方向においてコア１Ａを覆っている。コア１Ａを構成する材料の屈折率は、クラッド１Ｂを構成する材料の屈折率よりも高い。コア１Ａの第１端面１Ａ１の寸法（コア径Ｗ１）は、例えば１μｍ以上２０μｍ以下であり、好ましくは５μｍ以上１０μｍ以下である。

[0053] なお、光ファイバ１は、対象波長の光をマルチモードで伝搬させるマルチモードファイバであってもよい。この場合、コア１Ａのコア径Ｗ１は、例えば２０μｍ以上７０μｍ以下であってもよい。

[0054] （２）フォトニクス素子

[0055] フォトニクス素子２は、シリコンフォトニクス素子である。フォトニクス素子２は、第２導波路としてのＳｉ導波路２Ａと、クラッド２Ｂと、Ｓｉ基板２Ｃとを含む。Ｓｉ導波路２Ａは、Ｓｉから成る。Ｓｉ導波路２Ａは、いわゆる細線導波路である。Ｓｉ導波路２Ａは、メタレンズ３と対向する第２端面２Ａ１を有する。第２端面２Ａ１は、Ｓｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２と交差する平面である。第２端面２Ａ１は、例えばＳｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２と直交する。第２端面２Ａ１の形状は、例えば四辺形状であり、好ましくは正方形状である。クラッド２Ｂは、Ｓｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２に対する周方向においてＳｉ導波路２Ａを覆っている。Ｓｉ導波路２Ａを構成する材料は、クラッド２Ｂを構成する材料の屈折率よりも高い。Ｓｉ導波路２Ａを構成する材料は、例えばＳｉ又は窒化ケイ素（Si_3N_4）を含む。

[0056] 図１に示されるように、クラッド２Ｂは、第１クラッド層２Ｂ１と、第２クラッド層２Ｂ２とを含む。第１クラッド層２Ｂ１は、Ｓｉ基板２Ｃ上に配置されており、Ｓｉ導波路２ＡとＳｉ基板２Ｃとの間を隔てている。Ｓｉ導波路２Ａは、第１クラッド層２Ｂ１上に配置されている。第２クラッド層２Ｂ２は、Ｓｉ導波路２Ａ及び第１クラッド層２Ｂ１各々の上に配置されている。第１クラッド層２Ｂ１及び第２クラッド層２Ｂ２の各々を構成する材料は、例えば酸化ケイ素（SiO_2）を含む。

[0057] 図１に示されるように、第２クラッド層２Ｂ２の少なくとも一部は、空気

クラッド層であってもよい。なお、第２クラッド層２Ｂ２の全部が、空気クラッド層であってもよい。

[0058] Ｓｉ導波路２Ａの光スポットサイズは、コア１Ａの光スポットサイズよりも小さい。Ｓｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１の幅Ｗ２及び厚さＴ０の各々は、コア１Ａのコア径Ｗ１よりも小さい。Ｓｉ導波路２Ａの幅Ｗ２及び厚さＴｏの各々は、１μｍ未満であり、好ましくは１００ｎｍ以上５００ｎｍ未満である。なお、例えばＳｉ導波路２Ａが台形形状などのように幅Ｗ２が長短の幅を持ちうる場合、幅の短い方が上記長さを満たすことが好ましく、長短幅どちらも上記長さを満たすことがさらに好ましい。コア１Ａの第１端面１Ａ１の面積（以下、第１面積とも記載する）は、Ｓｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１の面積（以下、第２面積とも記載する）よりも大きい。第２面積に対する第１面積の比率は、１０以上であってもよく、２５以上であってもよく、５０以上であってもよく、１００以上であってもよく、５００以上であってもよく、１０００以上であってもよい。

[0059] （３）メタレンズ

[0060] メタレンズ３は、コア１Ａの第１端面１Ａ１とＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１との間を光学的に接続する。

[0061] 図１～図３に示されるように、メタレンズ３は、ブルズアイ構造のメタサーフェス３Ａを含む。つまり、光学システム１０１のメタレンズ３の集光原理は、上記第１例である。メタサーフェス３Ａは、導電体層３１に形成されている。

[0062] 導電体層３１は、コア１Ａの第１端面１Ａ１と対向する第１面３１Ａと、第１面３１Ａとは反対側に位置する第２面３１Ｂとを有する。第１面３１Ａ及び第２面３１Ｂの各々は、例えばコア１Ａの中心軸Ｃ１及びＳｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２の各々と直交している。導電体層３１を構成する材料は、対象波長の光が入射したときに表面プラズモンが共鳴的に励起される得る限りにおいて、任意の導電体であればよいが、好ましくは無機材料であり、例えば、金、銀、銅、白金、アルミニウム又はそれらの合金を含んでいてよい。

導電体層３１を構成する材料は、好ましくは銀を含む。

[0063] 図２及び図３に示されるように、導電体層３１には、微少開口部としての貫通孔３１Ｃが形成されている。貫通孔３１Ｃは、第１面３１Ａと第２面３１Ｂとの間を貫通する。貫通孔３１Ｃの平面形状は、例えば円形状である。

[0064] 平面視において、貫通孔３１Ｃの少なくとも一部は、コア１Ａ及びＳｉ導波路２Ａと重なるように配置されている。好ましくは、平面視において、貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３（孔軸）は、コア１Ａ及びＳｉ導波路２Ａと重なるように配置されている。より好ましくは、貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３は、コア１Ａの中心軸Ｃ１及びＳｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２の各々と同一直線上に配置されている。

[0065] 図２及び図３に示されるように、導電体層３１の第１面３１Ａには、複数の凹凸構造３１Ｄが形成されている。複数の凹凸構造３１Ｄは、第１面３１Ａと、第１面３１Ａに対して凹んでいる複数の環状溝３１Ｅとにより構成されている。異なる観点から言えば、導電体層３１には、複数の環状溝３１Ｅの底面から突出しており第１面３１Ａを有する複数の凸部３１Ｆ（図３参照）が形成されている。

[0066] 図２に示されるように、平面視において、複数の凹凸構造３１Ｄの各々は、貫通孔３１Ｃを囲むように円環状に形成されている。平面視において、複数の凹凸構造３１Ｄの各々の中心は、互いに重なっている。平面視において、複数の凹凸構造３１Ｄの各々の中心は、貫通孔３１Ｃの中心（中心軸Ｃ３）と重なっている。

[0067] 凹凸構造３１Ｄの数は、特に制限されないが、３以上３０以下であってよい。凹凸構造の数が少なければ、集光性能を示す対象波長の範囲を広くでき、凹凸構造の数が多ければ、対象波長の範囲が狭まり波長選択性を高めることができる。

[0068] 複数の凹凸構造３１Ｄの表面、すなわち第１面３１Ａ並びに複数の環状溝３１Ｅの壁面及び底面は、例えば空気と接している。複数の凹凸構造３１Ｄの表面は、任意の誘電体と接していてもよい。メタレンズ３は、複数の環状

溝３１Ｅの各々の表面を覆う誘電体膜をさらに含んでいてもよい。複数の凹凸構造３１Ｄは、誘電体膜によって平坦化されていてもよい。

[0069] 図２及び図３に示されるように、複数の凹凸構造３１Ｄの外周縁は、例えば環状溝３１Ｅにより構成されている。複数の凹凸構造３１Ｄの寸法は、例えば互いに同等である。好ましくは、複数の凹凸構造３１Ｄの外周縁の幅Ｗ４は、コア１Ａのコア径Ｗ１と同等である。

[0070] なお、複数の凹凸構造３１Ｄの外周縁は、第１面３１Ａにより構成されていてもよい。複数の凹凸構造３１Ｄは、第１面３１Ａと、第１面３１Ａから突出している複数の環状凸部により構成されていてもよい。この場合、複数の凹凸構造３１Ｄの外周縁は、環状凸部により構成されていてもよいし、第１面３１Ａにより構成されていてもよい。

[0071] 光学システム１０１では、光の伝搬方向が制限されない。光は、光スポットサイズが相対的に大きいコア１Ａから、メタレンズ３を経て、光スポットサイズが相対的に小さいＳｉ導波路２Ａへ、方向Ａ（図１～図３参照）に沿って伝搬し得る。また、これとは逆方向に、光は、Ｓｉ導波路２Ａからメタレンズ３を経てコア１Ａへ、方向Ｂ（図１，図３参照）に沿って伝搬し得る。方向Ａ及び方向Ｂは、例えば水平方向に沿っている。なお、方向Ａ及び方向Ｂは、鉛直方向に沿っていてもよい。

[0072] メタレンズ３から第１端面１Ａ１に伝搬する光の第１端面１Ａ１での光スポットサイズ（以下、第１光スポットサイズとも記載する）は、Ｓｉ導波路２Ａの光スポットサイズよりも大きく、好ましくはコア１Ａの光スポットサイズと等しい。メタレンズ３から第２端面２Ａ１に伝搬する光の第２端面２Ａ１での光スポットサイズ（以下、第２光スポットサイズとも記載する）は、コア１Ａの光スポットサイズよりも小さく、好ましくはＳｉ導波路２Ａの光スポットサイズと等しい。

[0073] メタサーフェス３Ａを含むメタレンズ３は、対象波長の光がコア１Ａからメタサーフェス３Ａに入射した時に表面プラズモンを共鳴的に励起させ、表面プラズモンを微小開口部としての貫通孔３１Ｃに集め、第２光スポットサ

イズの光をＳｉ導波路２Ａに出射するように設けられている。また、メタレンズ３は、対象波長の光がＳｉ導波路２Ａから貫通孔３１Ｃに入射した時には、上記プロセスとは逆のプロセスにより第１光スポットサイズの光をコア１Ａに出射するように設けられている。

[0074] メタサーフェス３Ａを構成する導電体層３１、貫通孔３１Ｃ、及び複数の凹凸構造３１Ｄの各々の寸法は、対象波長に応じて任意に選択され得る。導電体層３１の厚さＴ１（図１参照）は、特に制限されないが、好ましくは対象波長以下であり、より好ましくは対象波長未満であり、より好ましくは対象波長の半値以下であり、５０ｎｍ以上であってよいる。上記のように対象波長が１２６０ｎｍ以上１５６５ｎｍ以下である場合、厚さＴ１は、３００ｎｍ程度であってもよい。貫通孔３１Ｃの孔径Ｗ３は、対象波長以下であり、好ましくは対象波長よりも小さい。孔径Ｗ３は、例えば対象波長の半値程度である。貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３に対する径方向における複数の環状溝３１Ｅの各々の幅Ｗ５、及び複数の環状溝３１Ｅの各々の深さＤは、それぞれ対象波長以下であり、好ましくは対象波長よりも小さい。複数の環状溝３１Ｅの各々の幅Ｗ５、及び複数の環状溝３１Ｅの各々の深さＤは、例えば対象波長の半値程度である。

[0075] 貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３に対する径方向における複数の凹凸構造３１Ｄの各々の間隔Ｐは、特に制限されないが、対象波長と同等である。なお、複数の凹凸構造の間隔とは、隣り合う凸部間又は隣り合う凹部間のピッチ（周期）を意味する。具体的には、図３に示すように、一の凸凹構造３１Ｄの間隔（幅）Ｐを意味する。集光性能を高める観点から、対象波長に対する複数の凹凸構造３１Ｄの各々の間隔Ｐの比率は、３０％以上２００％以下であることが好ましい。対象波長に対する複数の凹凸構造３１Ｄの各々の間隔Ｐの比率は、好ましくは１４０％以下であり、より好ましくは１１０％以下であり、さらに好ましくは１００％未満である。対象波長に対する複数の凹凸構造３１Ｄの各々の間隔Ｐの比率は、好ましくは６０％以上であり、より好ましくは６５％超えであり、さらに好ましくは７０％以上である。

[0076] 貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３に対する径方向における複数の凹凸構造３１Ｄの各々の間隔Ｐに対する複数の環状溝３１Ｅの各々の幅Ｗ５の比率（Ｗ５／Ｐ）は、特に制限されないが、１０％以上９５％以下であってよい。対象波長の反射率に対する透過率の比をより高める観点から、上記比率Ｗ５／Ｐは、３０％以上が好ましく、４５％以上がより好ましく、６０％以上がなおさらに好ましく、７０％以上が特に好ましく、８０％以上がなおさら特に好ましい。

[0077] メタレンズ３の第２面３１Ｂは、例えば平面である。

[0078] メタレンズ３の形成方法は特に制限されない。メタレンズ３は、以下のように形成されてもよい。第１に、導電体層３１が基板４の第３面４Ａ上に形成される。導電体層３１を形成する方法は、任意の方法であればよく、例えばスパッタリング法などであってもよい。第２に、導電体層３１がパターニングされ、貫通孔３１Ｃ及び複数の環状溝３１Ｅが形成される。導電体層３１をパターニングする方法は、任意の方法であればよく、例えば写真製版及びドライエッチング法などであってもよい。

[0079] （４）基板

[0080] 図１及び図３に示されるように、基板４は、メタレンズ３を支持している。基板４は、対象波長の光に対して透明である。基板４は、メタレンズ３の第２面３１Ｂと接している第３面４Ａと、第３面４Ａとは反対側に位置しておりかつＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１と対向する第４面４Ｂとを有している。第３面４Ａは、例えば貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３と直交する。

[0081] 基板４は、特に制限されないが、フレネル反射を抑制する観点から、屈折率の低い材から構成されることが好ましい。基板４は、例えばSiO_2を含んでいてよく、ガラスを含むことがより好ましく、ガラスからなることがさらに好ましい。

[0082] 基板４の厚さＴ２は、例えば導電体層３１の厚さＴ１よりも厚い。好ましくは、導電体層３１の厚さＴ１と基板４の厚さＴ２との和が、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとを従来のポリマー導波路で光学的に接続する場合に必要とさ

れるポリマー導波路の長さよりも短い。

[0083] 図４を参照して、コア１Ａの第１端面１Ａ１とメタレンズ３の第１面３１Ａとの間の最短距離Ｌ１と、Ｓｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１と基板４の第４面４Ｂとの間の最短距離Ｌ２とは、可能な限り短いことが好ましい。最短距離Ｌ１及び最短距離Ｌ２の各々は、メタレンズ３の導電体層３１の厚さＴ１（図３参照）よりも短くてもよい。

[0084] 光学システム１０１を伝搬する光は、コア１Ａ、メタレンズ３、基板４、及びＳｉ導波路２Ａを順に通過してもよいし、Ｓｉ導波路２Ａ、基板４、メタレンズ３、及びコア１Ａを順に通過してもよい。

[0085] ＜光学システム１０１の効果＞

[0086] 上述のように、光学システム１０１は、メタレンズ３を備えるため、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとを光学的に接続するポリマー導波路又は凸レンズを備える光学システムと比べて、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとの間の光路長が短くなり得る。

[0087] また、光学システム１０１では、光ファイバのコアとＳｉ導波路とを光学レンズによって接続する光学システムと比べて、コア１Ａ、Ｓｉ導波路２Ａ、及びメタレンズ３の各々の相対的な位置が製造誤差等によって変動する場合にも、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとの間での光の伝達効率が低下しにくい。具体的には、光ファイバのコアとＳｉ導波路とを光学レンズによって接続する光学システムでは、光学レンズとＳｉ導波路との間の距離が変動すると、光学レンズの焦点位置がＳｉ導波路に対して大きく変動して、伝達効率が著しく低くなるおそれがある。これに対し、光学システム１０１では、メタレンズ３には貫通孔３１Ｃが形成されているため、コア１Ａ又はＳｉ導波路２Ａからメタレンズ３に入射した光は貫通孔３１Ｃに集中した後、貫通孔３１Ｃを透過する。これにより、光学システム１０１では、メタレンズ３からＳｉ導波路２Ａ又はコア１Ａに出射する光の焦点が貫通孔３１Ｃ内に形成され、Ｓｉ導波路２Ａ又はコア１Ａには平行光が入射するとみなすことができる。そのため、光学システム１０１では、第１導波路と第２導波路との間で

の光の伝達効率が、コア１Ａとメタレンズ３との間の上記最短距離Ｌ１及びＳｉ導波路２Ａと基板４との間の上記最短距離Ｌ２が製造誤差等によって変動する影響を受けにくい。

[0088] 光学システム１０１において光が伝搬する方向Ａ又は方向Ｂは、任意の方向であればよく、例えば水平方向又は鉛直方向に沿っていてもよい。光学システム１０１によれば、光ファイバ１の第１端面１Ａ１及びＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１が水平方向に互いに対向する場合にも、光の伝搬方向をミラー等によって変更することなく、両者を光学的に接続できる。そのため、光学システム１０１の設計の自由度は、従来の光学システムと比べて高い。

[0089] また、光ファイバのコアとＳｉ導波路とを複数のミラーによって接続する特許文献２に記載の光学システムでは、複数のミラーの各々の光軸が一度ずれてしまうと、これを修正することは不可能である。これに対し、光学システム１０１では、コア１Ａ、Ｓｉ導波路２Ａ、及びメタレンズ３の各々の相対的な位置を容易に再調整できるため、歩留まりの低下が抑制され得る。

[0090] また、光学システム１０１では、複数の凹凸構造３１Ｄがメタレンズ３の貫通孔３１Ｃを囲むように形成されている。これにより、対象波長の光が複数の凹凸構造３１Ｄに入射した時には、共鳴的に励起された表面プラズモンが貫通孔３１Ｃに集まるため、導電体層３１に貫通孔３１Ｃのみが形成されている場合と比べて、メタレンズ３の透過する光をより効率的に回収でき、当該光の強度が高くなる。

[0091] 図３に示されるように、光学システム１０１では、コア１Ａからメタレンズ３に入射する光ＩＬの伝搬方向は、第１面３１Ａに対して垂直な方向に設定される。メタレンズ３からＳｉ導波路２Ａに出射する光ＴＬの伝搬方向は、コア１Ａからメタレンズ３に入射する光ＩＬの伝搬方向と平行となる。同様に、光学システム１０１では、Ｓｉ導波路２Ａからメタレンズ３に入射する光ＩＬの伝搬方向は、第２面３１Ｂに対して垂直な方向に設定される。メタレンズ３からコア１Ａに出射する光の伝搬方向は、光ＩＬがＳｉ導波路２Ａからメタレンズ３に入射する光の伝搬方向と平行となる。

[0092] また、光学システム１０１では、メタレンズ３が無機材料により構成されていてもよい。この場合、光学システム１０１の耐熱性は、ポリマー導波路を備える光学システムと比べて、高い。

[0093] ＜メタレンズの変形例＞

[0094] 以下、光学システム１０１のメタレンズ３の変形例を説明する。

[0095] 光学システム１０１は、図１～図４に示されるメタレンズ３に代えて、図５及び図６に示されるメタレンズ３を備えていてもよい。図５及び図６に示されるメタレンズ３は、図１～図４に示されるメタレンズ３と基本的に同様の構成を備えるが、メタサーフェス３Ａに代えてメタサーフェス３Ｂを含む点で、図１～図４に示されるメタレンズ３とは異なる。メタサーフェス３Ｂは、平面視において、複数の凹凸構造３１Ｄの各々の中心が貫通孔３１Ｃ（微小開口）の中心（中心軸Ｃ３）と重ならないように配置されている点で、メタサーフェス３Ａとは異なる。つまり、メタサーフェス３Ｂも、メタサーフェス３Ａと同様に、ブルズアイ構造を有している。以下、図５及び図６に示されるメタレンズ３及びメタサーフェス３Ｂが、図１～図４に示されるメタレンズ３及びメタサーフェス３Ｂとは異なる点を主に説明する。

[0096] 図５及び図６に示されるように、貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３と直交する方向Ｃにおいて、貫通孔３１Ｃに対して一方の側に位置する複数の凹凸構造３１Ｄの各部分の間隔（周期）は、貫通孔３１Ｃに対して他方の側に位置する複数の凹凸構造３１Ｄの各部分の間隔（周期）よりも広い。以下では、上記方向Ｃにおいて貫通孔３１Ｃの一方の側に位置し、かつ相対的に広い間隔を空けて配置されている、複数の凹凸構造３１Ｄの各部分の間隔を、第１間隔ＰＡとも記載する。上記方向Ｃにおいて貫通孔３１Ｃの他方の側に位置し、かつ相対的に狭い間隔を空けて配置されている、複数の凹凸構造３１Ｄの各部分の間隔を、第２間隔ＰＢとも記載する。貫通孔３１Ｃに対して一方の側に位置する複数の凹凸構造３１Ｄの各部分の第１間隔ＰＡは、貫通孔３１Ｃから離れるにつれて徐々に広くなっている。貫通孔３１Ｃに対して他方の側に位置する複数の凹凸構造３１Ｄの各部分の第２間隔ＰＢは、例えば互いに

等しい。

[0097] 言い換えると、貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３と直交する第１方向Ｃにおいて、貫通孔３１Ｃに対して一方の側に位置する複数の環状溝３１Ｅの各部分の幅（以下、第１幅Ｗ５Ａとも記載する）は、貫通孔３１Ｃに対して他方の側に位置する複数の環状溝３１Ｅの各部分の幅（以下、第２幅Ｗ５Ｂとも記載する）よりも広い。貫通孔３１Ｃに対して一方の側に位置する複数の環状溝３１Ｅの各部分の第１幅Ｗ５Ａは、貫通孔３１Ｃから離れるにつれて徐々に広くなっている。貫通孔３１Ｃに対して他方の側に位置する複数の環状溝３１Ｅの各部分の第２幅Ｗ５Ｂは、例えば互いに等しい。

[0098] 図５及び図６に示されるメタサーフェス３Ｂにおいても、複数の凹凸構造３１Ｄは、対象波長に対する間隔Ｐの比率が３０％以上２００％以下である領域を有していてもよい。対象波長に対する複数の凹凸構造３１Ｄの各々の第１間隔ＰＡの比率は、例えば２００％以下であってもよく、好ましくは１４０％以下であり、より好ましくは１１０％以下であり、さらに好ましくは１００％未満である。同様に、対象波長に対する複数の凹凸構造３１Ｄの各々の第２間隔ＰＢの比率は、３０％以上であってよく、好ましくは６０％以上であり、より好ましくは６５％超えであり、さらに好ましくは７０％以上である。

[0099] 上記第１間隔ＰＡに対する第１幅Ｗ５Ａの比率（Ｗ５Ａ／ＰＡ）及び上記第２間隔ＰＢに対する第２幅Ｗ５Ｂの比率（Ｗ５Ｂ／ＰＢ）は、特に制限されないが、１０％以上９５％以下であってよい。対象波長の反射率に対する透過率の比をより高める観点から、上記比率Ｗ５Ａ／ＰＡ及び上記比率Ｗ５Ｂ／ＰＢの各々は、３０％以上が好ましく、４５％以上がより好ましく、６０％以上がなおさらに好ましく、８０％以上が特に好ましい。

[0100] メタサーフェス３Ｂを備えるメタレンズ３においても、コア１Ａからメタレンズ３に入射する光ＩＬの伝搬方向は、第１面３１Ａに対して垂直な方向に設定される。メタサーフェス３Ｂを備えるメタレンズ３では、メタレンズ３からＳｉ導波路２Ａに出射する光ＴＬの伝搬方向は、光ＩＬがコア１Ａか

らメタレンズ３に入射する光ＩＬの伝搬方向に対して傾斜する。このため、図７に示されるように、メタサーフェス３Ｂを備えるメタレンズ３は、Ｓｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２がコア１Ａの中心軸Ｃ１に対して第１方向Ｃ側に傾斜する光学システムに好適である。また、図８に示されるように、メタサーフェス３Ｂを備えるメタレンズ３は、Ｓｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２がコア１Ａの中心軸Ｃ１と平行であるが、中心軸Ｃ１が第１方向Ｃにおいて中心軸Ｃ２と間隔を空けて配置される光学システムにも好適である。図７及び図８に示される各光学システムにおいても、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとの間での光の伝達効率が高い。

[0101] なお、図７及び図８には、ブルズアイ構造のメタサーフェス３Ｂを備えるメタレンズ３の出射角度θ_1が図示されている。図７における出射角度θ_1は、Ｓｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２が貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３（図７中で、Ｃ３はＣ１と一致）に対して成す角度（第１角度）である。図８における出射角度θ_1は、貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３（図８中で、Ｃ３はＣ１と一致）と基板４の第３面４Ａとの交点（メタサーフェス３Ｂの第２面３１Ｂ上に位置する貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３の端部）と、Ｓｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２とＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１との交点（Ｓｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１上に位置するＳｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２の端部）とを結ぶ直線が貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ３に対して成す角度である。メタサーフェス３Ｂを備えるメタレンズ３の出射角度θ_1は、特に制限されないが、例えば３°以上６０°以下であり、４５°以下であってもよい。当該出射角度θ_1は、７°以上であってもよいし、１６°以上であってもよいし、３０°以上であってもよいし、４０°以上であってもよい。

[0102] 図９に示されるように、メタサーフェス３Ｂでは、複数の凹凸構造３１Ｄの各々の中心間の距離（以下、シフト量とも記載する）が互いに等しくてもよい。本明細書では、複数の凹凸構造３１Ｄにおいて隣り合う２つの凹凸構造３１Ｄの上記シフト量が互いに等しい図９に示される構成において、各シフト量を単位シフト量Ｓと記載する。図９に示されるメタサーフェス３Ｂを

含むメタレンズ３では、単位シフト量Ｓに対する上記出射角度θ_1の比率（θ_1／Ｓ）が、０．１９以上であってもよいし、０．５８以上であってもよいし、２．００以上であってもよいし、３．３３以上であってもよいし、６．００以上であってもよいし、１０．００以上であってもよい。

[0103] 図９に示されるメタサーフェス３Ｂにおいて、上記第１間隔ＰＡは、例えば互いに等しい。この場合も、集光性能を高める観点から、対象波長に対する複数の凹凸構造３１Ｄの各々の第１間隔ＰＡの比率は、例えば２００％以下であってもよく、好ましくは１４０％以下であり、より好ましくは１１０％以下であり、さらに好ましくは１００％未満である。同様に、対象波長に対する複数の凹凸構造３１Ｄの各々の第１間隔ＰＡの比率は、３０％以上であってよく、好ましくは６０％以上であり、より好ましくは６５％超えであり、さらに好ましくは７０％以上である。なお、上記第１間隔ＰＡは、貫通孔３１Ｃから離れるにつれて徐々に広くなっていてもよい。

[0104] 本発明者らは、メタサーフェス３Ｂにおいて実現されるべき出射角度θ_1が５°以上である場合に、メタサーフェス３Ｂの単位シフト量Ｓ（単位：ｎｍ）及び複数の凹凸構造３１Ｄの上記間隔Ｐ（単位：ｎｍ）が以下の関係式（１）を満たすように設けられていれば、上記出射角度θ_1を実現できることを確認した。

[数2]

$$\frac{P}{\left(0.036\theta_1-\frac{0.1123}{\theta_1}+0.0671\right)}\leq S\leq\frac{P}{\left(0.066\theta_1-\frac{0.0605}{\theta_1}+0.0671\right)}\quad\cdots(1)$$

[0105] 光学システム１０１は、図１～図６に示されるメタレンズ３に代えて、図１０に示されるメタレンズ３を備えていてもよい。図１０に示されるメタレンズ３は、図１～図６に示されるメタレンズ３と基本的に同様の構成を備えるが、基板４の第４面４Ｂ上に配置されたメタサーフェス３Ａをさらに含む点で、図１～図６に示されるメタレンズ３とは異なる。第４面４Ｂ上に配置されているメタサーフェス３Ａは、第３面４Ａ上に配置されているメタサーフェス３Ａと、基板４に対して対称である。図１０に示されるメタレンズ３

では、基板４の第３面４Ａ上に配置されているメタサーフェス３Ａとコア１Ａの第１端面１Ａ１との間の最短距離、及び基板４の第４面４Ｂ上に配置されているメタサーフェス３ＡとＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１との間の最短距離が、可能な限り短いことが好ましい。

[0106] なお、光学システム１０１のメタレンズ３は、基板４の第３面４Ａ及び第４面４Ｂの少なくともいずれかの上に配置されたメタサーフェス３Ａ又はメタサーフェス３Ｂを含んでいればよい。

[0107] 光学システム１０１は、図１～図６に示されるメタレンズ３に代えて、図１１または図１２に示されるメタレンズ３を備えていてもよい。

[0108] 図１１に示されるメタレンズ３は、図１～図６に示されるメタレンズ３と基本的に同様の構成を備えるが、複数の凹凸構造３１Ｄ中の複数の環状溝３１Ｅの各々が、メタレンズ３の第１面３１Ａと第２面３１Ｂとの間を貫通し、基板４の第３面４Ａの一部を露出させるように形成されている点で、図１～図６に示されるメタレンズ３とは異なる。各環状溝３１Ｅの底面が基板４の第３面４Ａにより構成されている。異なる観点から言えば、図１１に示されるメタレンズ３は、図１～図６に示されるメタレンズ３と基本的に同様の構成を備えるが、複数の凹凸構造３１Ｄの各々が、基板４の第３面４Ａと、互いに分離されたアイランド状のパターンとして基板４の第３面４Ａ上に形成されている複数の凸部３１Ｆとにより構成されている点で、図１～図６に示されるメタレンズ３とは異なる。図１１に示されるメタレンズ３では、複数の環状溝３１Ｅの各々の深さは、貫通孔３１Ｃの深さと等しい。

[0109] 図１２に示されるメタレンズ３は、図１～図６に示されるメタレンズ３と基本的に同様の構成を備えるが、導電体層３１の第１面３１Ａ及び第２面３１Ｂの各々に、複数の凹凸構造が形成されている点で、図１～図６に示されるメタレンズ３とは異なる。

[0110] 第２面３１Ｂに形成されている複数の凹凸構造３１Ｇは、例えば、第１面３１Ａと第２面３１Ｂとの中間点上に位置する仮想的な対称面に対して、第１面３１Ａ上に形成されている複数の凹凸構造３１Ｄと面対称の関係にある

。複数の凹凸構造３１Ｇは、第２面３１Ｂと、第２面３１Ｂに対して凹んでいる複数の環状溝３１Ｈとにより構成されている。異なる観点から言えば、導電体層３１には、複数の環状溝３１Ｈの底面から突出しており第２面３１Ｂを有する複数の凸部３１Ｉが形成されている。各凸部３１Ｉは、例えば第１面３１Ａと直交する方向において、各凸部３１Ｆと重なるように配置されている。第２面３１Ｂ、並びに、第２面３１Ｂ上に形成されている複数の環状溝３１Ｅの壁面及び底面が、基板４の第３面４Ａと接している。複数の環状溝３１Ｈ各々の幅は、複数の環状溝３１Ｅの幅Ｗ５と等しい。図１２に示されるメタレンズ３は、例えば複数の凸部３１Ｉが基板４の第３面４Ａの凹部内に形成された後、導電体層３１の残部が第３面４Ａ上に形成されることにより、製造され得る。

[0111] （実施の形態２）

[0112] 図１３を参照して、実施の形態２に係る光学システム１０２について説明する。実施の形態２に係る光学システム１０２は、実施の形態１に係る光学システム１０１と基本的に同様の構成を備え同様の効果を奏するが、メタレンズ３が、基板４の第３面４Ａ上に配置されておりかつ対象波長の光に位相差を与える位相格子を含む点で、光学システム１０１とは異なる。以下、光学システム１０２が光学システム１０１とは異なる点を主に説明する。

[0113] 光学システム１０２のメタレンズ３は導波路型位相格子を含む。光学システム１０２のメタレンズ３の集光原理は上記第２例である。

[0114] 図１３に示されるように、メタレンズ３は、第３面４Ａ上に互いに間隔を空けて配置されている複数の柱状体３２（凸部）と複数の柱状体３２間を満たしている充填部３３とにより構成されているメタサーフェス３Ｃを含む。複数の柱状体３２の各々を構成する材料の屈折率は、充填部３３を構成する材料の屈折率より高い。複数の柱状体３２の各々の外形状は、例えば円柱状である。複数の柱状体３２の各々の中心軸は、コア１Ａの中心軸Ｃ１と平行である。複数の柱状体３２の各々の中心軸は、例えば基板４の第３面４Ａと直交している。複数の柱状体３２を構成する材料、及び充填部３３を構成す

る材料は、それぞれの屈折率が上記関係を満たす限りにおいて特に制限されない。複数の柱状体３２を構成する材料は、例えば誘電体であり、より好ましくは無機材料であり、具体的な一例としてＳｉを含む。複数の柱状体３２の表面は、例えば充填部３３としての空気層に接している。なお、充填部３３は、誘電体膜によって構成されていてもよい。複数の柱状体３２の表面は、誘電体膜と接していてもよい。複数の柱状体３２は、充填部３３に埋め込まれていてもよい。

[0115] 図１３に示されるように、メタレンズ３は、対象波長の光に対して透明でありかつ基板４の第３面４Ａ上に配置されている基材３４をさらに含んでいてもよい。複数の柱状体３２の各々は基材３４に固定されていてもよい。なお、メタレンズ３は基材３４を含まず、複数の柱状体３２の各々は基板４の第３面４Ａに固定されていてもよい。

[0116] 複数の柱状体３２の各々は、対象波長の光が伝搬する導波路を形成している。複数の柱状体３２の各々に入射した光の位相は、各柱状体３２を伝搬する過程で変化する。各柱状体３２を伝搬する光の位相の変化量は、当該柱状体３２と隣り合う他の柱状体３２との間隔Ｐ（ピッチ）に対する当該柱状体３２の外径Ｄ（最大幅）の比率Ｄ／Ｐが大きいほど、多くなる。各導波路を通過した光の位相の空間分布に応じて、メタレンズ３の焦点Ｆ（図１５参照）の位置は変化する。そのため、各柱状体３２を伝搬する光の位相の変化量はメタレンズ３の焦点Ｆが配置されるべき位置に応じて任意に設定されればよい。

[0117] 光学システム１０２では、複数の柱状体３２の各々の外径及び高さ、並びに隣り合う２つの柱状体３２の間隔の少なくともいずれかが、焦点までの距離に応じて上記径方向に連続的または段階的に変化するように設けられている。

[0118] 図１４に示されるように、平面視において、柱状体３２の外径及び隣り合う２つの柱状体３２の間隔の少なくともいずれかは、焦点までの距離に応じて、連続的又は段階的に変化することが好ましい。より好ましくは、平面視

において、柱状体３２の外径及び隣り合う２つの柱状体３２の間隔の両方が、焦点までの距離に応じて、連続的又は段階的に変化する。好ましくは、平面視において、複数の柱状体３２の各々の外径は、メタレンズ３の焦点Ｆから離れるほど大きくなるように設けられている。好ましくは、平面視において、隣り合う２つの柱状体３２の間隔は、メタレンズ３の焦点Ｆから離れるほど小さくなるように設けられている。

[0119] 図１４及び図１５に示されるように、メタレンズ３は、位相の変化量が相対的に小さくなるように複数の柱状体３２が配置されている第１領域Ｒ１と、位相の変化量が相対的に大きくなるように複数の柱状体３２が配置されている第２領域Ｒ２とを含む。平面視において、第１領域Ｒ１は、第２領域Ｒ２よりも焦点Ｆに近い領域とされる。第２領域Ｒ２内に形成されている第２群の柱状体３２Ｂの間隔Ｐ２に対する第２群の柱状体３２Ｂの外径Ｄ２の比率Ｄ２／Ｐ２は、第１領域Ｒ１内に形成されている第１群の柱状体３２Ａの間隔Ｐ１に対する第１群の柱状体３２Ａの外径Ｄ１の比率Ｄ１／Ｐ１よりも大きい。これにより、第２群の柱状体３２Ｂの各々を伝搬した光ＴＬ２の位相の変化量は、第１群の柱状体３２Ａの各々を伝搬した光ＴＬ１の位相の変化量よりも多くなる。

[0120] なお、焦点Ｆがメタレンズ３の位相格子の中心軸Ｃ４と同一直線上に配置される場合、平面視において、柱状体３２の外径及び隣り合う２つの柱状体３２の間隔の少なくともいずれかが、中心軸Ｃ４までの距離に応じて、連続的又は段階的に変化していればよい。例えば、平面視において、複数の柱状体３２の各々の外径がメタレンズ３の中心軸Ｃ４から離れるほど大きくなり、かつ隣り合う２つの柱状体３２の間隔がメタレンズ３の中心軸Ｃ４から離れるほど小さくなるように設けられていてもよい。

[0121] 複数の柱状体３２の各々の外径は、対象波長以下である。複数の柱状体３２の各々の外径は、例えば数１０ｎｍ以上１μｍ以下である。隣り合う２つの柱状体３２の間隔は、対象波長以下である。隣り合う２つの柱状体３２の間隔は、例えば数１０ｎｍ以上１．５５μｍ以下である。なお、隣り合う２

つの柱状体３２の間隔とは、隣り合う２つの柱状体３２の中心軸間の距離を意味する。

[0122] 第２群の柱状体３２Ｂの高さＨ２は、例えば第１群の柱状体３２Ｂの高さＨ１よりも低い。なお、第２群の柱状体３２Ｂの高さＨ２は、例えば第１群の柱状体３２Ｂの高さＨ１と等しくてもよい。複数の柱状体３２の各々の高さの最大値は、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとを光学的に接続するための凸レンズの厚さよりも短い。複数の柱状体３２の各々の高さの最大値は、例えば２μｍ以下であり、１μｍ以下であってもよい。

[0123] なお、柱状体３２の外径及び高さ、並びに隣り合う２つの柱状体３２の間隔の少なくともいずれかが焦点までの距離に応じて連続的又は段階的に変化する構造には、図１４及び図１５に示されるように柱状体３２の外径及び高さ、並びに隣り合う２つの柱状体３２の間隔の少なくともいずれかが単調に変化する構造のみならず、このような構造を単位（以下、構造単位と記載する）として、当該構造単位が位相格子の中心軸Ｃ４に対する径方向に周期的に配置されている周期構造が含まれる。言い換えると、実施の形態２に係るメタレンズ３は、複数の柱状体３２の各々の高さ、最大幅、及びピッチの少なくともいずれかが連続的または段階的に変化する構造単位が上記径方向に周期的に配置されて成る周期構造を有していてもよい。

[0124] 光学システム１０２では、コア１Ａの第１端面１Ａ１とメタレンズ３との間の最短距離は、可能な限り短いことが好ましい。Ｓｉ導波路２Ａとメタレンズ３との間の最短距離は、可能な限り焦点距離ｆに近い値であることが好ましく、より好ましくは焦点距離ｆと等しい。

[0125] 光学システム１０２におけるコア１Ａの第１端面１Ａ１とＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１との間の光路長は、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとがポリマー導波路又は凸レンズによりを光学的に接続されている光学システムと比べて、短くなり得る。

[0126] なお、光学システム１０２においても、光の伝搬方向が制限されない。光は、光スポットサイズが相対的に大きいコア１Ａから、メタレンズ３を経て

、光スポットサイズが相対的に小さいＳｉ導波路２Ａへ伝搬してもよいし、これとは逆方向に、Ｓｉ導波路２Ａからメタレンズ３を経て、コア１Ａに伝搬してもよい。

[0127] 光学システム１０２のメタレンズ３の形成方法も特に制限されない。メタレンズ３の複数の柱状体３２は、誘電体膜が基板４の第３面４Ａ上に形成された後、当該誘電体膜がパターニングされることにより、形成されてもよい。例えば、基板４の第３面４Ａ上に形成された誘電体膜上にフォトレジストを塗布し、パターンを描画したマスク越しにフォトレジストを露光、現像した後、当該フォトレジストをマスクとして誘電体膜をエッチングすることにより形成されてもよい。また、複数の柱状体３２は、例えばスクリーン印刷法等によって形成されてもよい。

[0128] 光学システム１０２では、メタレンズ３の厚さ及び焦点深度によって制限されるコア１ＡとＳｉ導波路２Ａとの間の光路長は、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとを光学的に接続し得るポリマー導波路の光路長、又はコア１ＡとＳｉ導波路２Ａとを光学的に接続し得る凸レンズの厚さ及び焦点深度の和と比べて、短くなり得る。また、光学システム１０２では、凸レンズを備える光学システムと比べて、焦点位置の設計自由度が高く、焦点深度及び光の伝搬方向を容易に変更できる。

[0129] なお、光学システム１０２のメタレンズ３は、基板４の第３面４Ａ又は第４面４Ｂの上に配置されていればよい。

[0130] 上述のように、柱状体３２の外径及び高さ、並びに隣り合う２つの柱状体３２の間隔の少なくともいずれかが焦点までの距離に応じて連続的又は段階的に変化する構造には、図１４及び図１５に示されるように柱状体３２の外径及び高さ、並びに隣り合う２つの柱状体３２の間隔の少なくともいずれかが単調に変化する構造のみならず、このような構造を構造単位として、当該構造単位が位相格子の中心軸Ｃ４に対する径方向に周期的に配置されている周期構造が含まれる。各構造単位は、上記第１領域Ｒ１と、上記第２領域Ｒ２とを含む。

[0131] 図１４に示される構造単位が位相格子の中心軸Ｃ４に対する径方向に周期的に配置されている周期構造では、各構造単位においてそれぞれの柱状体３２の位相の変化量が０～２πの範囲内となるように、各構造単位の上記径方向の幅が設定されていてよい。また、図１４に示される各構造単位において、位相格子の中心軸Ｃ４に最も近い柱状体３２を伝搬した光の位相に対する位相格子の中心軸Ｃ４から最も離れた柱状体３２を伝搬した光の位相の変化量が２πになるように、各構造単位の上記径方向の幅が設定されていることが好ましい。この場合、各構造単位において上記位相の変化量が２πとなるために必要とされる各構造単位の上記径方向の幅は、中心軸Ｃ４から離れるにつれて狭くなる。例えば、上記周期構造に含まれる複数の構造単位のうち、位相格子の中心軸Ｃ４に最も近い位置にある第１構造単位の上記径方向の幅は、位相格子の中心軸Ｃ４に２番目に近い位置にある第２構造単位の上記径方向の幅よりも広く設定される。また、各構造単位において上記位相の変化量が２πとなるために必要とされる各構造単位の上記径方向の幅は、メタレンズ３の直径に応じて変化する。直径が１０μｍであるメタレンズ３においては、上記第１構造単位において上記位相の変化量が２πとなるために必要とされる当該第１構造単位の上記径方向の幅は、１．００μｍ以上３．５０μｍ以下であることが好ましい。直径が２０μｍであるメタレンズ３においては、上記第１構造単位において上記位相の変化量が２πとなるために必要とされる当該第１構造単位の上記径方向の幅は、２．００μｍ以上５．００μｍ以下であることが好ましい。直径が４０μｍであるメタレンズ３においては、上記第１構造単位において上記位相の変化量が２πとなるために必要とされる当該第１構造単位の上記径方向の幅は、３．００μｍ以上７．００μｍ以下であることが好ましい。

[0132] 位相格子を含むメタレンズ３の焦点距離ｆ（単位：ｎｍ）、当該メタレンズ３の集光角度θ_2、及び当該メタレンズ３の半径Ｒ（単位：ｎｍ）は、以下の関係式（２）を満たす。

[数3]

$$f = \frac{R}{tan\theta_2} \quad \cdot \cdot \cdot (2)$$

[0133] 図１６には、メタサーフェス３Ｃを備えるメタレンズ３の焦点距離ｆ、半径Ｒ、及び集光角度θ_2が図示されている。図１６に示される集光角度θ_2は、第１仮想直線ＶＬ１が第２仮想直線ＶＬ２に対して成す角度である。第１仮想直線ＶＬ１は、複数の柱状体３２のうち中心軸Ｃ４に対する径方向において最外に位置する柱状体３２を伝搬した光の進路を示している。第１仮想直線ＶＬ１は、上記径方向において最外に位置する柱状体３２の基板４の第３面４Ａ側に位置する最外端部と、Ｓｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２と第２端面２Ａ１との交点とを結ぶ仮想直線である。第２仮想直線ＶＬ２は、メタサーフェス３Ｃの中心軸Ｃ３と基板４の第３面４Ａとの交点と、Ｓｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２と第２端面２Ａ１との交点とを結ぶ仮想直線である。中心軸Ｃ４と中心軸Ｃ２とが同一直線上に配置されている場合、第２仮想直線ＶＬ２はこれらと同一直線上に配置される。

[0134] メタサーフェス３Ｃを備えるメタレンズ３の集光角度θ_2は、例えば２０°以上７０°以下であり、好ましくは３０°以上６０°以下である。好ましくは、上記第２仮想直線ＶＬ２の長さは、焦点距離ｆに等しい。集光角度θ_2が３０°以上６０°以下であれば、集光角度θ_2が７０°である場合と比べて、メタレンズ３の開口数ＮＡが小さくなり、焦点深度が深くなるため、光軸方向においてＳｉ導波路２Ａに対するメタレンズ３の位置を調整しやすい。なお、メタレンズ３の開口数ＮＡは、メタレンズ３の集光角度θ_2の正弦（Ｓｉｎθ_2）に、メタレンズ３とＳｉ導波路２Ａとの間に存在する媒質の屈折率ｎを乗じて算出される。

[0135] 光学システム１０２のメタレンズ３では、開口数ＮＡが０．５以上であることが好ましく、０．７以上であることがより好ましい。Ｓｉ導波路２Ａでは、コアを構成するＳｉとクラッドを構成するSiO_2との比屈折率差が大きいため、開口数（光の広がり）が大きいという特徴がある。メタレンズ３と

Ｓｉ導波路２Ａとの結合効率を高めるには、メタレンズ３の開口数ＮＡはＳｉ導波路２Ａの開口数と同程度に大きいことが好ましい。

[0136] ＜メタレンズの変形例＞

[0137] 以下、光学システム１０２のメタレンズ３の変形例を説明する。

[0138] 光学システム１０２において、複数の柱状体３２を構成する材料は、金属であってもよい。メタレンズ３の位相格子は、複数の誘電体導波路に代えて、複数のMIM導波路を含んでいてもよい。

[0139] （実施の形態３）

[0140] 図１７を参照して、実施の形態３に係る光学システム１０３について説明する。実施の形態３に係る光学システム１０３は、実施の形態２に係る光学システム１０２と基本的に同様の構成を備え同様の効果を奏するが、メタレンズ３が導波路型位相格子ではなく共鳴側位相格子を含む点で、光学システム１０２とは異なる。以下、光学システム１０３が光学システム１０２とは異なる点を主に説明する。

[0141] 図１７に示されるように、メタレンズ３は、第３面４Ａ上に互いに間隔を空けて配置されている複数の球状体３５（凸部）及び複数の球状体３５間を満たしている充填部３３を有するメタサーフェス３Ｄを含む。複数の球状体３５を構成する材料は、例えば誘電体である。充填部３３を構成する材料は、例えば空気である。充填部３３は、誘電体膜によって構成されていてもよい。複数の球状体３５の表面は、誘電体膜と接していてもよい。複数の球状体３５は、充填部３３に埋め込まれていてもよい。

[0142] 複数の球状体３５の各々は、対象波長の光とＭｉｅ共鳴するように設けられている。複数の球状体３５の各々に入射した光の位相は、光が共鳴により散乱する過程で変化する。球状体３５の外径Ｄが大きいほど、球状体３５と共鳴する光の周波数（共鳴周波数）は低くなり、各球状体３５と共鳴する光の波長（共鳴波長）が長くなる。各球状体３５に入射する光の波長が各球状体３５と共鳴する光の波長（共鳴波長）に対して長すぎない限りにおいて、各球状体３５と共鳴する光の波長（共鳴波長）が各球状体３５に入射する光

の波長よりも長いほど、各球状体３５で散乱された光の位相の変化量は多くなる。この場合、各球状体３５で散乱された光の位相の変化量は、当該球状体３５の外径Ｄが大きいほど、多くなる。

[0143] 各球状体３５で散乱した光の位相の空間分布に応じて、メタレンズ３の焦点Ｆ（図１８参照）の位置は変化する。そのため、各球状体３５にて散乱した光の位相の変化量はメタレンズ３の焦点Ｆが配置されるべき位置に応じて任意に設定されればよい。

[0144] 平面視において、球状体３５の外径は、焦点までの距離に応じて、連続的又は段階的に変化する。好ましくは、平面視において、複数の球状体３５の各々の外径は、メタレンズ３の焦点Ｆから離れるほど大きくなるように設けられている。

[0145] 図１８に示されるように、メタレンズ３は、位相の変化量が相対的に小さくなるように複数の球状体３５が配置されている第１領域Ｒ１と、位相の変化量が相対的に大きくなるように複数の球状体３５が配置されている第２領域Ｒ２とを含む。平面視において、第１領域Ｒ１は、第２領域Ｒ２よりも焦点Ｆに近い領域とされる。第２領域Ｒ２内に形成されている第２群の球状体３５の外径Ｄ２は、第１領域Ｒ１内に形成されている第１群の球状体３５Ａの外径Ｄ１よりも大きい。これにより、第２群の球状体３５Ｂの各々にて散乱した光ＴＬ２の位相の変化量は、第１群の球状体３５Ａの各々にて散乱した光ＴＬ１の位相の変化量よりも多くなる。

[0146] なお、焦点Ｆがメタレンズ３の位相格子の中心軸Ｃ４と同一直線上に配置される場合、平面視において、球状体３５の外径が、中心軸Ｃ４までの距離に応じて、連続的又は段階的に変化していればよい。

[0147] 複数の球状体３５の各々の外径は、対象波長以下である。複数の球状体３５の各々の外径は、例えば数１０ｎｍ以上１μｍ以下である。

[0148] 光学システム１０３では、コア１Ａの第１端面１Ａ１とメタレンズ３との間の最短距離は、可能な限り短いことが好ましい。Ｓｉ導波路２Ａとメタレンズ３との間の最短距離は、可能な限り焦点距離ｆに近い値であることが好

ましく、より好ましくは焦点距離ｆと等しい。

[0149] 光学システム１０３におけるコア１Ａの第１端面１Ａ１とＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１との間の光路長は、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとがポリマー導波路又は凸レンズによりを光学的に接続されている光学システムと比べて、短くなり得る。

[0150] なお、光学システム１０３においても、光の伝搬方向が制限されない。光は、光スポットサイズが相対的に大きいコア１Ａから、メタレンズ３を経て、光スポットサイズが相対的に小さいＳｉ導波路２Ａへ伝搬してもよいし、これとは逆方向に、Ｓｉ導波路２Ａからメタレンズ３を経て、コア１Ａに伝搬してもよい。

[0151] 光学システム１０３のメタレンズ３の形成方法も特に制限されない。メタレンズ３の複数の球状体３５は、例えば公知のナノ粒子の製造方法により形成され得る。

[0152] 光学システム１０３では、メタレンズ３の厚さ及び焦点深度によって制限されるコア１ＡとＳｉ導波路２Ａとの間の光路長は、コア１ＡとＳｉ導波路２Ａとを光学的に接続し得るポリマー導波路の光路長、又はコア１ＡとＳｉ導波路２Ａとを光学的に接続し得る凸レンズの厚さ及び焦点深度の和と比べて、短くなり得る。また、光学システム１０３では、凸レンズを備える光学システムと比べて、焦点位置の設計自由度が高く、焦点深度及び光の伝搬方向を容易に変更できる。

[0153] なお、光学システム１０３のメタレンズ３は、基板４の第３面４Ａ又は第４面４Ｂの上に配置されていればよい。

[0154] ＜メタレンズの変形例＞

[0155] 光学システム１０３において、複数の球状体３５を構成する材料は、金属であってもよい。この場合、複数の球状体３５の各々は、対象波長の光とプラズモン共鳴するように設けられている。複数の球状体３５の各々に入射した光の位相は、光が各球状体３５と共鳴するにより散乱される過程で変化する。金属により構成されている球状体３５についても、誘電体により構成さ

れている球状体３５と同様に、球状体３５の外径Ｄが大きいほど光の位相の変化量が多くなる。つまり、球状体３５で散乱した光の位相が変化する原理は球状体３５を構成する材料に応じて異なるが、球状体３５の外径Ｄが大きいほど光の位相の変化量が多くなる傾向は球状体３５を構成する材料によらず同じである。

[0156] 光学システム１０３のメタレンズ３も、光学システム１０２のメタレンズ３と同様に変形され得る。球状体３５の外径及び高さ、並びに隣り合う２つの球状体３５の間隔の少なくともいずれかが焦点までの距離に応じて連続的又は段階的に変化する構造には、球状体３５の外径及び高さ、並びに隣り合う２つの球状体３５の間隔の少なくともいずれかが単調に変化する構造のみならず、このような構造を構造単位として、当該構造単位が位相格子の中心軸Ｃ４に対する径方向に周期的に配置されている周期構造が含まれる。

[0157] （実施の形態４）

[0158] 図１９を参照して、実施の形態４に係る光学システム１０４について説明する。実施の形態４に係る光学システム１０４は、実施の形態１～３のいずれかの光学システム１０１～１０３と基本的に同様の構成を備え同様の効果を奏するが、第２導波路が細線導波路ではなく、フォトニック結晶導波路である点で、光学システム１０１～１０３とは異なる。以下、光学システム１０４が光学システム１０１～１０３とは異なる点を主に説明する。

[0159] フォトニクス素子２は、結晶スラブ２Ｄと、第１クラッド層２Ｂ１及び第２クラッド層２Ｂ２とを含む。第２導波路は、結晶スラブ２Ｄの一部分である。結晶スラブ２Ｄは、複数の貫通孔２Ｅが形成されている２つの領域２Ｄ１，２Ｄ２、及び、この２つの領域２Ｄ１，２Ｄ２に挟まれており複数の貫通孔２Ｅが形成されていない領域２Ｄ３を有している。結晶スラブ２Ｄを構成する材料は、例えばポリテトラフルオロエチレン（ＰＴＦＥ）、ポリイミド、及び環状オレフィンポリマー（ＣＯＰ）からなる群から選択される少なくともいずれかを含む。

[0160] 複数の貫通孔２Ｅの開口形状は、例えば円形状である。複数の貫通孔２Ｅ

の各々の中心は、正六角格子の格子点を成すように配置されている。複数の貫通孔２Ｅの各々の孔径及び隣り合う２つの貫通孔２Ｅの間隔は、対象波長の光が領域２Ｄ１及び領域２Ｄ２を伝搬しないように設けられている。異なる観点から言えば、複数の貫通孔２Ｅの各々の孔径及び隣り合う２つの貫通孔２Ｅの間隔は、貫通孔２Ｅが形成されていない領域２Ｄ３がフォトニック結晶導波路を成すように設けられている。

[0161] 第１クラッド層２Ｂ１及び第２クラッド層２Ｂ２は、結晶スラブ２Ｄを挟むように配置されている。第１クラッド層２Ｂ１及び第２クラッド層２Ｂ２の各々を構成する材料の屈折率は、結晶スラブ２Ｄを構成する材料よりも屈折率よりも低い。第１クラッド層２Ｂ１及び第２クラッド層２Ｂ２の各々を構成する材料は、例えばSiO_2を含む。なお、第１クラッド層２Ｂ１及び第２クラッド層２Ｂ２の一方又は両方は、空気層であってもよい。

[0162] 光学システム１０４は、例えばテラヘルツ波を伝搬するように設けられている。光学システム１０４の対象波長は、例えば３０μｍ以上３ｍｍ以下である。光ファイバ１は、金属中空光ファイバであって、中空部１Ｃと、金属層１Ｄと、クラッド１Ｂとを含んでいてもよい。中空部１Ｃは、空気によって満たされている。金属層１Ｄは、中空部１Ｃに面している内周面とクラッド１Ｂの内周面と接している外周面とを有している。金属層１Ｄを構成する材料は、特に制限されないが、例えば銀（Ａｇ）を含む。金属層１Ｄの厚さは、例えば数ｎｍ以上数１００ｎｍ以下である。金属層１Ｄの外径は、例えば１ｍｍ以下である。

[0163] なお、光学システム１０４においても、光の伝搬方向が制限されない。光は、光スポットサイズが相対的に大きいコア１Ａから、メタレンズ３を経て、光スポットサイズが相対的に小さいＳｉ導波路２Ａへ伝搬してもよいし、これとは逆方向に、Ｓｉ導波路２Ａからメタレンズ３を経て、コア１Ａに伝搬してもよい。

[0164] 上述のように、光学システム１０４は、テラヘルツ波を伝搬するための光学システムに好適である。この場合、結晶スラブ２Ｄを構成する材料は、上

述のようにポリテトラフルオロエチレン（ＰＴＦＥ）、ポリイミド、及び環状オレフィンポリマー（ＣＯＰ）からなる群から選択される少なくともいずれかを含む。他方、光学システム１０４が伝搬する光は、テラヘルツ波に限られない。光学システム１０４の対象波長はテラヘルツ波よりも短くてもよく、この場合、結晶スラブ２Ｄを構成する材料は、Ｓｉであってもよい。

[0165] （実施の形態５）

[0166] 図２０を参照して、実施の形態５に係る光学システム１０５について説明する。実施の形態５に係る光学システム１０５は、実施の形態１～３のいずれかの光学システム１０１～１０３と基本的に同様の構成を備え同様の効果を奏するが、Ｓｉ導波路２Ａが細線導波路ではなく、リブ型導波路である点で、光学システム１０１～１０３とは異なる。以下、光学システム１０５が光学システム１０１～１０３とは異なる点を主に説明する。

[0167] Ｓｉ導波路２Ａは、Ｓｉ基板２Ｃ、第１クラッド層２Ｂ１、Ｓｉ導波路２Ａ、及び第２クラッド層２Ｂ２の積層方向、並びにＳｉ導波路２Ａの延在方向の各々と直交する方向の幅が相対的に広いスラブ部２１と、スラブ部２１から第１クラッド層２Ｂ１とは反対側に突出しており当該方向の幅が相対的に狭いリッジ部２２とを有している。光学システム１０５では、リッジ部２２及びリッジ部２２の近傍に位置するスラブ部２１の一部分が、Ｓｉ導波路２Ａを構成する。

[0168] なお、光学システム１０５においても、光の伝搬方向が制限されない。光は、光スポットサイズが相対的に大きいコア１Ａから、メタレンズ３を経て、光スポットサイズが相対的に小さいＳｉ導波路２Ａへ伝搬してもよいし、これとは逆方向に、Ｓｉ導波路２Ａからメタレンズ３を経て、コア１Ａに伝搬してもよい。

[0169] 光学システム１０５において、フォトニクス素子２は、ＰＩＮ構造を有していてもよい。具体的には、スラブ部２１とリッジ部２２との積層方向から視て、スラブ部２１は、リッジ部２２に対して一方の側に形成されているｐ型不純物領域と、リッジ部２２に対して他方の側に形成されているｎ型不純

物領域とを有していてもよい。この場合、フォトニクス素子２は、ｐ型不純物領域と電気的に接続されている電極と、ｎ型不純物領域と電気的に接続されている電極とをさらに含んでいればよい。

[0170] （実施の形態６）

[0171] 図２１を参照して、実施の形態６に係る光学システム１０６について説明する。実施の形態６に係る光学システム１０６は、実施の形態１～５のいずれかの光学システム１０１～１０５と基本的に同様の構成を備え同様の効果を奏するが、光ファイバ１が複数のコア１Ａを含み、かつメタレンズ３が複数のメタサーフェス３Ｅを含む点で、光学システム１０１～１０５とは異なる。以下、光学システム１０６が光学システム１０１～１０５とは異なる点を主に説明する。

[0172] 光ファイバ１は、マルチコアファイバである。複数のコア１Ａの各々は、例えばシングルモードファイバである。平面視において、複数のコア１Ａは、互いに間隔を空けて配置されている。クラッド１Ｂは、複数のコア１Ａ間を隔てている。平面視における複数のコア１Ａの配列は、制限されない。図２１に示される複数のコア１Ａは、光ファイバ１の中心軸Ｃ１に対して互いに回転対称の関係にある。なお、平面視において、複数のコア１Ａは、各コア１Ａの中心軸が正方格子、三角格子、又は六角格子の格子点を成すように配置されていてもよい。また、複数のコア１Ａは、光ファイバ１の中心軸Ｃ１に対して互いに回転対称の関係になくてもよい。

[0173] 複数のコア１Ａの各々は、例えば互いに同等の特性を有している。なお、複数のコア１Ａは、互いに異なる特性を有していてもよい。例えば、光ファイバ１が、平面視において光ファイバ１の中心軸Ｃ１上に配置されている中央コアと、中心コアの周囲に配置されており互いに回転対称の関係にある複数の周辺コアとを含む場合、中央コアのコア径が各周辺コアのコア径よりも大きくてもよい。

[0174] 各コア１Ａの第１端面１Ａ１の寸法（コア径Ｗ１）は、第２導波路の第２端面２Ａ１の幅Ｗ２及び厚さＴ０の各々よりも大きい。各コア径Ｗ１は、１

μｍ以上２０μｍ以下であり、好ましくは５μｍ以上１０μｍ以下である。

[0175] メタレンズ３は、複数のコア１Ａの各々から出射した光を、１つの第２導波路（例えばＳｉ導波路２Ａ）に集光する。複数のメタサーフェス３Ｅの各々には、１つのコア１Ａから出射した光が入射する。複数のメタサーフェス３Ｅから出射した光は、いずれもＳｉ導波路２Ａに入射する。つまり、各メタサーフェス３Ｅは、１つのコア１ＡとＳｉ導波路２Ａとの間を光学的に接続している。

[0176] 複数のメタサーフェス３Ｅの各々は、上述したメタサーフェス３Ａ、メタサーフェス３Ｂ、メタサーフェス３Ｃ、及びメタサーフェス３Ｄのいずれかである。複数のメタサーフェス３Ｅの各々は、各メタサーフェス３Ｅから出射した光がＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１で焦点を結ぶように設けられている。具体的には、各メタサーフェス３Ｅから出射する光の伝搬方向が、各メタサーフェス３Ｅから出射した光がＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１で焦点を結ぶように設定されている。

[0177] 平面視における複数のメタサーフェス３Ｅの配列は、複数のコア１Ａの配列に応じて設定される。図２１に示される複数のメタサーフェス３Ｅは、光ファイバ１の中心軸Ｃ１に対して互いに回転対称の関係にある。複数のメタサーフェス３Ｅの回転対称軸をメタレンズ３の中心軸とすると、メタレンズ３の中心軸は光ファイバ１の中心軸Ｃ１と同一直線上に配置される。

[0178] なお、平面視において、複数のメタサーフェス３Ｅは、各メタサーフェス３Ｅの中心が正方格子、三角格子、又は六角格子の格子点を成すように配置されていてもよい。また、複数のメタサーフェス３Ｅは、光ファイバ１の中心軸Ｃ１に対して互いに回転対称の関係になくてもよい。

[0179] 各メタサーフェス３Ｅの複数の電磁波散乱体は、例えば第１端面と第２端面との間の光の伝搬方向に対して直交する方向に配列している。各メタサーフェス３Ｅがメタサーフェス３Ａである場合、各メタサーフェス３Ａの複数の凹凸構造３１Ｄは、例えばコア１Ａの中心軸Ｃ１及びＳｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２と直交する方向に配列している。各メタサーフェス３Ａの貫通孔３

１Ｃの中心軸は、例えばコア１Ａの中心軸Ｃ１及びＳｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２と平行である。各メタサーフェス３Ｅがメタサーフェス３Ｃ又はメタサーフェス３Ｄである場合、複数の柱状体３２又は複数の球状体３５は、例えばコア１Ａの中心軸Ｃ１及びＳｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２と直交する方向に配列している。

[0180] 図２２は、複数のメタサーフェス３Ｅの各々がブルズアイ構造のメタサーフェス３Ａであって、平面視において各メタサーフェス３Ｅの中心が正方格子の格子点を成すように配置されている構成例を示している。各メタサーフェス３Ｅ（３Ａ）の中心とは、各メタサーフェス３Ｅの外形線の中心を意味する。複数のメタサーフェス３Ｅ（３Ａ）は、例えば１つの導電体層３１に形成されており、１つの基板４によって支持されている。

[0181] なお、複数のメタサーフェス３Ｅの各々は、互いに異なる導電体層３１に形成されていてもよい。複数のメタサーフェス３Ｅの各々は、互いに異なる基板４に支持されていてもよい。

[0182] 図２２に示されるメタレンズ３においても、各メタサーフェス３Ｅ（３Ａ）からＳｉ導波路２Ａに向けて出射する光の伝搬方向は、各メタサーフェス３Ｅ（３Ａ）から出射した光がＳｉ導波路２Ａの第２端面２Ａ１で焦点を結ぶように設定されている。

[0183] 図２２に示されるように、平面視において、各メタサーフェス３Ｅ（３Ａ）の貫通孔３１Ｃの中心軸は、当該メタサーフェス３Ｅ（３Ａ）の中心に対して焦点Ｆとは反対側には配置されている。平面視において、各メタサーフェス３Ｅ（３Ａ）の貫通孔３１Ｃの中心軸は、当該メタサーフェス３Ｅ（３Ａ）の中心と焦点Ｆとを結ぶ仮想直線上に配置されていてもよい。平面視において、１つのメタサーフェス３Ｅ１の貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ５は、メタサーフェス３Ｅ１の中心Ｃ６と焦点Ｆとを結ぶ仮想直線上に配置されていてもよい。平面視において、メタサーフェス３Ｅ１よりも焦点Ｆから遠いメタサーフェス３Ｅ２の貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ７は、メタサーフェス３Ｅ２の中心Ｃ８と焦点Ｆとを結ぶ仮想直線上に配置されていてもよい。メタサーフ

ェス３Ｅ２の上記仮想直線は、メタサーフェス３Ｅ１の仮想直線と同一直線上に配置されていてもよい。

[0184] 図２２に示されるように、平面視において、各メタサーフェス３Ｅ（３Ａ）の中心と当該メタサーフェス３Ｅ（３Ａ）の貫通孔３１Ｃの中心軸との間の距離は、メタサーフェス３Ｅの中心とメタレンズ３の焦点Ｆとの間の距離が短いほど、短くてもよい。メタサーフェス３Ｅ１の貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ５とメタサーフェス３Ｅ１の中心Ｃ６との間の距離は、メタサーフェス３Ｅ２の貫通孔３１Ｃの中心軸Ｃ７とメタサーフェス３Ｅ２の中心Ｃ８との間の距離よりも短くてもよい。

[0185] なお、光学システム１０６においても、光の伝搬方向が制限されない。光は、光スポットサイズが相対的に大きい複数のコア１Ａの各々から、メタレンズ３の各メタサーフェス３Ｅを経て、光スポットサイズが相対的に小さいＳｉ導波路２Ａへ伝搬してもよいし、これとは逆方向に、Ｓｉ導波路２Ａからメタレンズ３の各メタサーフェス３Ｅを経て、複数のコア１Ａの各々に伝搬してもよい。

[0186] ＜光学システムの変形例＞

[0187] 光学システム１０６において、各メタサーフェス３Ｅの複数の電磁波散乱体は、第１端面と第２端面との間の光の伝搬方向に対して鈍角または鋭角を成して傾斜する方向に配列していてもよい。各メタサーフェス３Ｅがメタサーフェス３Ａである場合、各メタサーフェス３Ａの複数の凹凸構造３１Ｄは、例えばコア１Ａの中心軸Ｃ１及びＳｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２に対して鈍角または鋭角を成して傾斜する方向に配列していてもよい。各メタサーフェス３Ｅがメタサーフェス３Ｃ又はメタサーフェス３Ｄである場合、複数の柱状体３２又は複数の球状体３５は、コア１Ａの中心軸Ｃ１及びＳｉ導波路２Ａの中心軸Ｃ２と鈍角又は鋭角を成す方向に配列していてもよい。このような場合であって、各メタサーフェス３Ｅが互いに異なる基板４に支持されている場合には、各メタサーフェス３Ｅと各コア１Ａの第１端面１Ａ１との間の距離は可能な限り短くかつ互いに等しく設定されてもよい。

[0188] 光学システム１０６では、フォトニクス素子２が複数の第２導波路を含んでいてもよい。第２導波路の数は、第１導波路の数以下であればよい。図２３に示されるように、第２導波路の数は、第１導波路の数と等しくてもよい。複数のコア１Ａの各々から出射した光は、互いに異なるメタサーフェス３Ｅを経て、互いに異なるＳｉ導波路２Ａに入射してもよい。つまり、光学システム１０６は、光学システム１０１～１０５において実現される光学系（１つの第１導波路と１つの第２導波路とが１つのメタレンズ（メタサーフェス３Ｅ）を介して光学的に接続されてなる光学系）を複数セット備えていてもよい。光学システム１０６において、複数の光学系は、互いに同等の構成を有していてもよいし、互いに異なる構成を有していてもよい。複数の光学系の配列は、特に制限されないが、例えば水平方向に並んで配置されていてもよい。

[0189] （実施の形態７）

[0190] 図２４を参照して、実施の形態７に係る光学システム１０７について説明する。実施の形態７に係る光学システム１０７は、実施の形態１～６のいずれかの光学システム１０１～１０６に加え、情報出力部２０１及び情報入力部２０２をさらに備える点で、光学システム１０１～１０６とは異なる。以下、光学システム１０７が光学システム１０１～１０６とは異なる点を主に説明する。

[0191] 情報出力部２０１は、例えば、電子回路と、電子回路を流れる電気信号に応じた光信号を出力する光電変換部（すなわち、光源）と、光電変換部から出力された光信号の位相変調を行う光変調器と、光変調器にて位相変調された光を集光する集光要素とを含む。情報入力部２０２は、例えば、光変調器と、光電変換部と、電子回路とを含む。

[0192] 光学システム１０７では、図２４に示されるように、光学システム１０１～１０６のいずれかのコア１Ａが光信号を出力する情報出力部２０１と光学的に接続され、Ｓｉ導波路２Ａは光信号が入力される情報入力部２０２と光学的に接続されていてもよい。この場合、コア１Ａは、情報出力部２０１の

集光要素と光学的に接続されている。コア１Ａには、集光要素にて集光された光が入射する。Ｓｉ導波路２Ａは、情報入力部２０２の光変調器と光学的に接続されている。Ｓｉ導波路２Ａから出射した光は、情報入力部２０２の光変調器にて位相変調された後、光電変換部にて電子信号に変換され、電子回路に送信される。

[0193] つまり、図２４に示される光学システム１０７では、信号が、情報出力部２０１の電子回路、光電変換部、光変調器、集光要素、光学システム１０１～１０６のいずれかのコア１Ａ、メタレンズ３、Ｓｉ導波路２Ａ、情報入力部２０２の光変調器、光電変換部、及び電子回路、を順に伝わる。

[0194] 他方、光学システム１０７では、図２５に示されるように、光学システム１０１～１０６のいずれかのＳｉ導波路２Ａが情報出力部２０１と光学的に接続され、コア１Ａ号が情報入力部２０２と光学的に接続されていてもよい。この場合、Ｓｉ導波路２Ａは、情報出力部２０１の光変調器と光学的に接続されている。コア１Ａは、情報入力部２０２の集光要素と光学的に接続されている。

[0195] つまり、図２５に示される光学システム１０７では、信号が、情報出力部２０１の電子回路、光電変換部、光変調器、光学システム１０１～１０６のいずれかのＳｉ導波路２Ａ、メタレンズ３、コア１Ａ、情報入力部２０２の集光要素、光変調器、光電変換部、及び電子回路、を順に伝わる。

[0196] なお、情報出力部２０１は、少なくとも光信号を出力する光源を含んでいればよい。また、情報出力部２０１は、集光要素として、光学レンズを含んでいてもよいし、光学システム１０１～１０６のメタレンズ３を含んでいてもよい。

[0197] ＜実験例＞

[0198] 以下に、上述した各メタレンズの光学特性の評価結果を、図面も参照して説明する。

[0199] ＜間隔Ｐが互いに異なる、ブルズアイ構造のメタサーフェスを有するメタレンズの集光性能＞

[0200] （１）実験例１～８

[0201] 実験例１～７として、図３に示される平面構造を有し、かつ図１１に示される断面構造を有する、ブルズアイ構造のメタサーフェスを有するメタレンズを作製した。具体的には、ガラス基板上に電子線レジスト（ＮＥＢ－２２）をスピンコートで塗布し、電子ビーム描画装置（ＥＬＳ－Ｆ１２５ＨＳ、ＥＬＩＯＮＩＸ社）を用いて電子線レジストに露光すし、複数のレジストパターンを同心円状に形成した。複数のレジストパターンの間隔は１５５０ｎｍ、１３１０ｎｍ、１０００ｎｍ、または９００ｎｍとした。マグネトロンスパッタコーター（Ｑ－１５０ＴＥＳ、Ｑｕｏｒｕｍ　Ｔｅｃｈｎｏｌｏｇｉｅｓ社）を用いて、スパッタリング法によって、ガラス基板上に銀からなる導電膜を形成した。その後、ガラス基板上の導電膜をジメチルアセトアミド溶液に浸漬させ、レジストパターン上の余分な導電膜をリフトオフした。このようにして、図１１に示される断面構造を有し、かつ複数の凹凸構造３１Ｄの各々の間隔Ｐがレジストパターンの上記間隔に応じて互いに異なる実験例１～７のメタレンズ３を作製した。さらに、ガラス基板のみからなる実験例８を準備した。

[0202] なお、実験例１～７の各々について、複数の凹凸構造３１Ｄの各々の間隔Ｐに対する複数の環状溝３１Ｅの各々の幅（Ｗ５）の比率（Ｗ５／Ｐ）は、５０％とした。また、実験例１～７の各々について、貫通孔３１Ｃの孔径（Ｗ３）は、上記幅（Ｗ５）と同等とした。

[0203] （２）集光性能の評価方法

[0204] 実験例１～８の各々に、波長１５５０ｎｍ及び１３１０ｎｍの光（直線偏光）をコリメート光となるように照射した。実験例１～７については、光が貫通孔３１Ｃに集光されるように照射した。メタレンズから出射された光を、対物レンズを用いてイメージセンサに結像させ、得られた画像から、直線偏光の偏光面上での広がり角度Ｘと、直線偏光の偏光面と直交する平面上での広がり角度Ｙとを評価した。

[0205] 各サンプルの集光性能を、上記広がり角度Ｘ、Ｙに対して以下の基準に基

づいて評価した。

Ｓ：４．００°未満

Ａ：４．００°以上５．５０°未満

Ｂ：５．５０°以上７．５０°未満

Ｃ：７．５０°以上９．００°未満

Ｄ：９．００°以上

[0206] （３）評価結果

評価結果を表１に示す。

[表1]

	間隔Ｐ (nm)	入射波長λ (nm)	比率 Ｐ／λ	集光特性	
				広がり角度Ｘ	広がり角度Ｙ
実験例１	1550	1310	1.18	A	A
実験例２	1310	1310	1.00	A	A
実験例３	1310	1550	0.85	A	S
実験例４	1000	1310	0.76	A	S
実験例５	900	1310	0.69	B	A
実験例６	1000	1550	0.65	B	B
実験例７	900	1550	0.58	C	B
実験例８	—	1550	—	D	D

[0207] 表１に示されるように、実験例１～７では、実験例８と比べて、広がり角度Ｘ及びＹが小さく、高い集光性能を示すことが確認された。比率Ｐ／λが０．５８よりも高い実験例１～６では、比率Ｐ／λが０．５８である実験例７と比べて、広がり角度Ｘ及びＹが小さく、さらに高い集光性能を示すことが確認された。比率Ｐ／λが０．６５よりも高い実験例１～５では、比率Ｐ／λが０．６５である実験例６と比べて、広がり角度Ｙが小さく、さらに高い集光性能を示すことが確認された。比率Ｐ／λが０．６９よりも高い実験例１～４では、比率Ｐ／λが０．６９である実験例５と比べて、広がり角度Ｘ及びＹが小さく、さらに高い集光性能を示すことが確認された。比率Ｐ／

λが０．５８よりも高く１．００よりも低い実験例３～７では、広がり角度Ｙが広がり角度Ｘよりも小さい傾向が確認された。比率Ｐ／λが１．００よりも高い実験例１～２では、広がり角度Ｘが広がり角度Ｙと同程度に小さい傾向が確認された。広がり角度Ｙは、比率Ｐ／λが０．６９よりも大きく１．００よりも小さい実験例３，４において最も小さかった。

[0208] ＜比率Ｗ５／Ｐが異なるブルズアイ構造のメタサーフェスを有するメタレンズの集光性能＞

[0209] （４）実験例９～１３、及び実験例９～１３の集光性能の評価方法

[0210] 実験例９～１３として、電磁気学計算ソフトＭＥＥＰを用いて、図３に示される平面構造を有し、かつ図１１に示される断面構造を有する、ブルズアイ構造のメタサーフェスを有するメタレンズをデザインした。実験例９～１３は、それぞれの間隔Ｐが１５５０ｎｍで共通とし、複数の環状溝３１Ｅの各々の幅Ｗ５のみが互いに異なるものとした。つまり、実験例９～１３は、比率Ｗ５／Ｐが互いに異なるものとした。

[0211] 各実験例の集光性能として、上記計算ソフトを用いて各実験例に波長が１５５０ｎｍである平面波を入射した際の透過強度、反射強度、及び構造周辺の電場強度をシミュレーションし、算出された各実験例の反射強度に対する透過強度の比率を、以下の基準に基づいて評価した。

Ｓ：０．４０以上

Ａ：０．２０以上０．４０未満

Ｂ：０．０４以上０．２０未満

[0212] （５）評価結果

評価結果を表２に示す。

[表2]

	実験例 9	実験例 10	実験例 11	実験例 12	実験例 13
比率　W5／P	87.5%	75.0%	50.0%	43.0%	34.0%
透過強度／反射強度の比率	S	S	A	B	B

[0213] 表２に示されるように、比率Ｗ５／Ｐが．３４．０％以上である実験例９

～１３の反射強度に対する透過強度の比率は、０．０４以上であった。比率Ｗ５／Ｐが４３．０％よりも高い実験例９～１１の反射強度に対する透過強度の比率は、０．２０以上であり、比率Ｗ５／Ｐが４３．０％以下である実験例１２，１３のそれと比べて高いことが確認された。つまり、比率Ｗ５／Ｐが４３．０％よりも高い実験例９～１１の集光性能は、比率Ｗ５／Ｐが４３．０％以下である実験例１２，１３のそれと比べて高いことが確認された。比率Ｗ５／Ｐが５０．０％よりも高い実験例９，１０の反射強度に対する透過強度の比率は、０．４０以上であり、比率Ｗ５／Ｐが５０．０％である実験例１１のそれと比べて、さらに高いことが確認された。つまり、比率Ｗ５／Ｐが５０．０％よりも高い実験例９，１０の集光性能は、比率Ｗ５／Ｐが５０．０％である実験例１１のそれと比べて、さらに高いことが確認された。

[0214] ＜断面構造の異なるブルズアイ構造のメタサーフェスを有するメタレンズの集光性能＞

[0215] （６）実験例１４，１５、及び実験例１４，１５の集光性能の評価方法

[0216] 実験例１４，１５として、電磁気学計算ソフトＭＥＥＰを用いて、図３に示される平面構造を有し、かつ図２に示される断面構造または図１１に示される断面構造を有する、ブルズアイ構造のメタサーフェスを有するメタレンズをデザインした。実験例１４のメタサーフェスの断面構造は図１１に示される構造とし、実験例１５のメタサーフェスの断面構造は図２に示される構造とした。実験例１４，１５のその他の構成は互いに同等とした。実験例１４，１５のそれぞれの間隔Ｐは１５５０ｎｍ、それぞれの比率Ｗ５／Ｐは１００％とした。

[0217] 各実験例の集光性能として、上記電磁気学計算ソフトを用いて各実験例に波長が１３００ｎｍ～１９００ｎｍの範囲内の平面波を入射した際の透過スペクトル及び反射スペクトルをシミュレーションし、上記シミュレーションにより算出された各実験例の反射強度及び透過強度に基づいて、透過特性及び反射特性を以下の基準に基づいて評価した。なお、各強度は、規格化され

た強度（任意単位ａ．ｕ．）とした。

透過特性の評価基準Ａ：強度０．０４以上のピークが存在

透過特性の評価基準Ｓ：強度０．１０以上のピークが存在

反射特性の評価基準Ａ：上記波長域の全体にわたって強度が０．０４未満

反射特性の評価基準Ｓ：上記波長域の全体にわたって強度が０．０１未満

[0218] （７）評価結果

評価結果を表３に示す。

[表3]

	透過	反射
実験例14	S	A
実験例15	A	S

[0219] 表３に示されるように、実験例１４，１５では、透過強度が十分に高く、かつ反射強度が十分に低いため、良好な集光性能を有していることが確認された。

[0220] ＜複数の凹凸構造の各々の中心が貫通孔の中心と重ならないように配置されているブルズアイ構造のメタサーフェスを有するメタレンズの集光性能＞

[0221] （８）実験例１６～２１、及び実験例１６～２１の集光性能の評価方法

[0222] 実験例１６～２１として、電磁気学計算ソフトＭＥＥＰを用いて、図９に示される平面構造を有し、かつ図１１に示される断面構造を有する、ブルズアイ構造のメタサーフェスを有するメタレンズをデザインした。実験例１６～２１の各々について、上記第１間隔ＰＡは１５５０ｎｍで共通とし、上記比率Ｗ５Ａ／ＰＡは５０％で共通とし、単位シフト量Ｓのみを段階的に変更させた。

[0223] 各実験例の集光性能として、上記電磁気学計算ソフトを用いて各実験例に波長が１５５０ｎｍである平面波を入射した際に各実験例から出射される光の出射角度を算出した。

[0224] （９）評価結果

評価結果を表４に示す。なお、表４では、単位シフト量Ｓ（単位：ｎｍ）を

、第１間隔ＰＡを用いた比率として記載する。

[表4]

	実験例16	実験例17	実験例18	実験例19	実験例20	実験例21
単位シフト量S(nm)	PA/16	PA/12	PA/8	PA/6	PA/5	PA/4
光の出射角度Θ_1(°)	3	7	16	20	30	40

[0225] 表４に示されるように、単位シフト量Ｓが多くなるほど、光の出射角度が大きくなることが確認された。単位シフト量ＳがＰＡ／１６ｎｍである実験例１６では出射角度が３°であった。単位シフト量ＳがＰＡ／８ｎｍである実験例１８では出射角度が１６°であった。単位シフト量ＳがＰＡ／４ｎｍである実験例１８では出射角度が４０°であった。単位シフト量Ｓに応じて、図９に示されるメタレンズから出射される光の出射角度を適宜設定できることが確認された。

[0226] また、実験例１７～２１では、出射角度θ_1が５°以上である場合、間隔Ｐ（単位：ｎｍ）及び距離Ｓ（単位：ｎｍ）が以下の関係式（１）を満足することが確認された。

[0227] ＜周期構造を有する位相格子を含むメタレンズの集光特性＞

[0228] （１０）実験例２２～２４、及び実験例２２～２４の集光性能の評価方法

[0229] 実験例２２～２４として、電磁気学計算ソフトＭＥＥＰを用いて、位相格子を含むメタレンズであって、図１１に示される構造単位が中心軸に対する径方向に周期的に配置されている周期構造を含み、メタレンズの直径が互いに異なるメタレンズをデザインした。実験例２２のメタレンズの直径は１０μｍ、実験例２３のメタレンズの直径は２０μｍ、実験例２４のメタレンズの直径は４０μｍとした。実験例２２～２４について、それぞれの柱状体の屈折率は３．５、開口数ＮＡは０．７とした。なお、メタレンズの直径は、光ファイバ１のコア径として想定され得る１０μｍ～４０μｍの範囲内で設定した。

[0230] 各実験例の集光性能として、上記電磁気学計算ソフトを用いて各実験例に波長が１５５０ｎｍである平面波を入射した際に、メタレンズに含まれる複

数の柱状体の各々を伝搬した光の位相の空間分布をシミュレーションした。シミュレーションにより求められた各実験例の焦点距離を,以下の基準に基づいて評価した。

焦点距離の評価基準Ａ：焦点距離がレンズ直径より小さい

焦点距離の評価基準Ｓ：焦点距離がレンズ直径より大きい

[0231] シミュレーションでは、以下の関係式（３）を用いた。関係式（３）は、位相格子を含む各メタレンズがその中心軸からの距離ｒにおいて対象波長λの光に与える位相差と、各メタレンズの焦点距離ｆとの関係式である。関係式（３）を用いて、対象波長λが１５５０ｎｍであるときに、実験例２２～２４の各メタレンズの直径Ｒを距離ｒに代入して焦点距離ｆを算出した。

[数4]

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\sqrt{(r^2 + f^2)} - f\right) \quad \cdots (3)$$

[0232] （１１）評価結果

評価結果を表５に示す。

[表5]

		実験例 22	実験例 23	実験例 24	焦点距離
集光角度Θ_2（°）	20	3.71	5.22	7.36	B
	30	2.96	4.16	5.84	A
	40	2.47	3.46	4.84	A
	45	2.27	3.16	4.44	A
	50	2.09	2.9	4.08	A
	60	1.75	2.42	3.4	A
	70	1.42	1.94	2.72	A

[0233] メタレンズの直径が１０μｍである場合、集光角度θ_2が３０°以上であると、光学システムを小型化する観点において焦点距離ｆが十分に短くできることが確認された。メタレンズの直径が２０μｍ以上である場合、集光角度θ_2が２０°以上であっても、光学システムを小型化する観点において焦点距

離ｆが十分に短くできることが確認された。他方、集光角度θ_2が７０°であると、光学システムとした場合に光軸方向の位置調整が難しいことを確認した。

符号の説明

[0234] １　光ファイバ、１Ａ１　第１端面、１Ａ　コア、１Ｂ，２Ｂ　クラッド、１Ｃ　中空部、１Ｄ　金属層、２　フォトニクス素子、２Ａ１　第２端面、２Ａ　導波路、２Ｂ１　第１クラッド層、２Ｂ２　第２クラッド層、２Ｃ　Ｓｉ基板、２Ｄ　結晶スラブ、２Ｅ　貫通孔、２１　スラブ部、２２　リッジ部、３　メタレンズ、３Ａ，３Ｂ，３Ｃ，３Ｄ，３Ｅ，３Ｅ１，３Ｅ２　メタサーフェス、３１Ｃ　貫通孔、３１　導電体層、３１Ａ　第１面、３１Ｂ　第２面、３１Ｄ，３１Ｇ　凹凸構造、３１Ｅ，３１Ｈ　環状溝、３１Ｆ，３１Ｉ　凸部、３２，３２Ａ，３２Ｂ　柱状体、３３　充填部、３４　基材、３５，３５Ａ，３５Ｂ　球状体、４　基板、４Ａ　第３面、４Ｂ　第４面、１０１，１０２，１０３，１０４，１０５，１０６，１０７　光学システム、２０１　情報出力部、２０２　情報入力部。

請求の範囲

[請求項1] 第１導波路と、

光スポットサイズが前記第１導波路とは異なる第２導波路と、

前記第１導波路の第１端面と前記第２導波路の第２端面との間を光学的に接続するメタレンズとを備え、

前記メタレンズは、前記第１導波路と対向する第１面と、前記第１面とは反対側を向いている第２面とを有し、

前記メタレンズには、前記第１面と前記第２面との間を貫通する貫通孔が形成されており、

前記貫通孔の孔径は、対象波長よりも小さく、

前記メタレンズは、導電体により構成されており、

前記メタレンズの少なくとも前記第１面には、前記第１面と、前記第１面に対して凹んでいる複数の環状溝とにより構成されている複数の凹凸構造が形成されており、

前記複数の凹凸構造は、平面視において前記貫通孔を囲むように環状に形成されている、光学システム。

[請求項2] 前記対象波長λ（単位：ｎｍ）に対する前記複数の凹凸構造の各々の間隔Ｐ（単位：ｎｍ）の比率（Ｐ／λ）が、３０％以上１４０％以下である、請求項１に記載の光学システム。

[請求項3] 前記貫通孔の中心軸に対する径方向における前記複数の凹凸構造の各々の前記間隔Ｐに対して、前記複数の環状溝の各々の幅Ｗ５（単位：ｎｍ）が成す比率（Ｗ５／Ｐ）は、１０％以上９５％以下である、請求項２に記載の光学システム。

[請求項4] 平面視において、前記複数の凹凸構造の各々の中心は、前記貫通孔の中心と重なっている、請求項２に記載の光学システム。

[請求項5] 平面視において、前記複数の凹凸構造の中心は、前記貫通孔の中心と重なっていない、請求項２に記載の光学システム。

[請求項6] 前記複数の凹凸構造の各々の前記中心が、同一直線上に互いに等し

い距離を隔てて並んで配置されており、

前記貫通孔の中心軸と前記第２導波路の中心軸とが第１角度Θ_1を成しており、

前記第１角度Θ_1が３°以上６０°以下である、請求項５に記載の光学システム。

[請求項7] 前記第１角度Θ_1が５°以上である場合、前記間隔Ｐ及び前記距離Ｓ（単位：ｎｍ）が以下の関係式（１）を満足する、請求項６に記載の光学システム。

[数1]

$$\frac{P}{\left(0.036\theta_1-\frac{0.1123}{\theta_1}+0.0671\right)}\leq S\leq\frac{P}{\left(0.066\theta_1-\frac{0.0605}{\theta_1}+0.0671\right)}\quad\cdots(1)$$

[請求項8] 前記対象波長の光に対して透明でありかつ前記メタレンズの前記第２面と接する第３面を有する基板をさらに備え、

前記複数の環状溝の各々は、前記メタレンズの前記第１面と前記第２面との間を貫通し、かつ前記第３面の一部を露出させるように形成されている、請求項１～７のいずれか１項に記載の光学システム。

[請求項9] 第１導波路と、

光スポットサイズが前記第１導波路とは異なる第２導波路と、

前記第１導波路の第１端面と前記第２導波路の第２端面との間を光学的に接続するメタレンズと、

対象波長の光に対して透明でありかつ前記光の伝搬方向に交差する第３面を有する基板とを備え、

前記メタレンズは、前記第３面上に配置されておりかつ前記対象波長の光に位相差を与える位相格子であり、

前記メタレンズは、前記第３面上に互いに間隔を空けて配置されている複数の凸部を含み、

前記複数の凸部の各々は、前記第３面の第１領域上に互いに間隔を空けて配置されている第１群の凸部と、前記第３面の第２領域上に互

いに間隔を空けて配置されている第２群の凸部とを含み、前記第１群の凸部の各々の高さ、最大幅、及びピッチの少なくともいずれかは、前記第２群の凸部の各々の高さ、最大幅、及びピッチの少なくともいずれかと異なる、光学システム。

[請求項10] 前記メタレンズは、前記第１群の凸部及び前記第２群の凸部を含みかつ前記複数の凸部の各々の高さ、最大幅、及びピッチの少なくともいずれかが連続的または段階的に変化する構造単位が、前記メタレンズの中心軸に対する径方向に周期的に配置されて成る周期構造を有している、請求項９に記載の光学システム。

[請求項11] 前記メタレンズの前記周期構造に含まれる複数の前記構造単位のうち、前記中心軸に最も近い位置にある第１構造単位の前記径方向の幅は、前記中心軸に２番目に近い位置にある第２構造単位の前記径方向の幅よりも広い、請求項１０に記載の光学システム。

[請求項12] 前記第１構造単位の前記径方向の幅は、１．００μｍ以上７．００μｍ以下である、請求項１１に記載の光学システム。

[請求項13] 前記複数の凸部の各々は、柱状体または球状体であり、

前記複数の凸部の各々の最大幅は、前記対象波長よりも短い、請求項９に記載の光学システム。

[請求項14] 前記複数の凸部のうち前記メタレンズの中心軸に対する径方向において最外に位置する前記凸部の前記第３面側に位置する最外端部と、前記第２導波路の中心軸と前記第２端面との交点とを結ぶ第１仮想直線が、前記メタレンズの前記中心軸と前記第３面との交点と、前記第２導波路の前記中心軸と前記第２端面との交点とを結ぶ第２仮想直線に対して成す集光角度が、２０°以上７０°以下である、請求項９～１３のいずれか１項に記載の光学システム。

[請求項15] 前記第１導波路は、光ファイバの少なくとも１つのコアであり、

前記第２導波路は、細線導波路、リブ型導波路、又はフォトニック結晶導波路であり、

前記メタレンズは、前記第１導波路と前記第２導波路との間に配置されている、請求項１または９に記載の光学システム。

[請求項16] 前記第２端面の面積に対する前記第１端面の面積の比率が１０以上である、請求項１５に記載の光学システム。

[請求項17] 前記第１導波路は、離散的に配置されている複数のコアにより構成されており、

前記メタレンズは、前記複数のコアの各々と前記第２導波路との間を光学的に接続する、請求項１５に記載の光学システム。

[請求項18] 前記メタレンズは、前記複数のコアの各々から出射した光が前記第１導波路及び前記第２導波路の各々の中心軸と同一直線上に焦点を結ぶように設けられている、請求項１７に記載の光学システム。

[請求項19] 前記第１導波路及び前記第２導波路の一方と光学的に接続されている情報出力部と、

前記第１導波路及び前記第２導波路の他方と光学的に接続されている情報入力部とをさらに備える、請求項１または９に記載の光学システム。

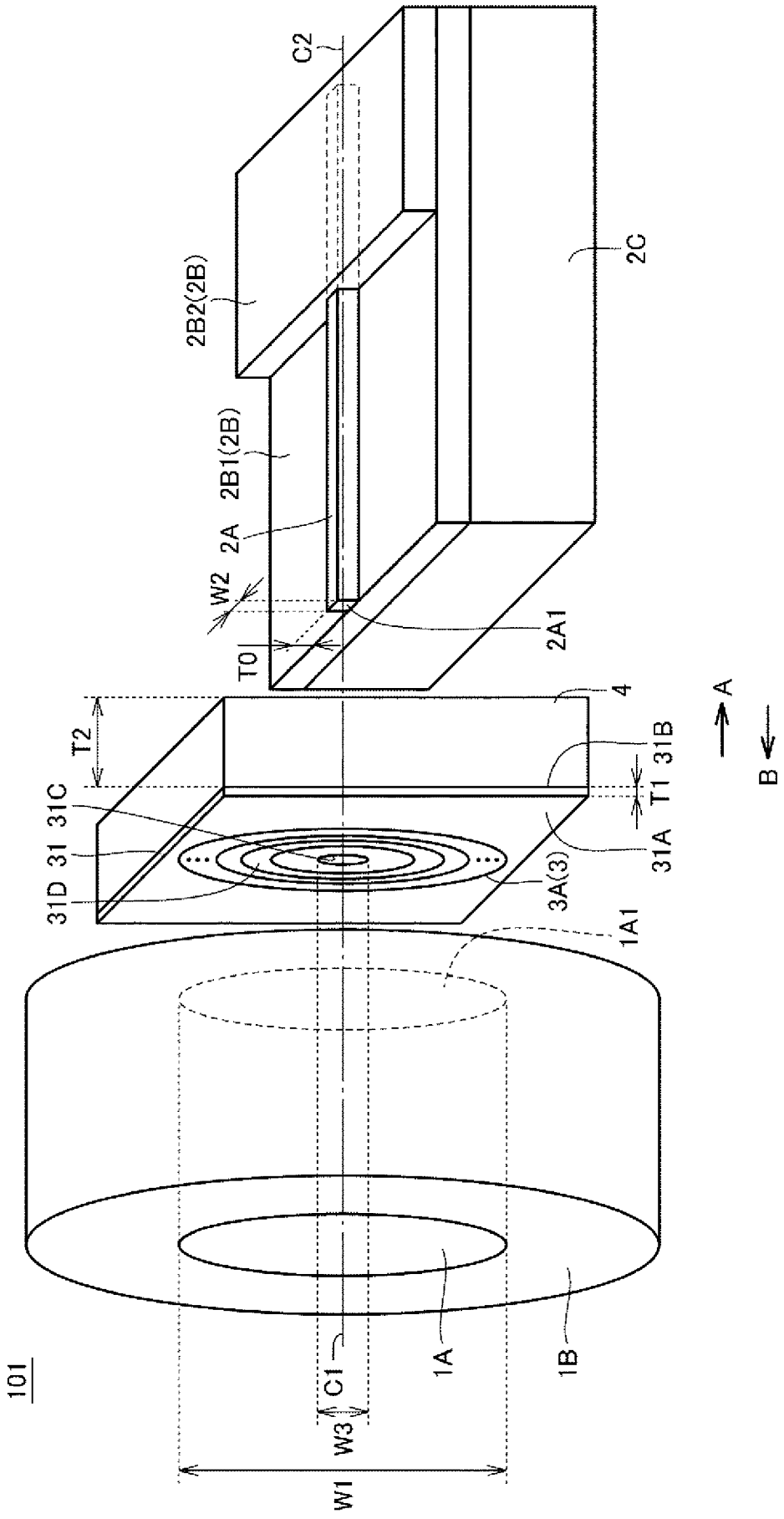
[請求項20] 前記第１導波路の前記光スポットサイズは、前記第２導波路の前記光スポットサイズよりも大きく、

前記情報出力部は、前記第１導波路と光学的に接続されており、

前記情報入力部は、前記第２導波路と光学的に接続されている、請求項１９に記載の光学システム。

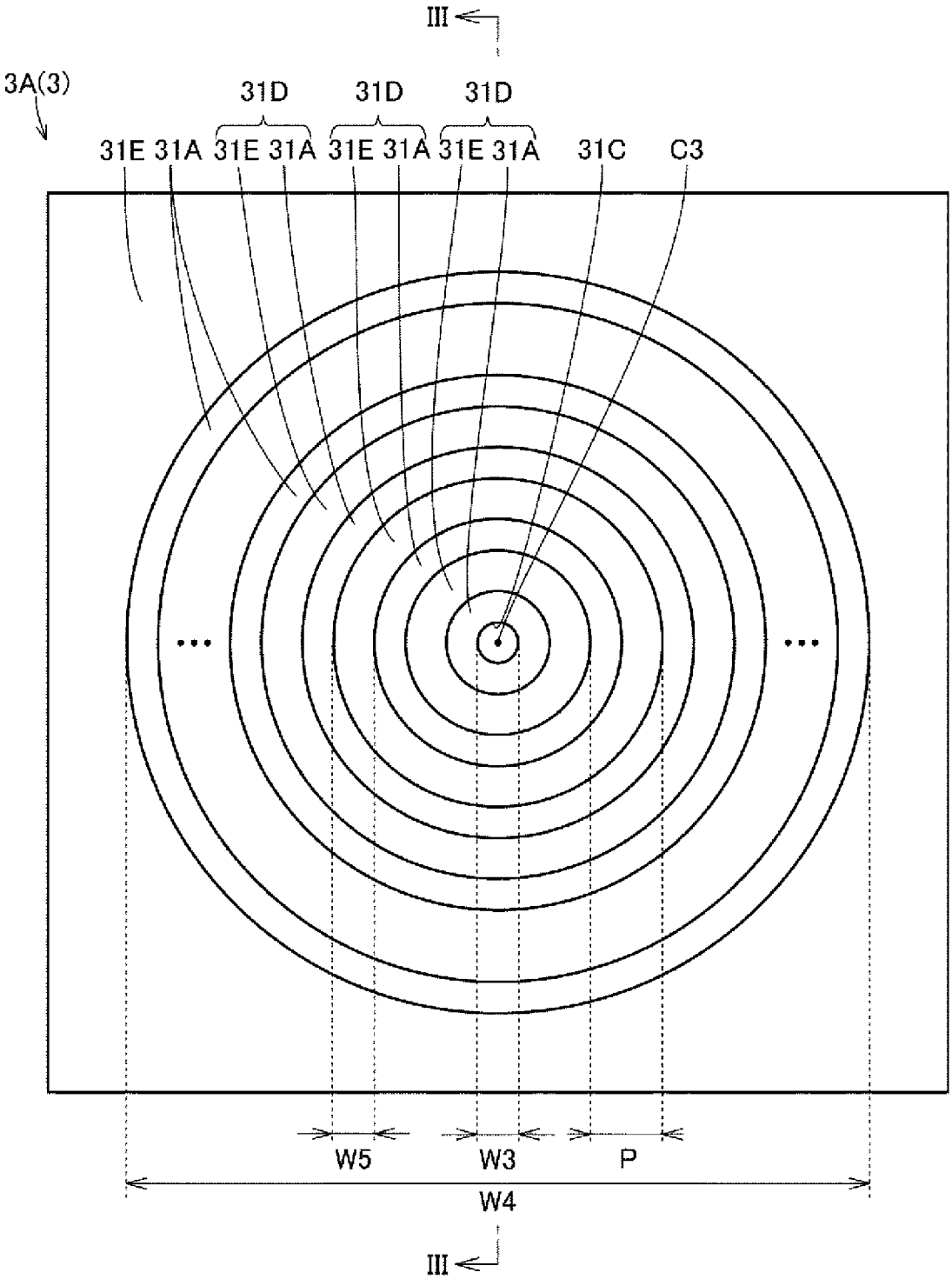
[図1]

図1


C2
2B2(2B)
2C
2B1(2B)
2A
W2
2A1
T0
4
T2
31B
T1
A
B
31C
31
31D
31A
3A(3)
1A1
101
C1
1A
1B
W3
W1

[図2]

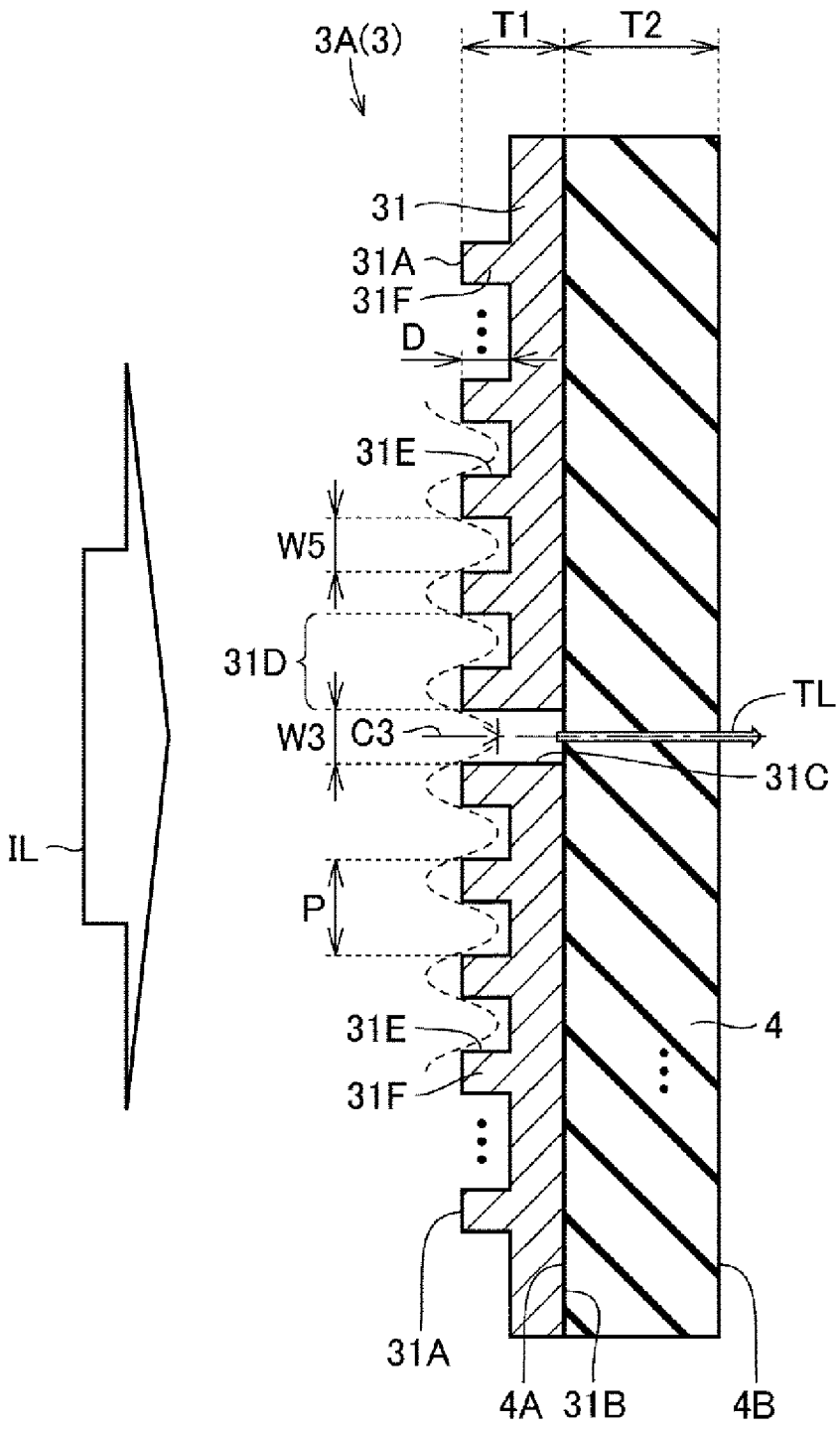
図2


III
3A(3)
31D
31D
31D
31E
31A
31E
31A
31E
31A
31E
31A
31C
C3
W5
W3
P
W4
III

⊗
A

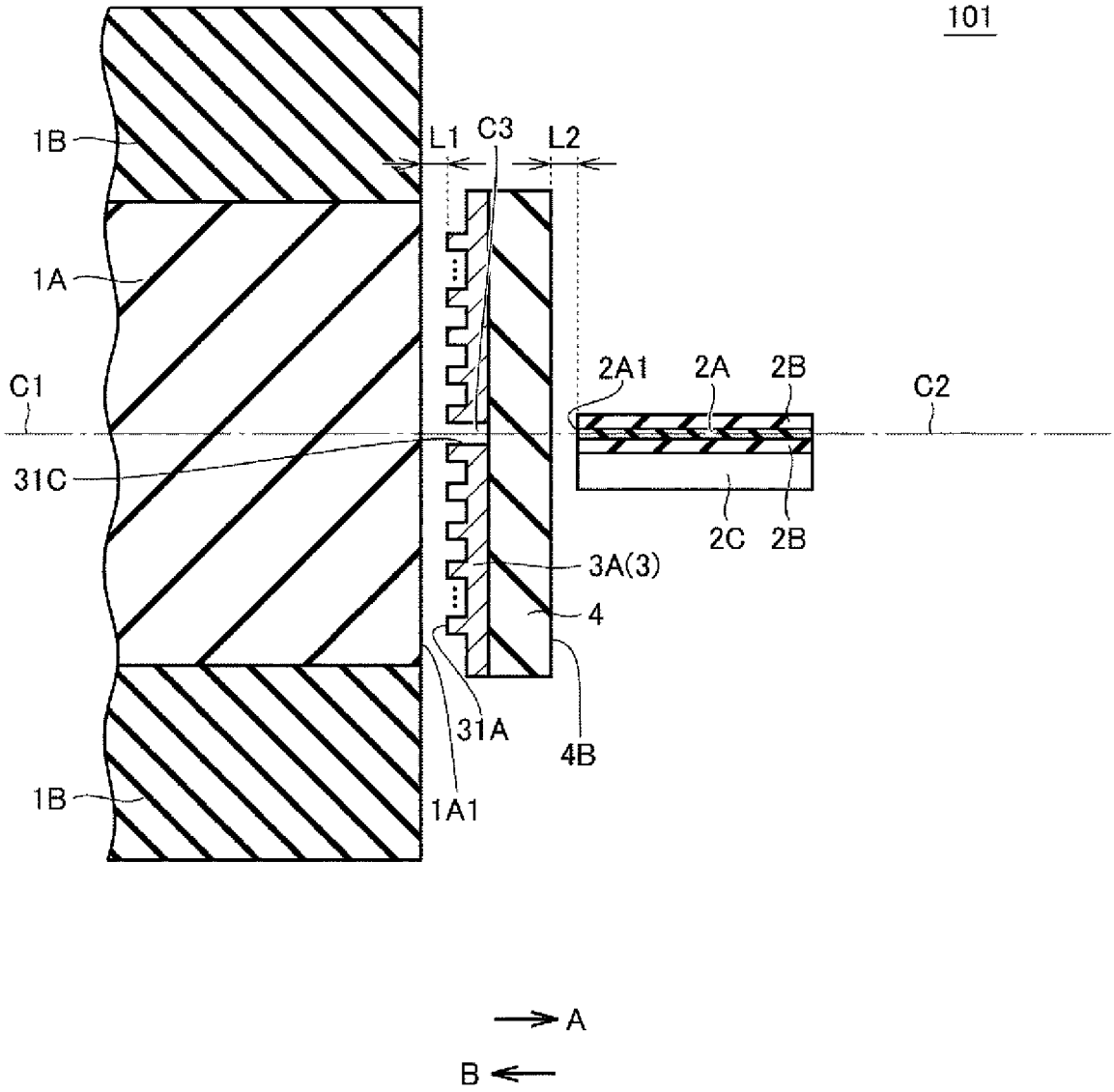
[図3]

図3


3A(3)
T1
T2
31
31A
31F
D
31E
W5
31D
W3
C3
TL
31C
IL
P
31E
31F
4
31A
4A
31B
4B
A
B

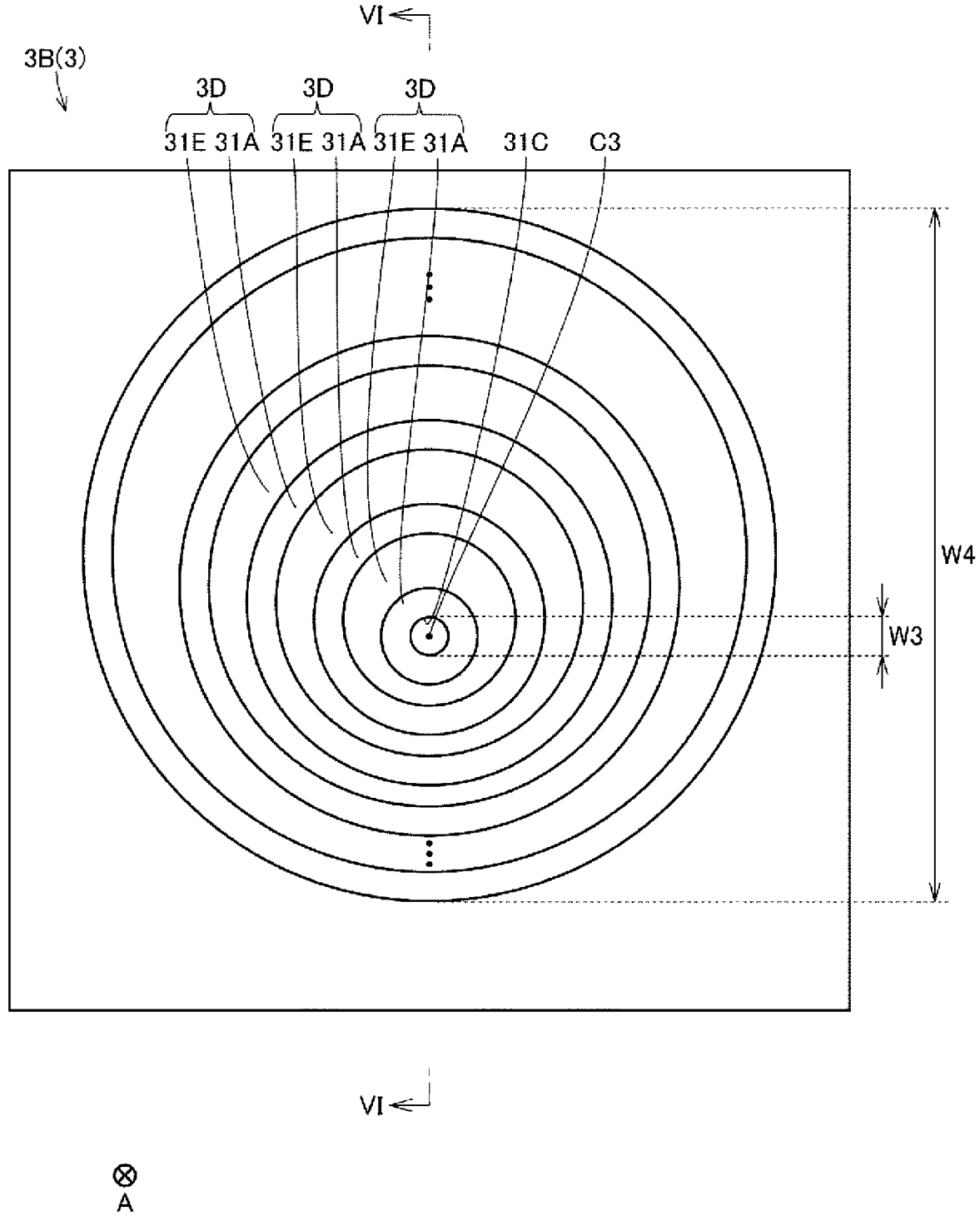
[図4]

図4



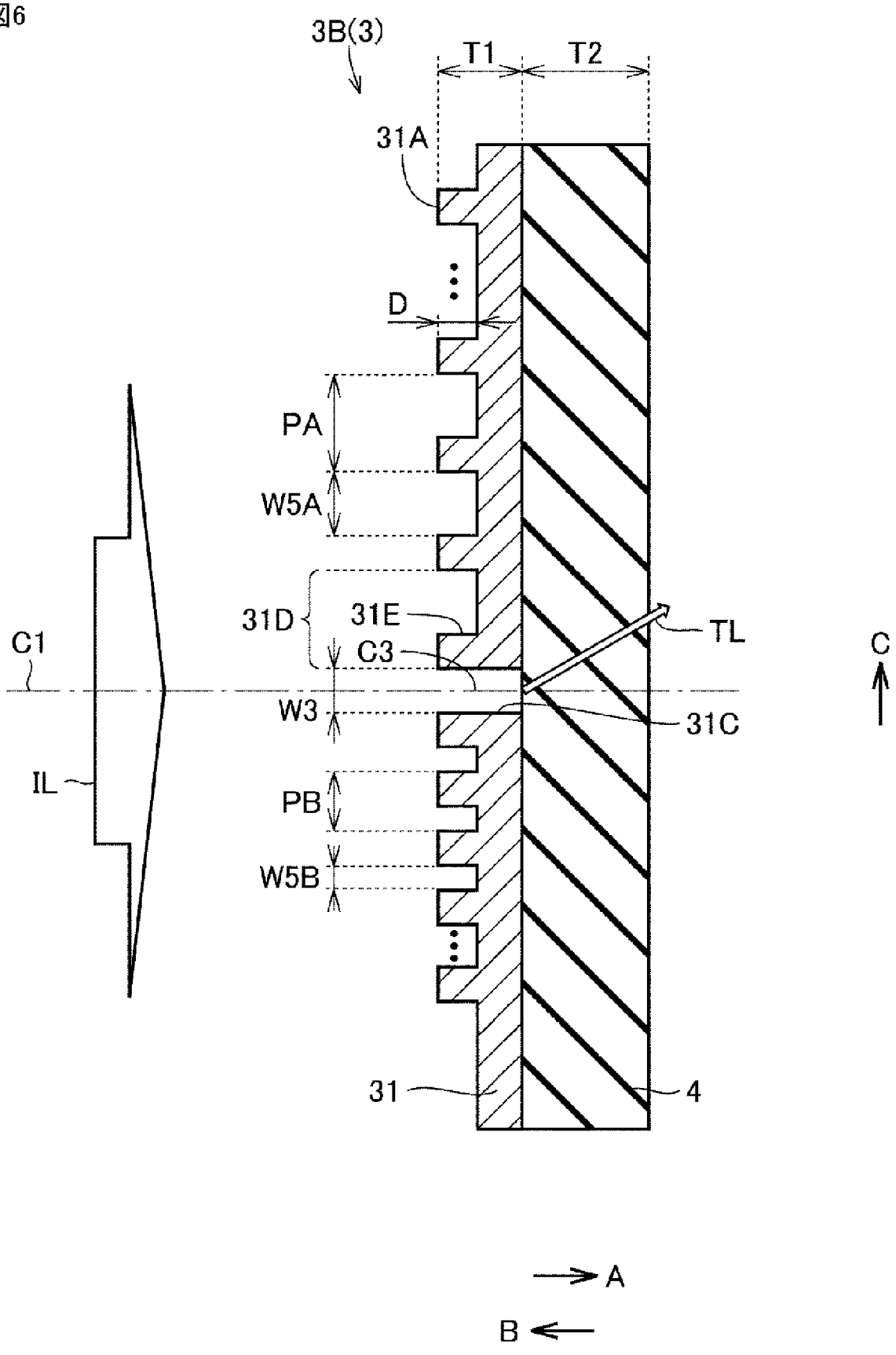
[図5]

図5



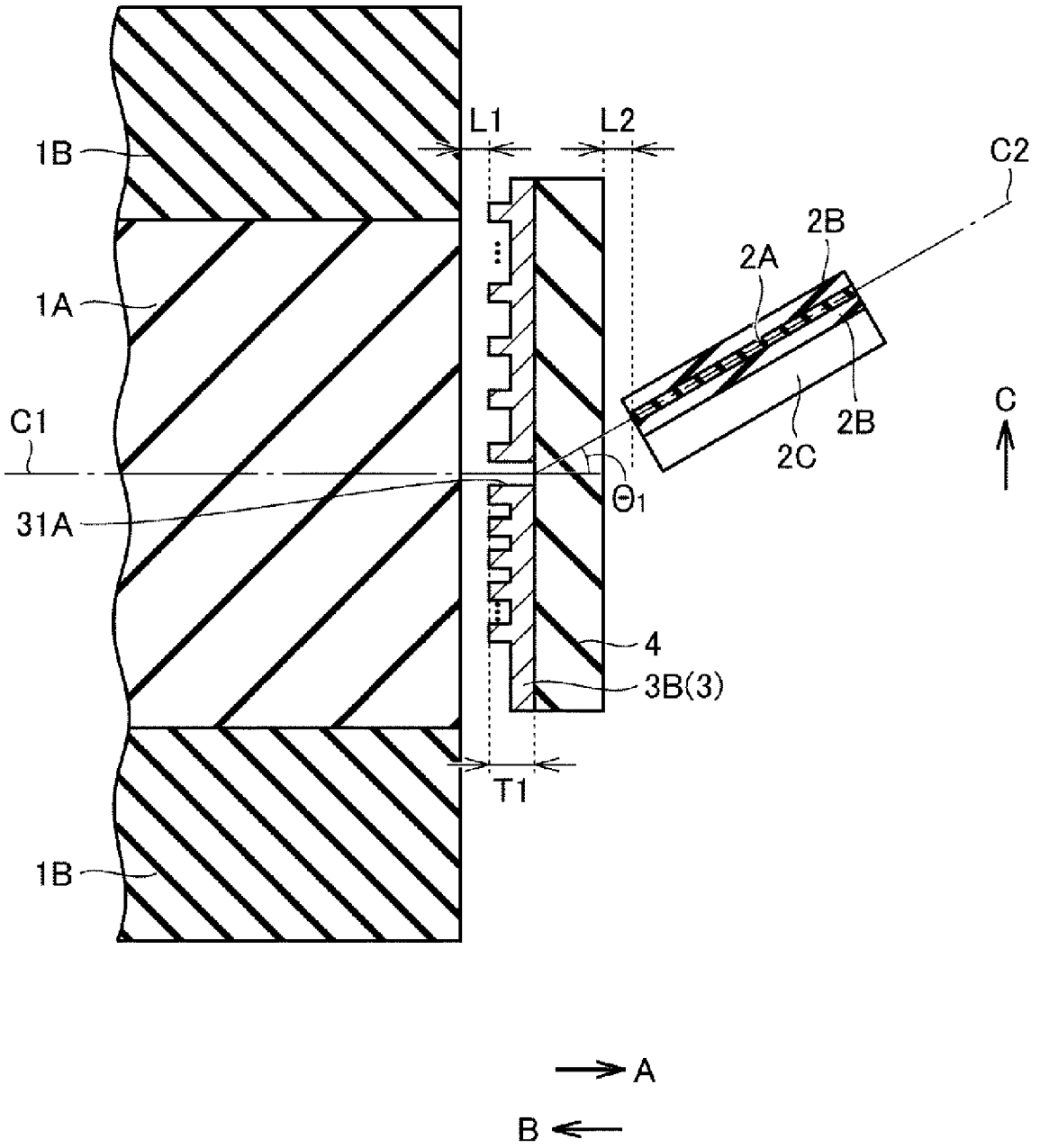
[図6]

図6



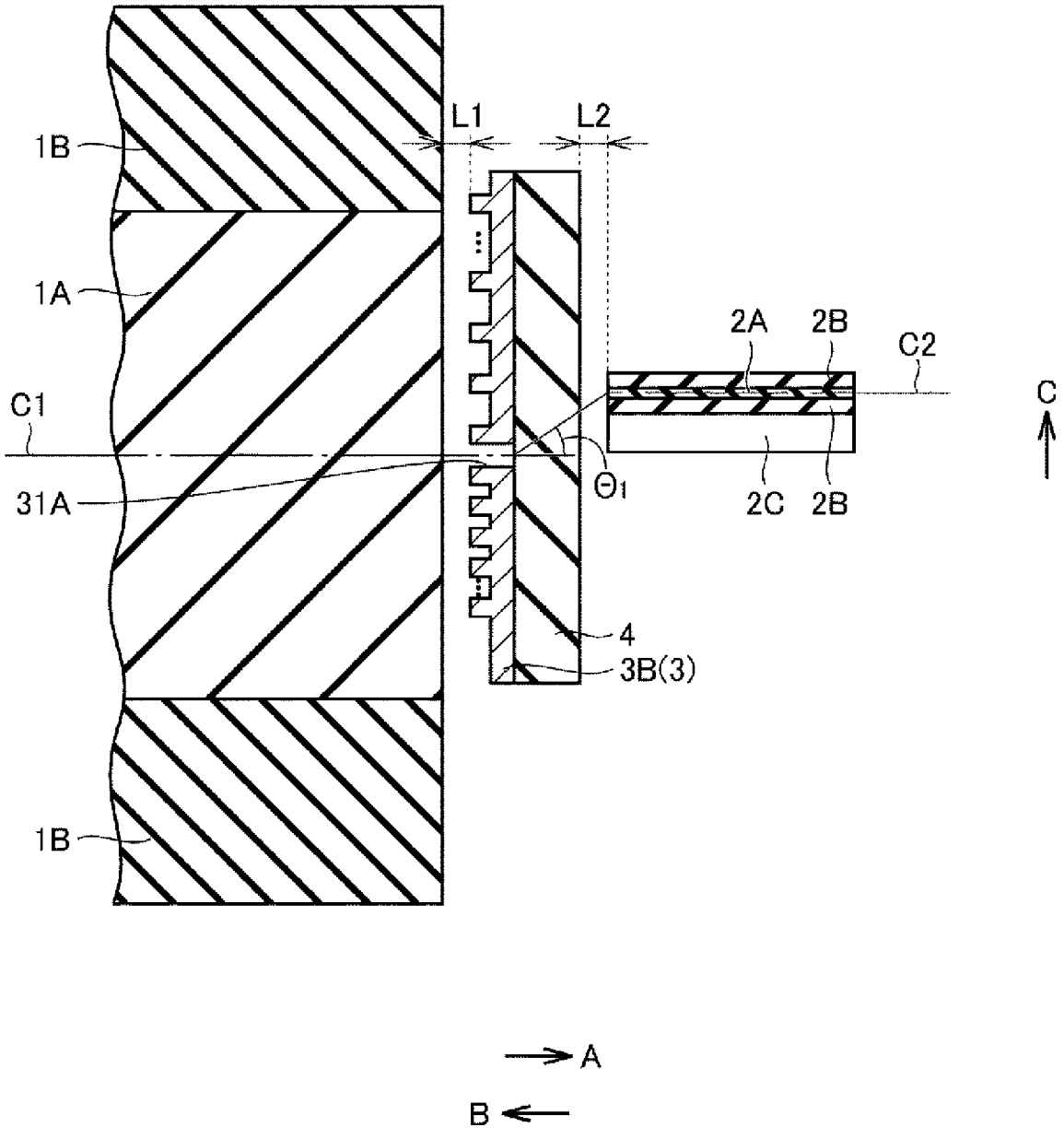
[図7]

図7



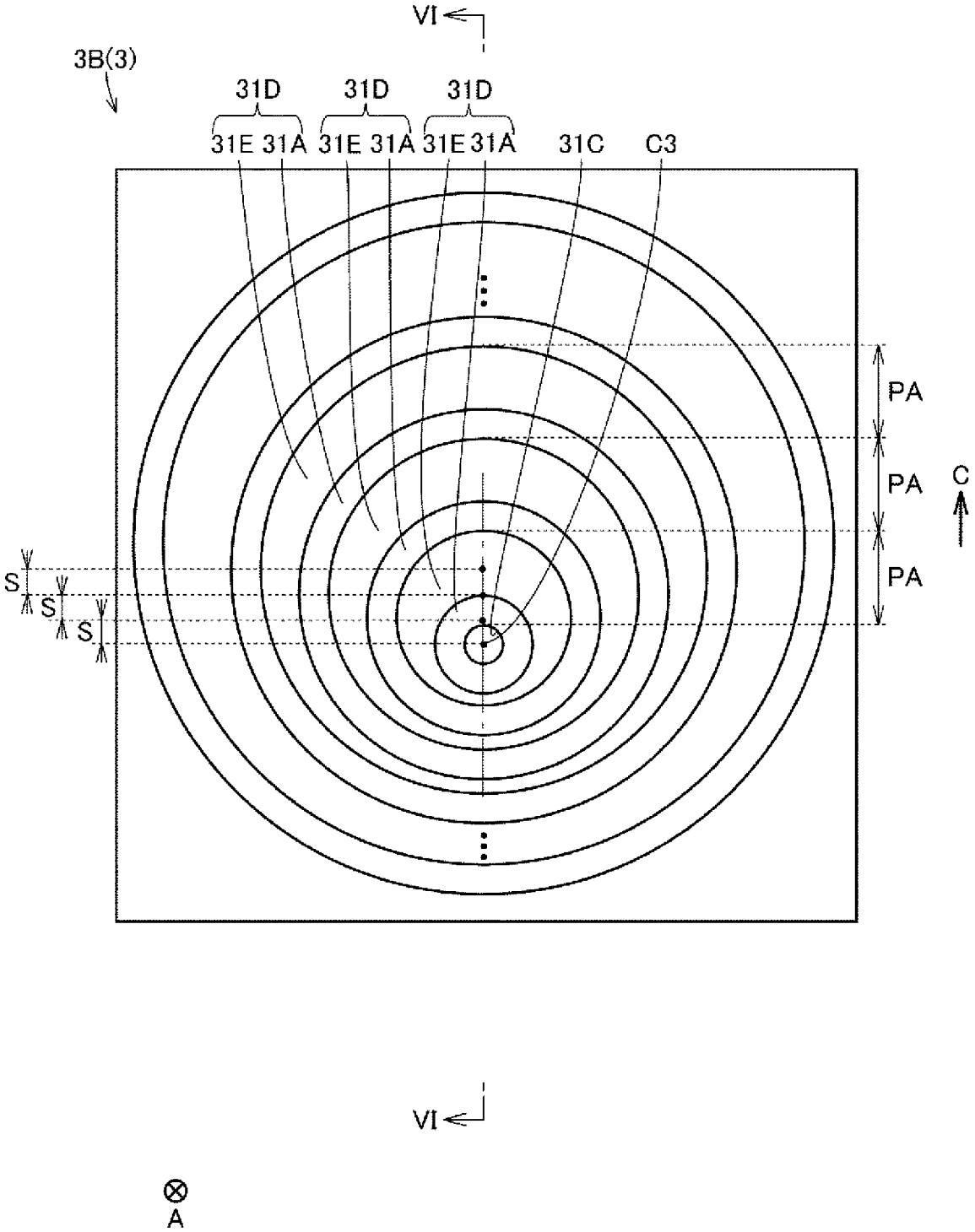
[図8]

図8



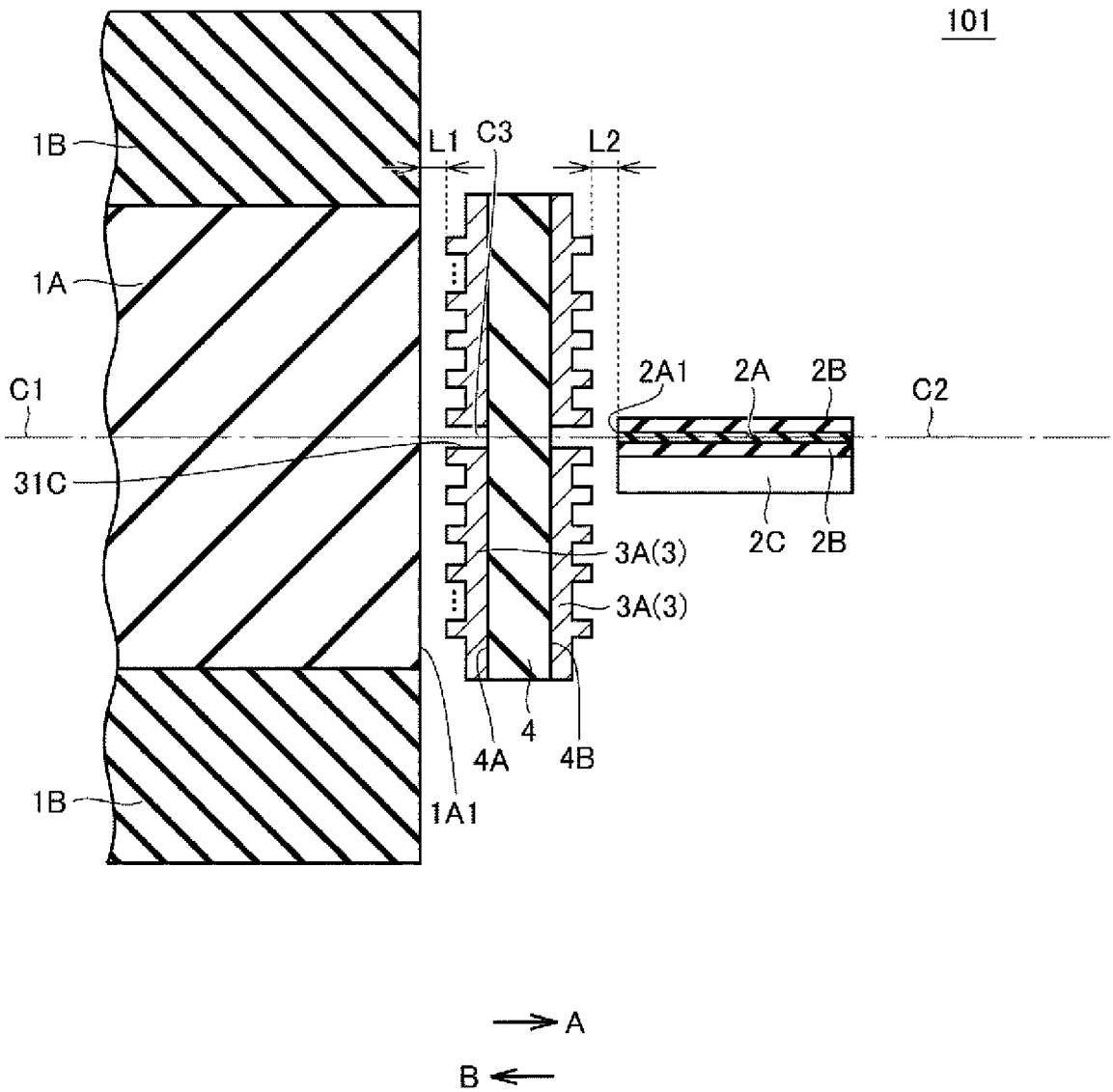
[図9]

図9


VI
3B(3)
31D
31D
31D
31E
31A
31E
31A
31E
31A
31C
C3
PA
PA
PA
C
S
S
S
VI
A

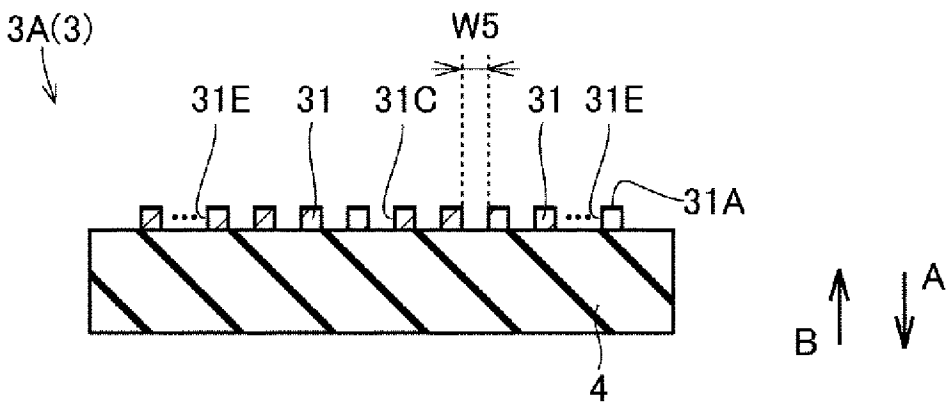
[図10]

図10



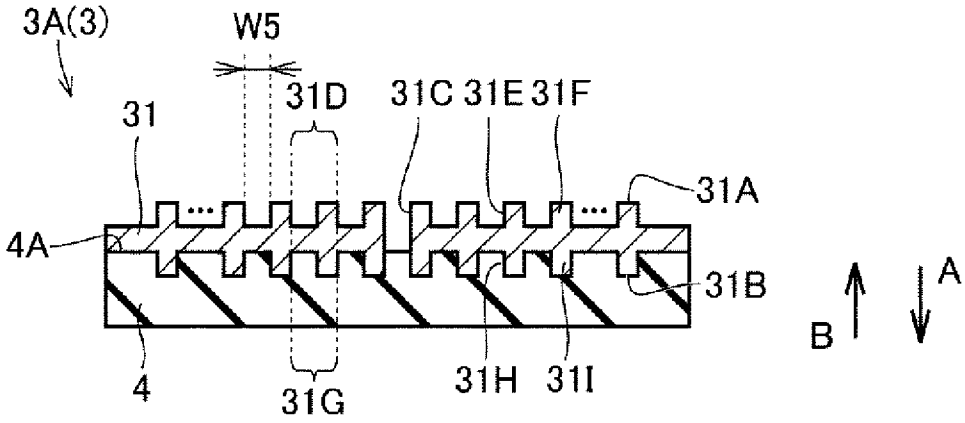
[図11]

図11



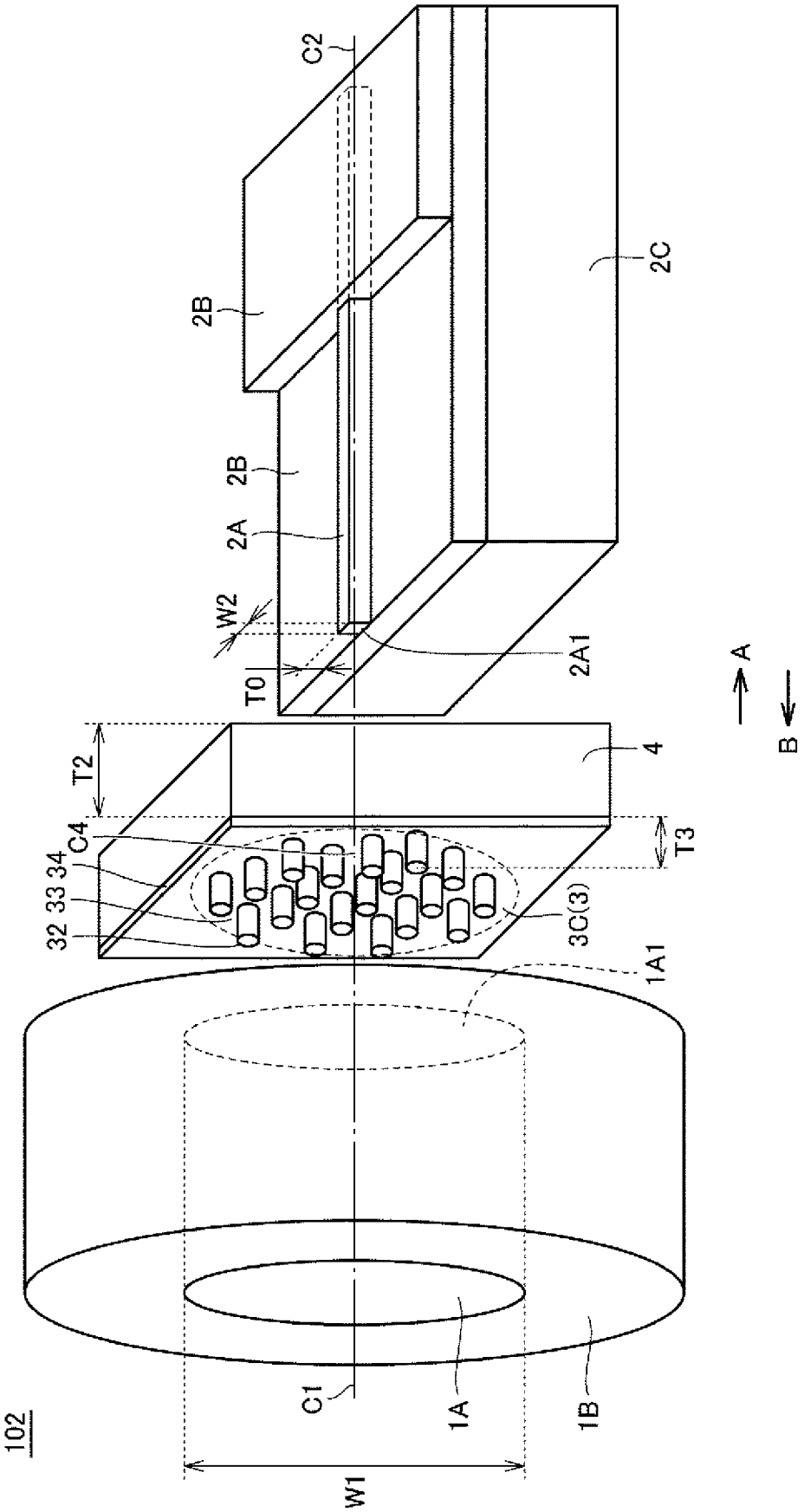
[図12]

図12



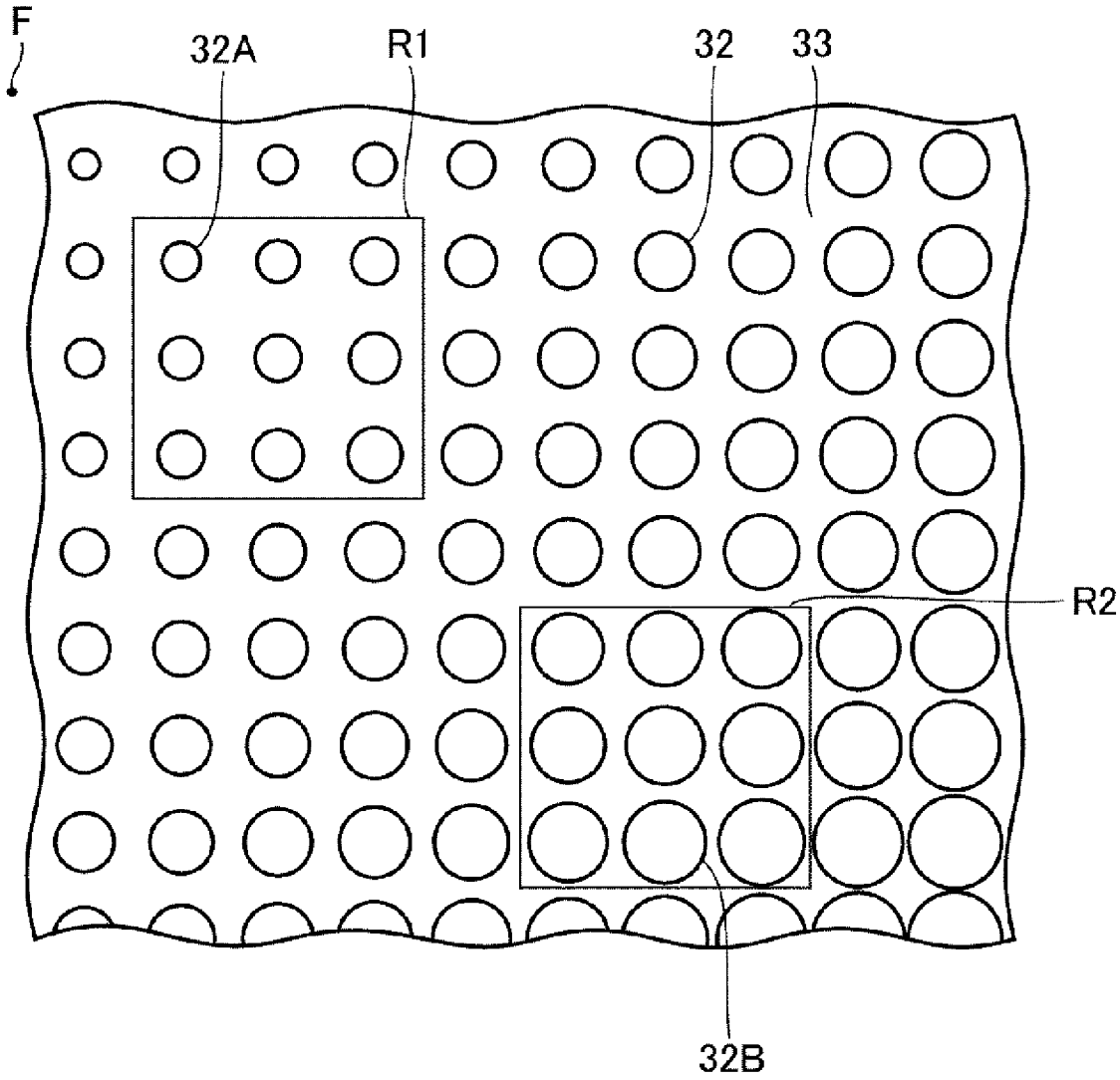
[図13]

図13



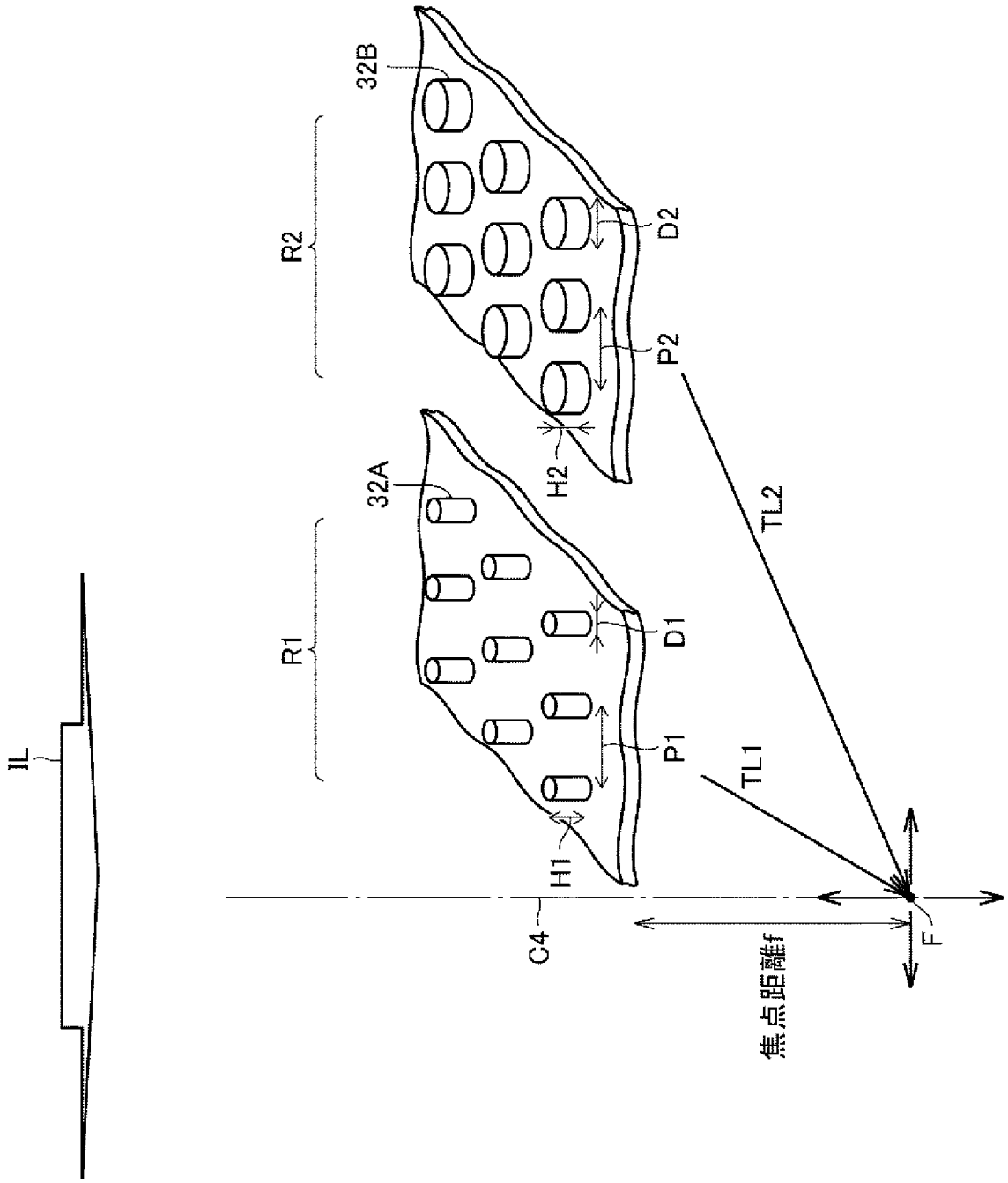
[図14]

図14



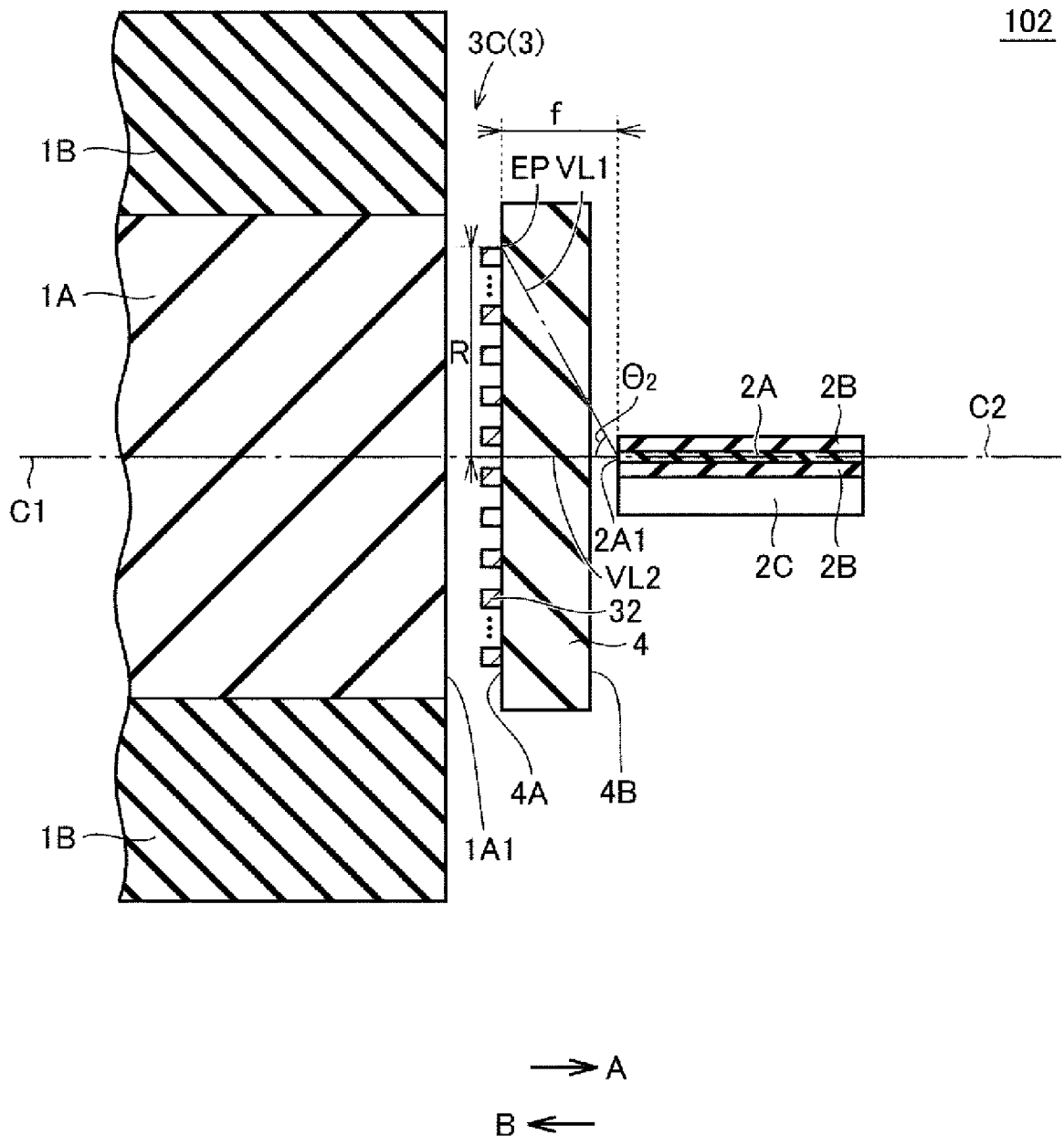
[図15]

図15



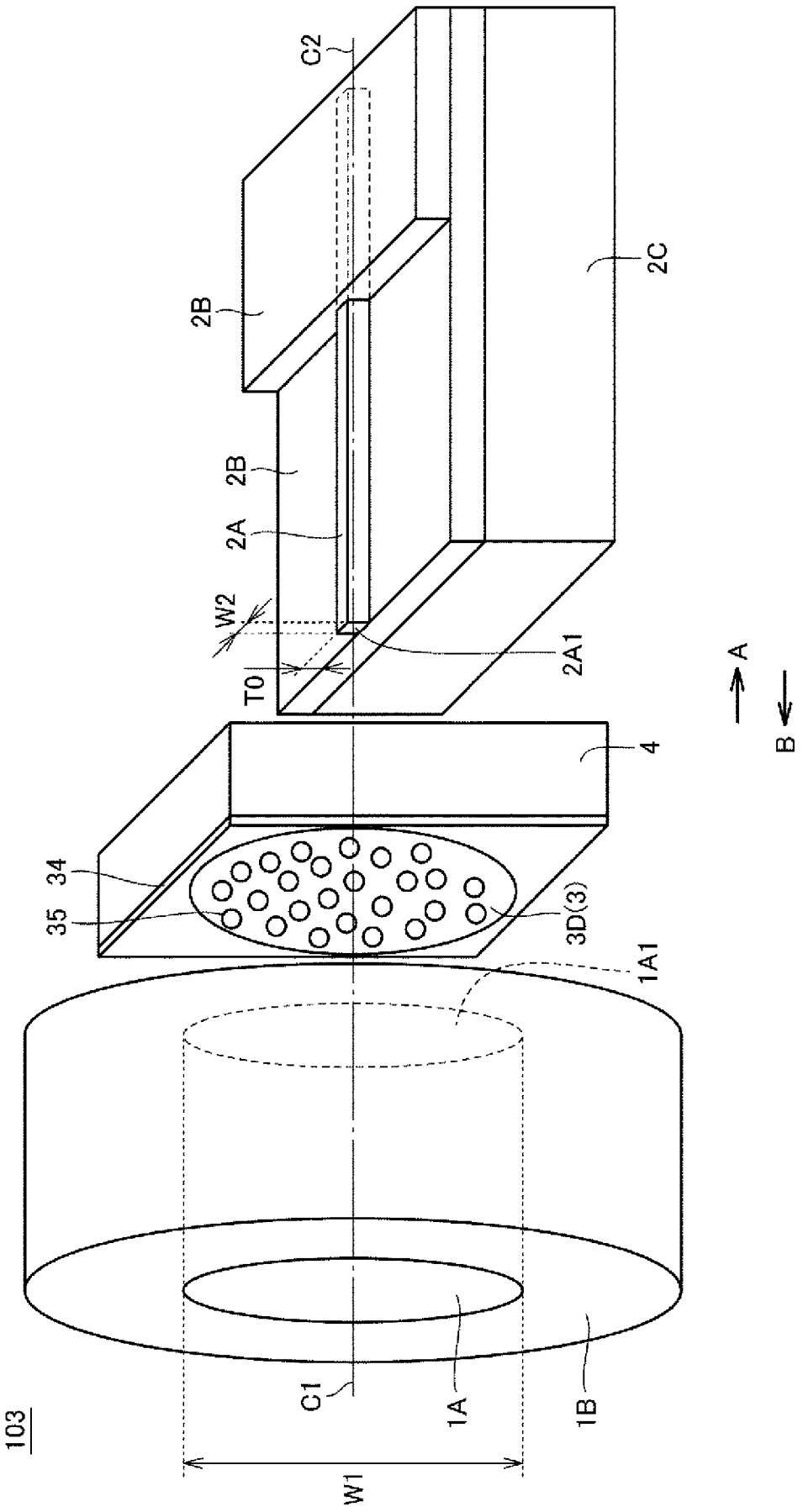
[図16]

図16


102
3C(3)
f
EP
VL1
1B
1A
R
θ2
2A
2B
C2
C1
2A1
VL2
2C
2B
32
4
4A
4B
1B
1A1
A
B

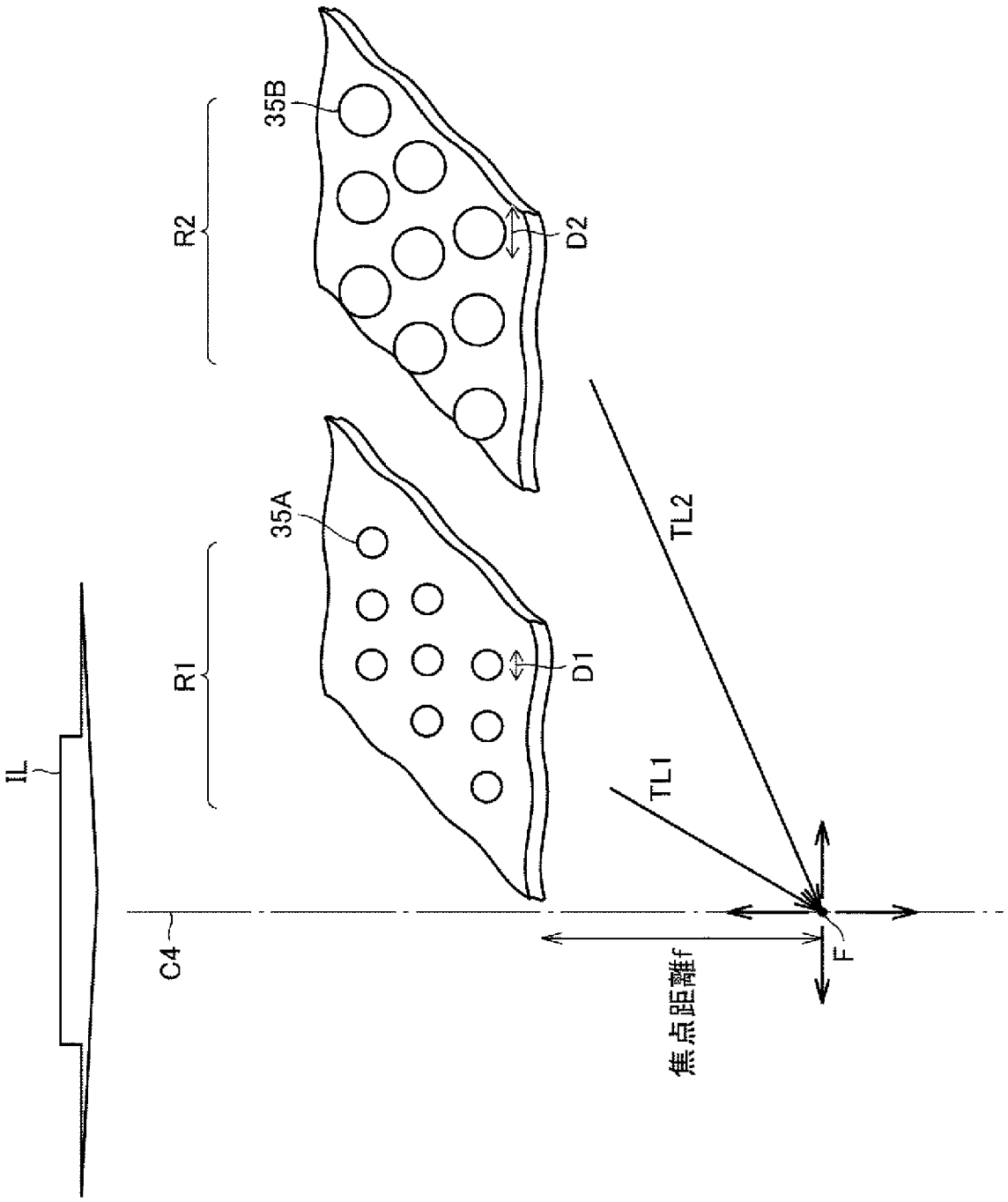
[図17]

図17



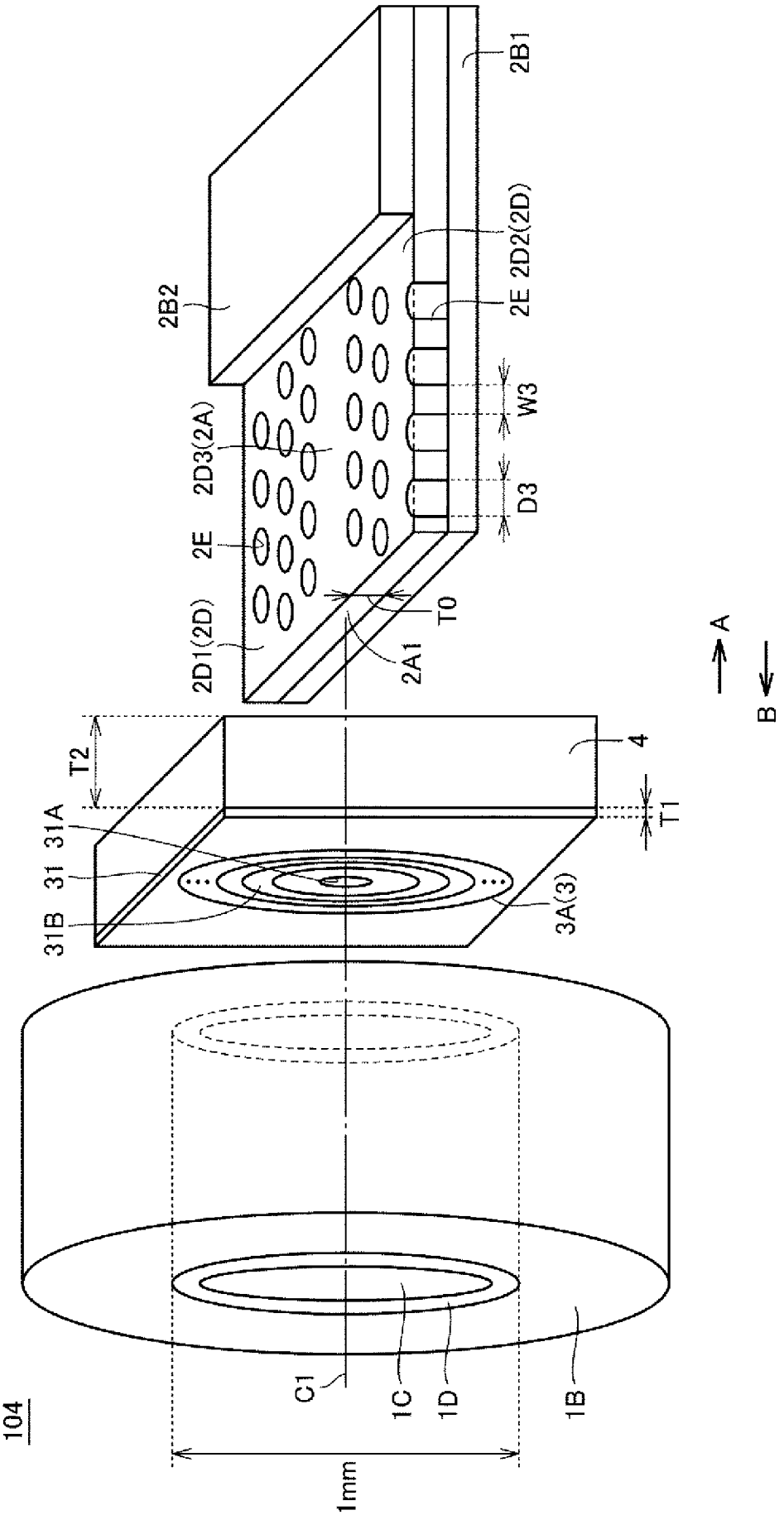
[図18]

図18



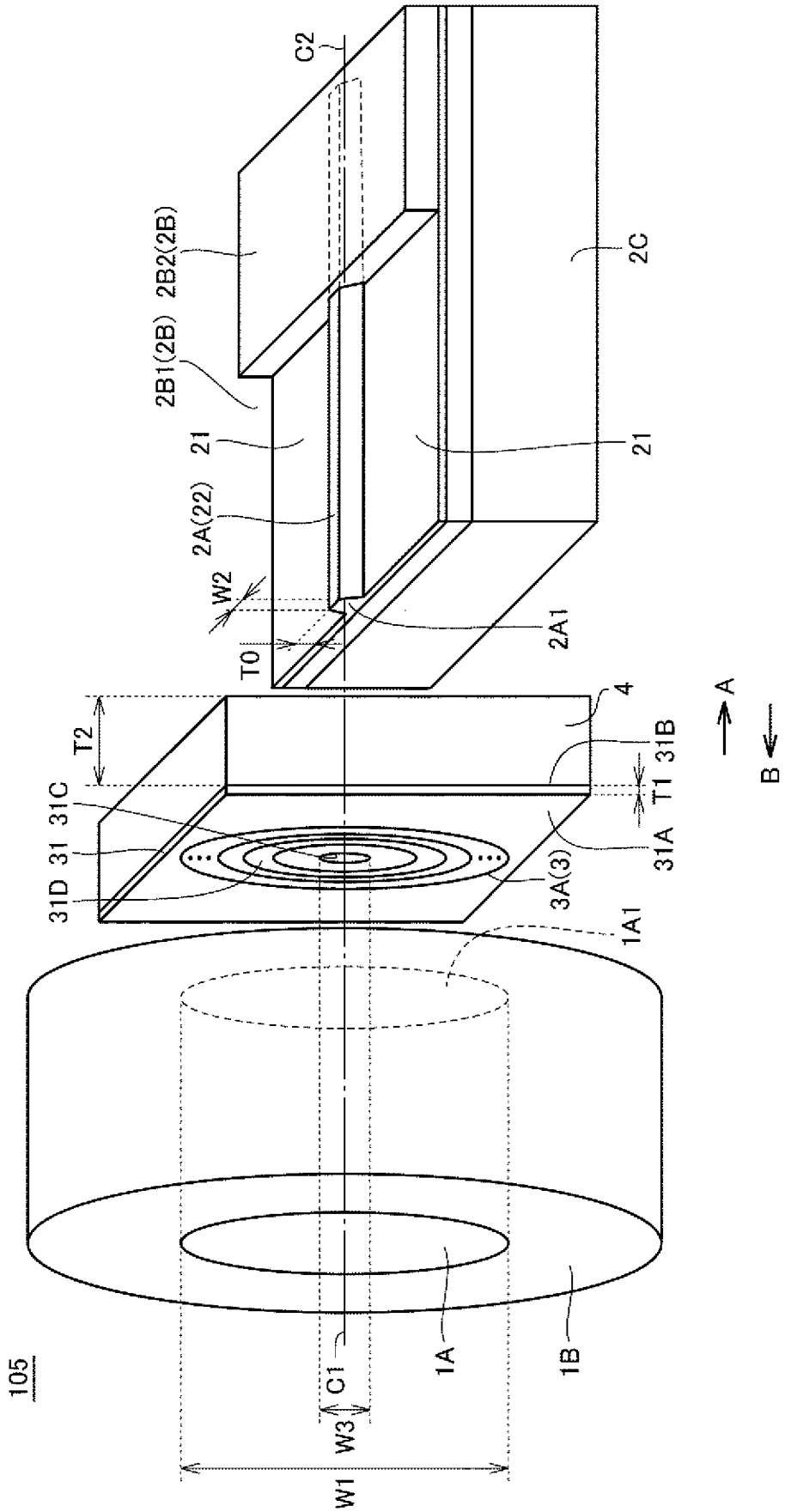
[図19]

図19


2B1
2B2
2D2(2D)
2E
W3
2D3(2A)
D3
2E
T0
2D1(2D)
2A1
A
B
T2
4
T1
31A
31
31B
3A(3)
104
C1
1C
1D
1B
1mm

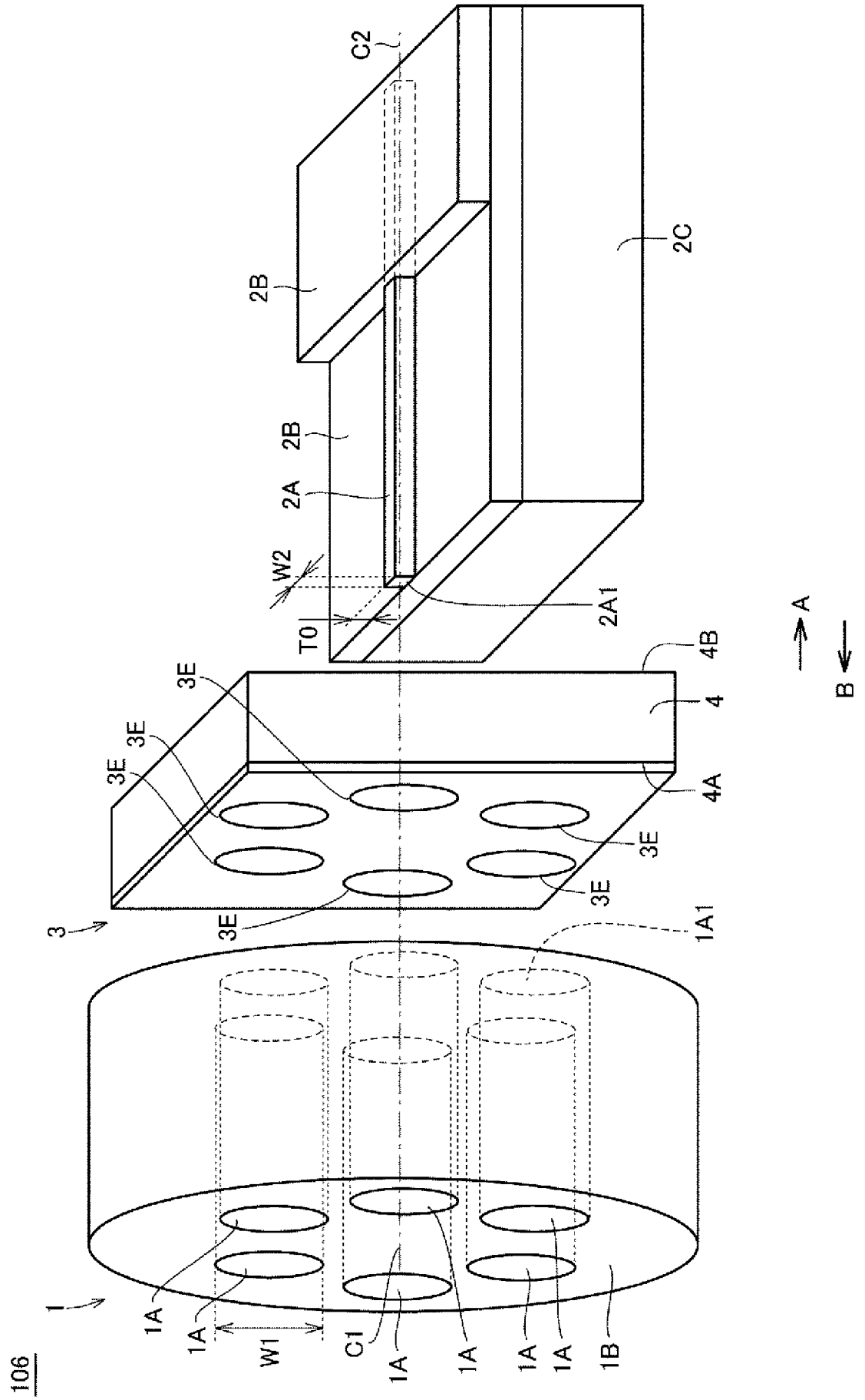
[図20]

図20


C2
2B1(2B)
2B2(2B)
2C
21
21
2A(22)
W2
T0
2A1
T2
4
31B
T1
31A
31C
31
31D
3A(3)
1A1
A
B
105
C1
W3
W1
1A
1B

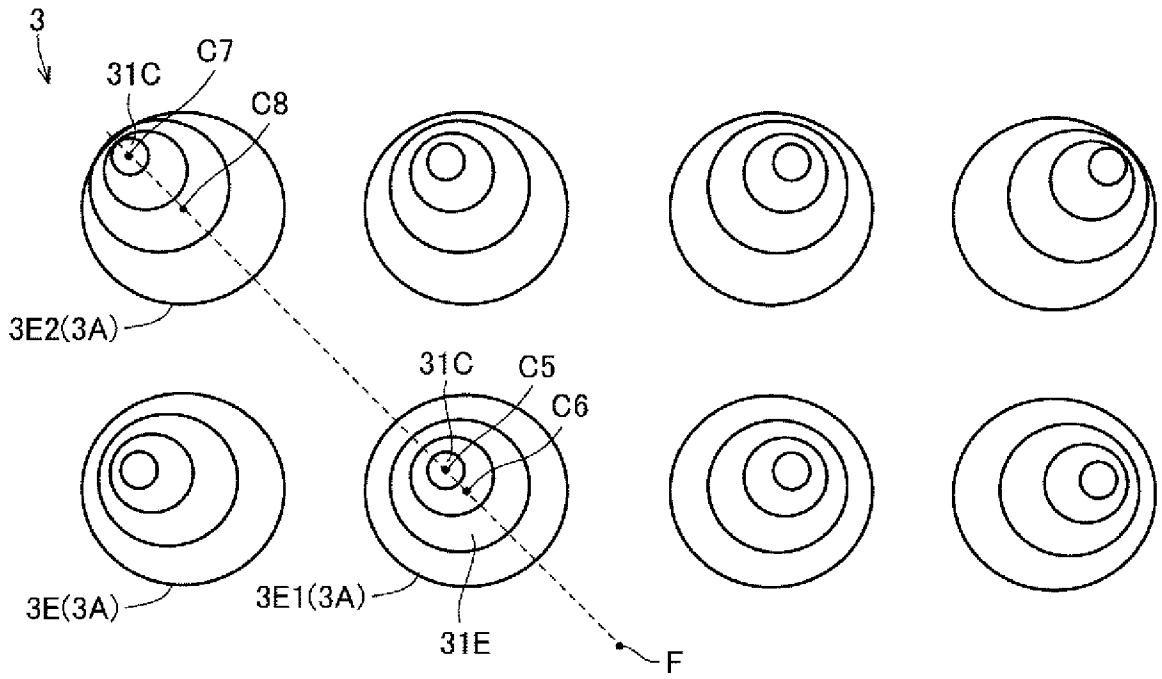
[図21]

図21


C2
2B
2C
2B
2A
W2
T0
2A1
A
B
4B
4
4A
3E
3E
3E
3E
3E
3E
3
1A1
1
1A
1A
W1
C1
1A
1A
1A
1A
1B
106

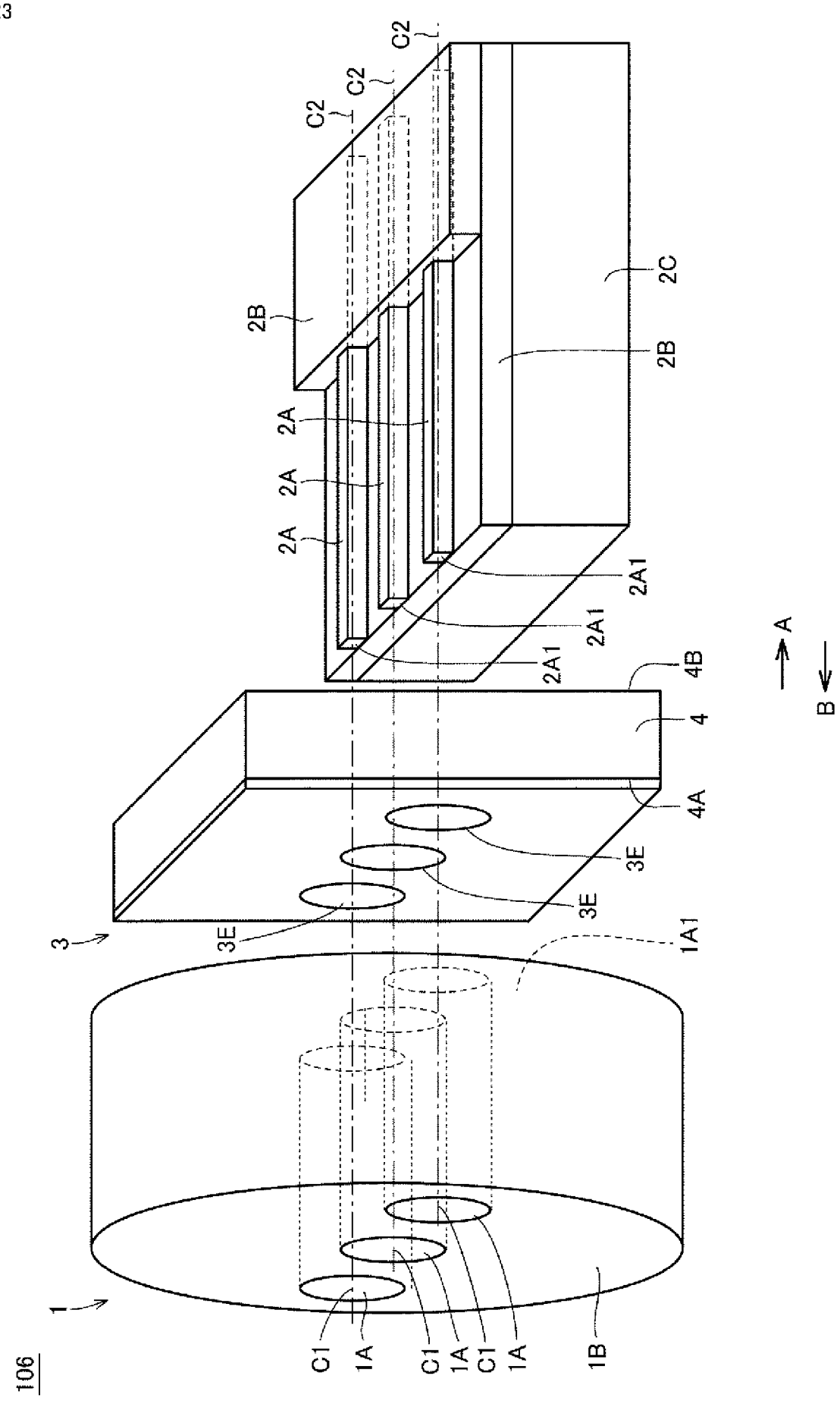
[図22]

図22



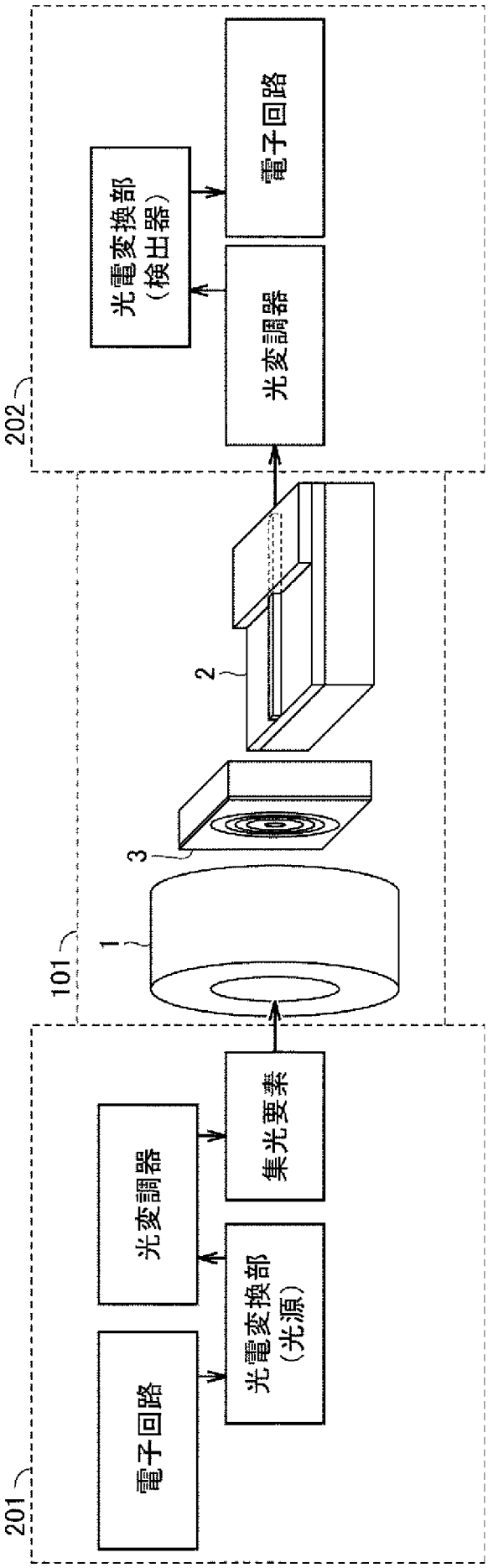
[図23]

図23


106
1
3
C1
1A
C1
1A
C1
1A
1B
1A1
3E
3E
3E
4A
4
4B
2A1
2A1
2A1
2A
2A
2A
2B
2B
2C
C2
C2
C2
A
B

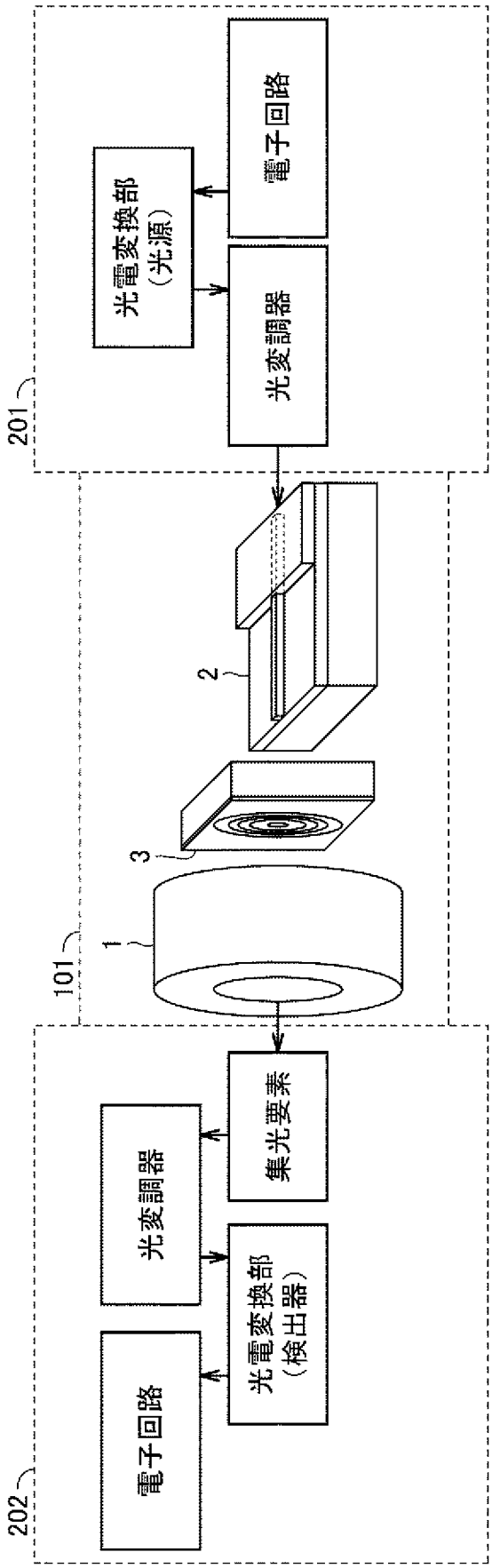
[図24]

図24



[図25]

図25



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2023/026257

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B 6/32(2006.01)i; ***G02B 3/08***(2006.01)i; ***G02B 5/18***(2006.01)i; ***G02B 6/30***(2006.01)i
FI: G02B6/32; G02B6/30; G02B5/18; G02B3/08

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)

G02B6/12-6/14; G02B6/26-6/27; G02B6/30-6/34; G02B6/42-6/43; G02B3/08; G02B5/18

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

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2023
Registered utility model specifications of Japan 1996-2023
Published registered utility model applications of Japan 1994-2023

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2020-173407 A (NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE) 22 October 2020 (2020-10-22) paragraphs [0021]-[0060], fig. 1-3	1-20
Y	JP 2022-058082 A (VISERA TECHNOLOGIES CO LTD) 11 April 2022 (2022-04-11) paragraphs [0021]-[0040], fig. 1-8	1-20
Y	US 2012/0328240 A1 (MA et al.) 27 December 2012 (2012-12-27) paragraphs [0039]-[0154], fig. 1-32	1-20
Y	US 2022/0137259 A1 (SONY GROUP CORPORATION) 05 May 2022 (2022-05-05) paragraphs [0016]-[0048], fig. 1-3	1-20
Y	CN 111090148 A (WUHAN UNIVERSITY) 01 May 2020 (2020-05-01) paragraphs [0038]-[0075], fig. 1-9	17-18
A	JP 2019-533834 A (KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE) 21 November 2019 (2019-11-21) entire text, all drawings	1-20

☑ 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	Date of mailing of the international search report
20 September 2023	**10 October 2023**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2023/026257

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2019-086765 A (SAMSUNG ELECTRONICS CO LTD) 06 June 2019 (2019-06-06) entire text, all drawings	1-20
A	US 2016/0299337 A1 (SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.) 13 October 2016 (2016-10-13) entire text, all drawings	1-20
P, A	US 2022/0368024 A1 (IHP GMBH - INNOVATION FOR HIGH PERFORMANCE MICROELECTRONICS/LEIBNIZ-INSTITUT FUR INNOVATIVE MIKROELE) 17 November 2022 (2022-11-17) entire text, all drawings	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2023/026257

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2020-173407 A	22 October 2020	US 2022/0057580 A1 paragraphs [0027]-[0071], fig. 1-3	
JP 2022-058082 A	11 April 2022	US 11057115 B1 column 3, line 13 to column 7, line 58, fig. 1-8 CN 114325963 A	
US 2012/0328240 A1	27 December 2012	WO 2011/100070 A1	
US 2022/0137259 A1	05 May 2022	WO 2020/200931 A1 CN 113614580 A	
CN 111090148 A	01 May 2020	(Family: none)	
JP 2019-533834 A	21 November 2019	US 2019/0258175 A1 entire text, all drawings CN 109983381 A	
JP 2019-086765 A	06 June 2019	US 2019/0137665 A1 entire text, all drawings EP 3483640 A1 KR 10-2019-0052544 A CN 109752905 A	
US 2016/0299337 A1	13 October 2016	KR 10-2016-0120653 A	
US 2022/0368024 A1	17 November 2022	EP 3799209 A1	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2023/026257

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

G02B 6/32(2006.01)i; G02B 3/08(2006.01)i; G02B 5/18(2006.01)i; G02B 6/30(2006.01)i
FI: G02B6/32; G02B6/30; G02B5/18; G02B3/08

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））

G02B6/12-6/14; G02B6/26-6/27; G02B6/30-6/34; G02B6/42-6/43; G02B3/08; G02B5/18

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	１９７１－２０２３年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２３年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２３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）

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	関連する請求項の番号
Y	JP 2020-173407 A (日本電信電話株式会社) 22.10.2020 (2020-10-22) [0021]-[0060],図1-3	1-20
Y	JP 2022-058082 A (采▲ぎょく▼科技股▲ふん▼有限公司) 11.04.2022 (2022-04-11) [0021]-[0040],図1-8	1-20
Y	US 2012/0328240 A1 (MA et al.) 27.12.2012 (2012-12-27) [0039]-[0154],図1-32	1-20
Y	US 2022/0137259 A1 (SONY GROUP CORPORATION) 05.05.2022 (2022-05-05) [0016]-[0048],図1-3	1-20
Y	CN 111090148 A (WUHAN UNIVERSITY) 01.05.2020 (2020-05-01) [0038]-[0075],図1-9	17-18
A	JP 2019-533834 A (カールスルーエ インスティテュート フュア テクノロジ) 21.11.2019 (2019-11-21) 全文,全図	1-20

☑ 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の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抵触するものではなく、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	国際調査報告の発送日
20.09.2023	10.10.2023

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
奥村　政人 2L 4752

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

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	関連する請求項の番号
A	JP 2019-086765 A (三星電子株式会社) 06.06.2019 (2019-06-06) 全文,全図	1-20
A	US 2016/0299337 A1 (SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.) 13.10.2016 (2016-10-13) 全文,全図	1-20
P, A	US 2022/0368024 A1 (IHP GMBH - INNOVATION FOR HIGH PERFORMANCE MICROELECTRONICS/LEIBNIZ-INSTITUT FUR INNOVATIVE MIKROELE) 17.11.2022 (2022-11-17) 全文,全図	1-20

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2023/026257

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2020-173407 A	22.10.2020	US 2022/0057580 A1 [0027]-[0071],図1-3	
JP 2022-058082 A	11.04.2022	US 11057115 B1 第3欄第13行-第7欄第58行, 図1-8 CN 114325963 A	
US 2012/0328240 A1	27.12.2012	WO 2011/100070 A1	
US 2022/0137259 A1	05.05.2022	WO 2020/200931 A1 CN 113614580 A	
CN 111090148 A	01.05.2020	（ファミリーなし）	
JP 2019-533834 A	21.11.2019	US 2019/0258175 A1 全文,全図 CN 109983381 A	
JP 2019-086765 A	06.06.2019	US 2019/0137665 A1 全文,全図 EP 3483640 A1 KR 10-2019-0052544 A CN 109752905 A	
US 2016/0299337 A1	13.10.2016	KR 10-2016-0120653 A	
US 2022/0368024 A1	17.11.2022	EP 3799209 A1	