

(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6月20日(20.06.2024)

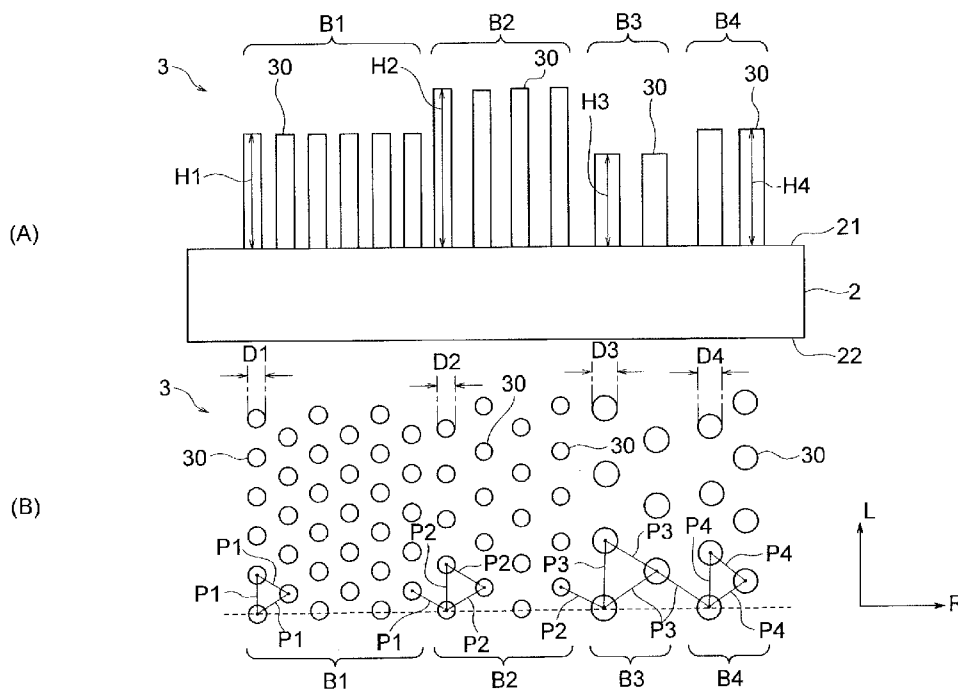


(10) 国際公開番号
WO 2024/127479 A1

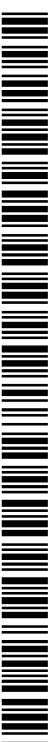
- (51) 国際特許分類:
G02B 3/08 (2006.01) *G02B 5/18* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2022/045754
- (22) 国際出願日: 2022年12月13日(13.12.2022)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人:三菱電機株式会社(MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 高川 菜月 (TAKAGAWA Natsuki); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP). 大
- 牧 正幸(OMAKI Masayuki); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP). 中井 賢也(NAKAI Kenya); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP). 藤井 宏昌(FUJII Hiromasa); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 山形 洋一, 外 (YAMAGATA Yoichi et al.); 〒1510053 東京都渋谷区代々木2丁目16番2号 甲田ビル4階 弁理士法人 山形・佐藤特許事務所 Tokyo (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,

(54) Title: OPTICAL ELEMENT AND OPTICAL APPARATUS

(54) 発明の名称: 光学素子および光学装置



(57) Abstract: This optical element (1) has a substrate (2) and a microscopic structure (3) that is formed on a surface (21) of the substrate (2) and that changes the phase of light. The microscopic structure (3) has a plurality of structures (30) which have a height (H) in a direction perpendicular to the surface (21) and a width (D) in a direction parallel to the surface (21) and which are arranged apart from each other by an interval (P) in a direction parallel to the surface (21). Of the height (H), width (D), and interval (P) of the structures (30), one or more that include the interval vary depending



WO 2024/127479 A1

BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, 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, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, 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))

on areas (B) within the microscopic structure (3).

(57) 要約 : 光学素子 (1) は、基板 (2) と、基板 (2) の表面 (2 1) に形成され、光の位相を変化させる微細構造 (3) とを有する。微細構造 (3) は、表面 (2 1) に直交する方向に高さ (H) を有し、表面 (2 1) に平行な方向に幅 (D) を有し、表面 (2 1) に平行な方向に間隔 (P) を開けて配置された複数の構造体 (3 0) を有する。構造体 (3 0) の高さ (H)、幅 (D) および間隔 (P) のうち、間隔を含む少なくとも1つが、微細構造 (3) 内の領域 (B) によって異なる。

明 細 書

発明の名称：光学素子および光学装置

技術分野

[0001] 本開示は、集光、回折等の機能を有する光学素子、および光学素子を備えた光学装置に関する。

背景技術

[0002] 近年、光等の電磁波の波長よりも小さな構造体（メタ原子とも称する）を3次元的に並べたメタマテリアルの研究が進んでいる。メタマテリアルは、自然界に存在しない物理特性を実現できるとして注目されている。

[0003] また、近年では、構造体を2次元的に配列したメタサーフェスの研究も進んでいる。メタサーフェスは、3次元的な構成を有するメタマテリアルと比較して、製造が容易である。例えばテラヘルツ光のような波長の長い光を用いる場合には、構造体を比較的大きくすることができ、メタサーフェスの製造が容易になる。

[0004] また、メタサーフェスを利用したレンズとして、基板上に構造体を2次元的に配列したメタレンズが知られている。メタレンズは、曲面状のレンズと異なり、平板状で薄型に構成することができる。また、半導体プロセスあるいはナノインプリント等の大量生産に適した方法で製造することが可能である。

[0005] メタレンズの基板は、例えば、 SiO_2 、 Si 、 TiO_2 、 Ge または GaN で構成され、複数種類の基板を重ね合わせても良い。基板が屈折率の高い材質で構成される場合、構造体と基板との界面、または基板と空気との界面において屈折率差で光が反射される。

[0006] 例えば、特許文献1には、基板上に円柱状の構造体であるピラーを2次元的に配列したレンズに関し、ピラーの高さおよび直径を領域毎に変化させ、ピラーの上端（すなわち基板から最も離れた端部）が同一平面上に並ぶようにしたものが開示されている。ピラーの高さと幅を変化させることで、光の

位相を制御することができる。

先行技術文献

特許文献

[0007] 特許文献1：特開2021-99399号公報（図4参照）

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] ピラーの直径は光の波長以下で、且つ界面での光の反射を抑制できるように決定される。例えば、波長 $125\mu\text{m}$ のテラヘルツ波に対しては、ピラーの直径は $13\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$ の範囲に制御される。一方、波長が $700\sim 2500\text{nm}$ の近赤外光に対しては、ピラーの直径を数 $10\text{nm}\sim$ 数 100nm の範囲に制御する必要がある。そのため、分解能の高い露光装置等が必要になり、製造コストが高くなる。

[0009] 本開示は、上記の課題に鑑みてなされたものであり、光学素子の製造コストを低減することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0010] 本開示の光学素子は、基板と、基板の表面に形成され、光の位相を変化させる微細構造とを有する。微細構造は、当該表面に直交する方向に高さを有し、当該表面に平行な方向に幅を有し、当該表面に平行な方向に間隔を開けて配置された複数の構造体を有する。複数の構造体は、高さ、幅および間隔のうち、間隔を含む少なくとも1つが、微細構造内の領域によって異なる。

発明の効果

[0011] 本開示では、微細構造における構造体の高さ、幅および間隔のうち、間隔を含む少なくとも1つが領域によって異なるため、例えば、比較的分解能の低い露光装置を用いても、位相の分解能を高くすることができる。そのため、光学素子の製造コストを低減することができる。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]実施の形態1の光学素子を示す斜視図である。

[図2]実施の形態1の光学素子を示す側面図である。

[図3]実施の形態1の光学素子の微細構造を示す図である。

[図4]実施の形態1の微細構造を概念的に示す図である。

[図5]実施の形態1の微細構造の光学特性を説明するための模式図(A)、(B)である。

[図6]実施の形態1の微細構造を示す断面図(A)およびその位相分布を示す図(B)である。

[図7]実施の形態1の微細構造を示す断面図(A)および平面図(B)である。

[図8]実施の形態1の光学素子の製造方法の一例を示す図(A)～(H)である。

[図9]実施の形態1の微細構造の構造体の直径を変化させた場合の、構造体の高さ、透過率および位相との関係を示すグラフ(A)～(C)である。

[図10]実施の形態1の微細構造の構造体の直径を図9(A)よりも大きくした場合の、構造体の高さ、透過率および位相との関係を示すグラフである。

[図11]実施の形態1の微細構造のピッチを図9(A)よりも大きくした場合の、構造体の高さ、透過率および位相との関係を示すグラフである。

[図12]実施の形態1の微細構造において、規定値以上の透過率が得られる構造体の高さ、位相との関係を示すグラフである。

[図13]構造体の高さおよびピッチを固定して直径のみを変化させた場合の、直径とピッチとの比、透過率、反射率および位相との関係を示す。

[図14]構造体の高さおよび直径のみを変化させた場合の構造パラメータと透過率および位相との関係を示すグラフ(A)、並びに、構造体の高さ、直径およびピッチを変化させた場合の構造パラメータと透過率および位相との関係を示すグラフ(B)である。

[図15]実施の形態2の微細構造を示す断面図(A)およびその位相分布を示す図(B)である。

[図16]実施の形態1, 2の光学素子が適用可能な光学装置の一例を示す斜視

図（A）および模式図（B）である。

発明を実施するための形態

[0013] 以下に、実施の形態に係る光学素子について、図面を参照して説明する。
以下の実施の形態は例にすぎず、実施の形態を適宜変更してもよく、また各実施の形態を適宜組み合わせてもよい。

[0014] 実施の形態 1.

<光学素子の全体構成>

まず、実施の形態 1 の光学素子 1 について説明する。図 1 は、実施の形態 1 の光学素子 1 を示す斜視図である。図 2 は、光学素子 1 を示す側面図である。

[0015] 実施の形態 1 の光学素子 1 は、光を集光し、またはコリメートするレンズである。図 2 に示すように、光学素子 1 は、平坦な基板 2 の表面 2 1 に、光の位相を変化させる凹凸構造である微細構造 3 を形成したものである。微細構造 3 は、メタサーフェスとも呼ばれる。光学素子 1 は、メタレンズとも呼ばれる。

[0016] 光学素子 1 に入射する光（図 2 に示す入射光 1 1）の波長は、例えば 30 μm 未満である。一例としては、400 nm ~ 2000 nm である。この波長帯域の光は、可視光および赤外光を含む。

[0017] 基板 2 は、光を透過する材質で構成される。例えば、基板 2 は、Si または TiO_2 で形成される。基板 2 の屈折率は、2 以上であってもよい。基板 2 の厚さは、例えば 0.3 mm 以上であり、2.0 mm 以下であることが望ましい。基板 2 は、表面 2 1 と裏面 2 2 とを有し、表面 2 1 には微細構造 3 が形成されている。

[0018] <微細構造の構成>

図 3 は、光学素子 1 の微細構造 3 を示す平面図である。図 3 に示すように、微細構造 3 は、同心円状の複数の輪帯 A 1, A 2, A 3... A m を有する。m は 2 以上の整数である。輪帯 A 1 ~ A m の同心円の中心を通り、基板 2 の厚さ方向に延在する仮想線は、光学素子 1 の光軸 C となる。輪帯 A 1, A 2

, $A_3 \dots A_m$ は、光軸Cに近い側から、この順に配列されている。

[0019] 輪帯 $A_1 \sim A_m$ のそれぞれの幅（すなわち光軸Cを中心とする径方向の寸法）は、光軸Cから離れるほど狭くなる。輪帯 $A_1 \sim A_m$ はいずれも、光に与える位相変化が $0 \sim 2\pi$ となる帯域である。輪帯 $A_1 \sim A_m$ を総称して、輪帯Aとする。

[0020] 各輪帯Aは、光軸Cを中心とする同心円状の複数の領域 $B_1, B_2, B_3 \dots B_n$ を有する。 n は2以上の整数である。領域 $B_1, B_2, B_3 \dots B_n$ は、光軸Cに近い側から、この順に配列されている。領域 $B_1 \sim B_n$ を総称して、領域Bとする。

[0021] 図4は、微細構造3の構成例を概念的に示す斜視図である。微細構造3は、複数の構造体30を2次的に配列したものである。構造体30は、例えば円柱状であり、メタ原子あるいはピラーとも呼ばれる。

[0022] 構造体30は、基板2の表面21に直交する方向（すなわち光軸Cの方向）に高さHを有し、基板2の表面21に平行な面内において幅（より具体的には直径）Dを有する。また、基板2の表面21に平行な面内において、隣り合う構造体30の中心間距離は、ピッチPである。

[0023] 構造体30は、領域 $B_1, B_2, B_3 \dots B_n$ （図3）によって、高さH、直径DおよびピッチPのうちの少なくとも1つが異なる。特に、高さH、直径DおよびピッチPのうちの、ピッチPを含む少なくとも1つが異なる。同じ領域（例えば領域 B_1 ）に含まれる構造体は、同一の高さH、同一の直径D、および同一のピッチPを有する。

[0024] このように構造体30の高さH、直径DおよびピッチPを領域B毎に変化させることで、構造体30が光に与える位相を変化させることができる。なお、構造体30の形状は円柱状に限定されず、例えば角柱状でもよい。構造体30の直径Dは、幅とも称する。また、構造体30のピッチPは、間隔とも称する。

[0025] 例えば、構造体30が光に与える位相を線形に変化させることにより、光学素子1に入射した光を偏向（屈折）させることができる。また、構造体3

0が光に与える位相をフレネルレンズのように変化させることにより、図2に示すように、入射光11を集光する機能、または発散状態で入射した光をコリメートする機能を発揮することができる。また、入射光11を分岐し、あるいは反射する機能を発揮させることもできる。

[0026] 図5(A), (B)は、光学素子1を、集光レンズまたはコリメートレンズとして構成した場合の位相分布を説明するための模式図である。図5(A), (B)において、光学素子1の中心すなわち光軸Cからの距離を r とし、光学素子1の中心から距離 r の位置における位相を $\phi(r)$ とする。光学素子1に入射する光の波長を λ とし、光学素子1であるレンズの焦点距離を f とする。

[0027] 領域 $B_1 \sim B_n$ のそれぞれについて、微細構造3の高さ H 、直径 D およびピッチ P を変化させることにより、以下の式(1)を満足する位相分布が得られる。

[数1]

$$\Phi(r) = \Phi(0) - \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{r^2 + f^2} - f \right) \dots (1)$$

$\phi(0)$ は光学素子1の中心($r=0$)における位相である。ここでは $\phi(0) = 2\pi$ とし、位相分布は 2π 毎に位相をラッピングしたものとする。

[0028] 本実施の形態では、光学素子1は、基板2の表面21に垂直に光が入射する透過型のレンズとして構成されている。しかしながら、光学素子1は、反射型のレンズ、回折格子、反射素子としても、それぞれの位相分布に合わせて構造体30を配置することにより構成することができる。

[0029] なお、図4および後述する図6(A), 7(A)等では、構造体30の底部32(図4)を同一面上に位置させ、構造体30の頂部31(図4)の位置を変化させているが、このような構成に限らず、構造体30の頂部31を同一面上に位置させて、底部32の位置を変化させてもよい。

[0030] 次に、微細構造3の構成例について説明する。図6(A)は、輪帯A1,

A 2 の領域 B 1 ~ B 1 0 の構造体 3 0 を概略的に示す径方向に沿った断面図である。図 6 (B) は、輪帯 A 1, A 2 の各領域 B の構造体 3 0 が光に与える位相 ϕ および構造体 3 0 の高さ H を示すグラフである。

[0031] 図 6 (B) の左側の縦軸は位相 ϕ を 2π で除算した値を示し、右側の縦軸は高さ H を波長 λ で除算した値を示す。横軸は、光軸 C からの距離 r を示す。

[0032] 各輪帯 A は、複数の領域 B、ここでは 1 0 の領域 B に分割されている。例えば、輪帯 A 1 は、領域 B 1, B 2 ... B 1 0 で構成される。1 番目の領域 B 1 の構造体 3 0 は、光に 2π の位相変化を与える。また、1 0 番目の領域 B 1 0 の構造体 3 0 が光に与える位相変化は、0 である。なお、ここでは各輪帯 A が 1 0 の領域 B 1 ~ B 1 0 に分割されているが、分割数は 1 0 には限定されない。

[0033] 領域 B 毎に (すなわち、領域 B 1, B 2 ... B 1 0 によって)、構造体 3 0 の高さ H、直径 D およびピッチ P の少なくとも一つが変化することで、光に与える位相を変化させる。構造体 3 0 の高さ H、ピッチ P および直径 D は、構造パラメータとも称する。

[0034] 各領域 B の構造体 3 0 により、少なくとも $0 \sim 2\pi$ の位相変化を光に与えることにより、光学素子 1 の設計を柔軟に行うことができる。なお、構造体 3 0 は、ここでは光に $0 \sim 2\pi$ の位相変化を与えるように構成されているが、 2π を超える位相変化を与えるように構成してもよい。

[0035] また、構造体 3 0 の高さ H、直径 D およびピッチ P は、構造体 3 0 と空気との界面における光の反射を抑える (より望ましくは、光の反射を生じさせない) ように決定しても良い。これにより、反射防止膜を形成しなくても透過率の高い光学素子 1 を得ることができ、低コスト化が可能となる。

[0036] <構造体の寸法および配置>

微細構造 3 における構造体 3 0 の配置、並びに高さ H、ピッチ P および直径 D は、以下のようにして決定する。第 1 ステップでは、例えば FEM (Finite Element Method: 有限要素法) を用い、高さ H

、直径DおよびピッチPをそれぞれある範囲内で変化させ、位相および透過率のデータを蓄積する。

[0037] 第2ステップでは、図6(B)に符号K1で示す理想的な位相分布を決定する。これは、例えば、光学素子1によって実現しようとしているフレネルレンズの位相分布である。この理想的な位相分布に基づき、符号K2で示すように、領域B1, B2…B10のそれぞれについて、位相の離散的な値を決定する。すなわち、領域B1の位相はT1、領域B2の位相はT2、…というように、領域B1, B2…B10の位相を決定する。

[0038] 第3ステップでは、第1ステップで蓄積した位相のデータの中から、第2ステップで求めた離散的な位相の値T1, T2…T10が得られる高さH、直径DおよびピッチP(すなわち構造パラメータ)を決定する。例えば、領域B1の構造体30であれば、位相の値T1が得られるように、高さH、直径DおよびピッチPを決定する。このようにして決定して高さHは、 H/λ として、図6(B)に符号K3で示している。

[0039] ここでは、FEMを用いて位相および透過率のデータを蓄積し、理想的な位相分布を離散化した値から構造パラメータを決定しているが、実効屈折率の解析によって各領域の構造体30の位相を計算し、構造パラメータを決定してもよい。但し、光の波長よりも直径が小さい構造体30の場合には、実効屈折率の解析によって位相を求めることが難しいため、上記FEM、あるいはRCWA(Rigorous Coupled-Wave Analysis: 厳密結合波解析)等を用いることが望ましい。

[0040] 図7(A), (B)は、微細構造3における輪帯A1の領域B1~B4を拡大して概念的に示す平面図および側面図である。

[0041] 領域B1の構造体30は、高さH1、直径D1およびピッチP1を有する。領域B2の構造体30は、高さH2、直径D2およびピッチP2を有する。領域B3の構造体30は、高さH3、直径D3およびピッチP3を有する。領域B4の構造体30は、高さH4、直径D4およびピッチP4を有する。

- [0042] 異なる領域B（例えば領域B 1と領域B 2）では、構造体30の高さH、直径DおよびピッチPの少なくとも一つが異なっていればよい。例えば、異なる2以上の領域Bで、構造体30の直径DおよびピッチPが同一で、構造体30の高さHだけが異なってもよい。
- [0043] 図7（B）に示した例では、各領域Bにおいて、構造体30が三角格子状に配列されている。但し、構造体30の配列はこの例に限らず、例えば、正方格子状に配置されていても良い。但し、構造体30を三角格子状に配列した方が、正方格子状に配列した場合よりも、構造体30の充填率を高くすることができ、位相を柔軟に変化させることができる。
- [0044] 図7（B）に示すように、光学素子1の中心（すなわち光軸C）を通る、光学素子1の半径方向を、R方向と定義する。また、光学素子1の光軸Cを中心とする円周方向を、L方向と定義する。図示の便宜上、円周方向であるL方向は、直線状に示している。
- [0045] まず、光学素子1の中心に、構造体30を配置する。この構造体30を、1番目の構造体30と称する。1番目の構造体30には、上述した蓄積データの中から、この位置での位相の離散的な値（すなわち図6（B）に示した曲線K 2上の値）に最も近い位相が得られる高さH、直径DおよびピッチPを付与する。
- [0046] 図7（B）に示した例では、1番目の構造体30は領域B 1に含まれるため、高さH 1、直径D 1、ピッチP 1が付与される。
- [0047] 次に、1番目の構造体30からピッチP 1だけ離れた位置に、2番目の構造体30を配置する。図7（B）の例では構造体30が三角格子状に配列されるため、1番目の構造体30からR方向に対して30度傾斜した方向にピッチP 1だけ離れた位置に、2番目の構造体30を配置する。2番目の構造体30には、上述した蓄積データの中から、この位置での位相の離散的な値に最も近い位相が得られる高さH、直径DおよびピッチPを付与する。
- [0048] 図7（B）に示した例では、2番目の構造体30も領域B 1に含まれるため、高さH 1、直径D 1、ピッチP 1が付与される。2番目の構造体30は

、円周方向すなわちL方向に、付与されたピッチP 1の間隔で複数配列される。

[0049] 同様に、2番目の構造体30からピッチP 1だけ離れた位置に、3番目の構造体30を配置する。3番目の構造体30には、上述した蓄積データの中から、この位置での位相の離散的な値に最も近い位相が得られる高さH、直径DおよびピッチPを付与する。3番目の構造体30は、2番目の構造体30からR方向に対して30度傾斜した方向にピッチP 1だけ離れた位置に配置する。

[0050] 図7(B)に示した例では、3番目の構造体30も領域B 1に含まれるため、高さH 1、直径D 1、ピッチP 1が付与される。3番目の構造体30は、円周方向すなわちL方向に、付与されたピッチPの間隔で複数配列される。

[0051] このようにして、輪帯A 1に含まれる領域B 1～B 10に含まれる全ての構造体30を配置し、その位置での位相の離散的な値に最も近い位相が得られる高さH、直径DおよびピッチP（すなわち構造パラメータ）を付与する。同様に、輪帯A 2～A mについても、全ての構造体30を配置し、それぞれに構造パラメータを付与する。これにより、基板2上に構造体30を配列した微細構造3が得られる。

[0052] なお、図7(B)に示した例では、構造体30を三角格子状に配置したが、構造体30を正方格子状に配置してもよい。この場合、1つ目の構造体30からR方向にピッチP 1だけ離れた位置に、2つ目の構造体30を配置する。

[0053] <光学素子の製造工程>

次に、光学素子1の製造工程について説明する。図8(A)～(H)は、光学素子1の製造工程の一例を示す図である。微細構造3は、例えば電子ビームリソグラフィ技術または深紫外リソグラフィ技術を用いて作製することができる。

[0054] まず、図8(A)に示すように、基板2を用意する。基板2は、Siまた

はTiO₂で形成され、基板2の厚さは0.3mm~2.0mmであることが望ましい。この基板2の表面に、金属マスク層4を成膜する。

[0055] 次に、図8(B)に示すように、金属マスク層4の上にレジスト5を塗布する。

[0056] 次に、図8(C)に示すように、構造体30の高さH、直径DおよびピッチPを含む、微細構造3の設計形状に応じたマスクを用いて、レジスト5を露光する。

[0057] 次に、図8(D)に示すように、レジスト5を現像する。レジスト5がネガ型の場合には、露光された部分が残し、レジスト5がポジ型の場合には、露光された部分が除去される。

[0058] 次に、図8(E)に示すように、現像後に残ったレジスト5をエッチングマスクとして、ドライエッチング等により金属マスク層4をパターンニングする。これにより、レジスト5上には、金属層40が残る。その後、図8(F)に示すように、レジスト5を取り除く。

[0059] 次に、図8(G)に示すように、レジスト5上の金属層40をエッチングマスクとして、基板2をエッチングする。これにより、基板2の表面がパターンニングされ、構造体30が形成される。構造体30は、その位置に応じた高さH、直径DおよびピッチPを有する。

[0060] その後、図8(H)に示すように、金属層40を除去する。これにより、基板2の表面に、複数の構造体30からなる微細構造3が形成される。

[0061] 高さHの異なる構造体30を製造する方法としては、例えば、グレースケールマスクを用いた露光方法、電子線露光において強度を変調させながら描画する方法、レーザの集光走査による方法、フォトリソグラフィを繰り返す方法等を用いることができる。

[0062] <作用>

光学素子1は、例えば、光学装置(後述する図16(A),(B)参照)としてのカメラまたはセンサのレンズとして用いられる。カメラは、複数のレンズを組み合わせたレンズ群を備えるのが一般的であるが、レンズ群を、

微細構造3を備えた1つの光学素子1で置き換えることができる。

[0063] カメラでは、非球面レンズを用いて少ない枚数でレンズ群を構成する場合もあるが、広角レンズの場合は高NA (Numerical Aperture) の光学系が必要となり、レンズの厚みが厚くなって製造コストが上昇する。

[0064] また、非球面レンズ1枚では、収差を抑えることが難しい。例えば、NAが0.7のレンズを用い、開口の直径を12.5mmとした場合、レンズを屈折率の高いSi (シリコン) で形成しても厚さは4.5mm以上となる。屈折率の低いガラスでは厚さが2倍以上になり、また製造困難な形状になる場合もある。

[0065] 微細構造3を備えた光学素子1を用いることにより、厚さが2.0mm以下 (より望ましくは1.0mm以下) のレンズを製造することができ、レンズを搭載する光学装置の小型化および軽量化が可能となる。

[0066] また、集光特性の良い高性能なレンズを製造するためには、微細構造3で変化させる光の位相の分解能を高くする必要がある。特許文献1では、構造体の高さおよび直径を、位相が所望の値となるように決定している。位相分布の分解能を高くするためには、構造体の幅を精密に制御する必要があり、分解能の高い露光装置を用いる必要がある。

[0067] 例えば、電子線露光装置あるいはレーザー走査による露光装置を用いる場合、分解能を高めるためには、集光スポットを小さくする必要がある。集光スポットが小さいほど、レンズ面の全体の露光に要する時間が長くなり、また高価な露光装置が必要となるため、製造コストが上昇する。

[0068] 本実施の形態では、構造体30の高さH、直径D、ピッチPを変化させるため、高さH、直径DおよびピッチPを比較的粗く制御しても、微細構造3で変化させる光の位相の分解能を高くすることができる。そのため、比較的分解能の低い露光装置を用いても、高性能なレンズを製造することができる。

[0069] <構造体の設計方法>

ここで、数値シミュレーションによる構造体30の設計方法について、さらに説明する。図9(A)は、構造体30の直径DおよびピッチPをそれぞれ固定し、高さHを変化させた場合の透過率Tおよび位相差 $\phi / 2\pi$ の変化を示すグラフである。図9(A)の左側の縦軸は透過率Tを示し、右側の縦軸は位相差 ϕ を 2π で除算した値を示す。横軸は、構造体30の高さHを示す。

[0070] 図9(A)のグラフから、構造体30の高さHが大きくなるほど、位相差 ϕ が大きくなることが分かる。また、透過率Tは高さHによって周期的に変化し、従って透過率Tの高くなる高さHが存在することがわかる。

[0071] 図9(B)は、図9(A)と同じピッチPで、直径Dを図9(A)よりも小さくした場合の、構造体30の高さHと透過率Tおよび位相差 $\phi / 2\pi$ との関係を示すグラフである。図9(C)は、図9(A)と同じピッチPで、直径Dを図9(B)よりもさらに小さくした場合の、構造体30の高さHと透過率Tおよび位相差 $\phi / 2\pi$ との関係を示すグラフである。図9(B), (C)のいずれにおいても、縦軸および横軸は図9(A)と同様である。

[0072] 図9(B), (C)では、図9(A)と比較して、高さHの変化に対する位相差 ϕ の変化量が小さい。また、透過率Tは高さHの変化に対して周期的に変化するものの、図9(A)と比較して透過率Tは全般に低い。

[0073] 図10は、図9(A)と同じピッチPで、直径Dを図9(A)よりも大きくした場合の、高さHと透過率Tおよび位相差 $\phi / 2\pi$ との関係を示すグラフである。縦軸および横軸は図9(A)と同様である。図10では、高さHの変化に対して、透過率Tの変化が周期的でなくなり、また、透過率Tが急激に変化し、透過率が0.1以下となる部分が生じる。

[0074] 図11は、図9(A)と同じ直径Dで、ピッチPを図9(A)よりも大きくした場合の、高さHと透過率Tおよび位相差 $\phi / 2\pi$ との関係を示すグラフである。縦軸および横軸は図9(A)と同様である。ピッチPが大きくなるほど実効屈折率が大きくなるため、図9(A)と比較して高さHの変化に対する位相差 ϕ の変化量は小さくなる。

[0075] 光学素子 1 の設計を容易にするため、高さ H の変化によって急激に透過率 T が変化する直径 D とピッチ P との組み合わせ（図 10 参照）は避けることが望ましい。直径 D とピッチ P との複数の組み合わせにおいて高さ H を変化させ、透過率 T が高くなる高さ H、直径 D およびピッチ P の組み合わせを採用する。これにより、反射光を抑えながら位相を変化させることができる。

[0076] 図 12 は、対象となる光の波長を 685 nm とし、TiO₂ 基板で光学素子 1 を設計した場合に、透過率が 96% 以上となる構造体 30 の高さ H と位相差 $\phi / 2\pi$ との関係を示すグラフである。対象となる光の波長を 905 nm とし、Si 基板で光学素子 1 を設計した場合に、透過率が 85% 以上となる構造体 30 の位相差 $\theta / (2\pi)$ と高さ H との関係も併せて示している。図 12 の縦軸は位相差 ϕ を 2π で除算した値を示し、横軸は高さ H を波長 λ で除算した値を示す。

[0077] なお、図 12 には、光の波長が 685 nm で TiO₂ 基板を用いた場合のデータを「+」のプロットで示し、光の波長が 905 nm で Si 基板を用いた場合のデータを「-」のプロットで示している。図 12 の「+」と「-」のプロットから、光の波長が 685 nm で TiO₂ 基板を用いた場合のデータも、光の波長が 905 nm で Si 基板を用いた場合のデータも、共通の直線 F (1) ~ F (5) に集中していることが理解される。

[0078] 透過率 T が高くなる時の直径 D と高さ H の組み合わせは複数存在する。周期的に透過率 T が高くなるポイントでは、 $\phi / 2\pi$ と H / λ との関係は、以下の式 (2) の通りである。

[数2]

$$\frac{\phi}{2\pi} = c - \frac{H}{\lambda} + 0.5n \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad \dots (2)$$

[0079] 式 (2) において、C は定数であり、ここでは $c = 0.23 \pm 1$ である。 λ は、光の波長である。図 12 に示した直線 F (1) ~ F (5) は、式 (2) において、n を 1, 2, 3, 4, 5 と変化させ、 $c = 0.23$ とした場合の直線に相当する。

- [0080] 直径DのピッチPに対する割合 (D/P) が小さすぎると、図9 (C) のように透過率Tが低くなり、 D/P が大きすぎると、図10に示すように透過率Tの変動が大きくなる。
- [0081] そのため、構造体30の直径DおよびピッチPは、透過率Tの低下を抑制し、且つ変動を抑制できるように設定するのが望ましい。具体的には、例えば、波長685nm用の光学素子1をTiO₂基板で作製する場合、構造体30の直径Dを150nm~250nmの範囲内とし、ピッチPを300nm~450nmの範囲内とするのが望ましい。
- [0082] 上記の直径DおよびピッチPの範囲は、波長λの光に対し、光学素子1を屈折率nの基板2を用いて作製する場合に一般化することができる。すなわち、TiO₂の屈折率をn₀とし、光の波長685nmをλ₀とする。また、 $\alpha = (\lambda/\lambda_0) / (n/n_0)$ とする。構造体30の直径Dは、 $\alpha \times 150 \text{ nm} \sim \alpha \times 250 \text{ nm}$ の範囲内に設定するのが望ましく、ピッチPは、 $\alpha \times 300 \text{ nm} \sim \alpha \times 450 \text{ nm}$ の範囲内に設定するのが望ましい。
- [0083] また、上記の直径Dの範囲の下限値である $\alpha \times 150 \text{ nm}$ は、 $150 \times (n_0/\lambda_0) \times (\lambda/n)$ と表すことができ、上限値である $\alpha \times 250 \text{ nm}$ は、 $250 \times (n_0/\lambda_0) \times (\lambda/n)$ と表すことができる。光の波長λ₀=685nmとし、TiO₂の屈折率をn₀=2.58とすると、構造体30の直径Dの範囲は、 $0.56 \times \lambda/n \sim 0.95 \times \lambda/n$ と表すことができる。同様に、構造体30のピッチPの範囲は、 $1.1 \times \lambda/n \sim 1.7 \times \lambda/n$ と表すことができる。
- [0084] なお、構造体30の直径DおよびピッチPは領域B毎に異なるが、全ての領域B₁~B_n (図3) で、構造体30の直径Dが $0.56 \times \lambda/n \sim 0.95 \times \lambda/n$ の範囲内にあり、構造体30のピッチPが $1.1 \times \lambda/n \sim 1.7 \times \lambda/n$ の範囲内にあることが望ましい。
- [0085] 式(2)には、構造体30の高さH/λと位相差φ/2πとの関係を示したが、製造上の限界がある。すなわち、例えば、構造体30のピッチPに対する直径Dの割合が0.8を超える場合 (すなわち $D/P > 0.8$ の場合)

、基板2の表面積に占める構造体30の面積の割合が大きくなり、アスペクト比が高くなってエッチングが難しくなる。

[0086] そのため、位相差 $\phi / 2\pi$ の上限を、 $D/P = 0.8$ となる構造体30の実効屈折率 n_{eff} から求められる位相 ϕ に基づいて決定しても良い。

[0087] 構造体30の直径DおよびピッチPは、ある一定の幅（例えば10nm刻み）で設定しても良い。直径DおよびピッチPの幅を小さく設定すると、微細構造3の製造時に高い分解能の露光装置を用いなければならない。構造体30の設計時に、考慮すべき高さH、直径D、ピッチPの組み合わせが多くなり、位相との関係を取得することが容易ではなくなる。

[0088] 例えば、直径DおよびピッチPを規定値刻み（例えば10nm刻み）で設定することにより、露光装置の分解能を低くして製造コストを低減し、また、構造体30の設計を容易にすることができる。直径DおよびピッチPは、5nm刻み、または15nm刻み等、5nmの整数倍刻みで設定してもよい。また、5nmの整数倍刻みに限らず、数nm刻み～数10nm刻みで設定しても良い。また、直径DおよびピッチPだけでなく、高さHを規定値刻みで設定しても良い。

[0089] 上記で構造体30の位相 ϕ と高さHとの関係について説明した。以下では、構造体30の位相 ϕ と直径DおよびピッチPとの関係について説明する。

[0090] 対象となる光の波長を λ とし、空気の屈折率を n_a とし、構造体30の実効屈折率を n_{eff} とする。また、光学素子1の中心位置（すなわち光軸C）での位相を $\phi(0)$ とする。構造体30による位相変化は、次の式(3)で表される。

[数3]

$$\Phi = \Phi(0) - n_{eff} \times h \times \frac{2\pi}{\lambda} \dots (3)$$

[0091] ここで、実効屈折率 n_{eff} は、空気の屈折率 n_a と、微細構造3の加工前の基板2（すなわち図8(A)に示した基板2）の屈折率 n_s と、構造体30の直径DおよびピッチPとを用いて、簡単な近似式として、以下の(4)式で

表される。

[数4]

$$n_{eff} = \sqrt{\left(\frac{\pi D^2}{2\sqrt{3}P^2} \times n_s^2\right) + \left(\left(1 - \frac{2\pi D^2}{2\sqrt{3}P^2}\right) \times n_a^2\right)} \quad \dots (4)$$

[0092] 微細構造 3 が単純な回折格子のような構造であれば、実効屈折率 n_{eff} は式 (4) でよく近似できるが、本実施の形態の構造体 30 のように波長よりも直径 P が小さく、また高さ H が低い構造体の場合、実際の実効屈折率は、式 (4) で計算された実効屈折率よりも小さくなる。

[0093] 回折格子の高さを h とすると、回折格子の実効屈折率 $n(h)_{eff}$ は、以下の式 (5) で表されることが知られている。 $n(0)_{eff}$ は、高さ 0 の回折格子の実効屈折率である。また、 n_L は、回折格子の高さ h を無限大とみなしたときの実効屈折率であり、上記の式 (4) で求められる。 $(dn(h)_{eff}^2) / (d(hk))$ は、 $n(h)_{eff}^2$ の 2 回微分を表す。この微分方程式を数値的に解くことで、実効屈折率が計算される。

[数5]

$$n(h)_{eff}^2 = n(0)_{eff}^2 + \frac{2}{\pi} (n_L^2 - n(0)_{eff}^2) \arctan \left(\pi^2 \frac{\frac{dn(h)_{eff}^2}{d(hk)} \frac{h}{\lambda}}{n_L^2 - n(0)_{eff}^2} \right) \quad \dots (5)$$

[0094] 式 (5) における回折格子の高さ h は、本実施の形態の構造体 30 の高さ H に置き換えることができる。

[0095] 構造体 30 のピッチ P に対する直径 D の割合が小さいほど、実効屈折率は小さくなる。そのため、先行文献 1 に記載されているように、単純に近似した実効屈折率を使用して構造体 30 の高さ H を設計した場合、高い透過率が得られる高さからずれ、光学素子 1 の透過率が低くなる。

[0096] 厳密な有効屈折率は、RCWA、FEM、FDTD (Finite-Dif

ference-Time-Domain :有限差分時間領域) 法等の数値シミュレーションを用いて求めることができる。上述した図9 (A) ~図12は、FEMを用いた数値シミュレーションにより、構造体30の構造パラメータを変化させたときの位相 ϕ および透過率Tを求めた結果を示したものである。

[0097] 次に、構造体30の高さH、直径DおよびピッチPを変化させることによる効果について、更に説明する。図13は、対象となる光の波長を685nmとし、光学素子1をTiO₂で構成とした場合、構造体30の高さHおよびピッチPを固定して、直径Dのみ変化させた場合の透過率T、反射率Rおよび位相差 $\phi / 2\pi$ の解析結果を示す。

[0098] 図13の左側の縦軸は透過率Tおよび反射率Rを示し、右側の縦軸は位相差 $\phi / 2\pi$ を示す。横軸は直径DをピッチPで除算した値(D/P)を示す。

[0099] 光学素子1 (ここではレンズ) と空気との屈折率差による界面での反射のため、光学素子1の透過率は全体的に低く、80%程度である。光学素子1の基板2の実効屈折率 n_s と、空気の屈折率 n_a を用いて、界面のフレネル反射による反射率 R_F は、次の(6)式で表すことができる。

[数6]

$$R_F = \left(\frac{n_s - n_a}{n_s + n_a} \right)^2 \cdots (6)$$

[0100] 構造体30の反射率Rは、フレネル反射による反射率 R_F よりも小さい。また、図13において、透過率が急激に変化する共鳴点では、透過率がほぼ0%となる。

[0101] 図14 (A) は、ピッチPを固定し、直径Dを10nm刻みで変化させ、高さHを20nm刻みで変化させた場合に、透過率Tが99.5%以上となる構造パラメータ (高さH、直径D、ピッチP) の組み合わせと、透過率Tおよび位相差 $\phi / 2\pi$ との関係を示すグラフである。左側の縦軸は透過率Tを示し、右側の縦軸は位相差 $\phi / 2\pi$ を示し、横軸は組み合わせを示す番号

(セット番号) i を示す。

[0102] 図14(B)は、直径 D とピッチ P をそれぞれ 10 nm 刻みで変化させ、高さ H を 20 nm 刻みで変化させた場合に、透過率 T が 99.5% 以上となる構造パラメータ(高さ H 、直径 D 、ピッチ P)の組み合わせと、透過率 T および位相差 $\phi/2\pi$ との関係を示すグラフである。左側の縦軸は透過率 T を示し、右側の縦軸は位相差 $\phi/2\pi$ を示し、横軸は組み合わせを示す番号(セット番号) i を示す。

[0103] 図14(A)では高さ H と直径 D のみを変化させているため、構造パラメータの組み合わせの数(i)が少なく、位相分布がまばらになる。そのため、図14(A)では、位相差 $\phi/2\pi$ が $0.6\sim 0.7$ の範囲となる構造パラメータの組み合わせが存在しない。言い換えると、位相差 $\phi/2\pi$ について 0.1 以上の区間の欠陥が生じる。そのため、光学素子1が光に与える位相分布の精度が低くなる。

[0104] これに対し、図14(B)では高さ H 、直径 D およびピッチ P を変化させているため、構造パラメータの組み合わせの数(i)が多い。そのため、位相差 $\phi/2\pi$ に高精度に対応する構造パラメータが存在する。すなわち、高い透過率を維持しながら、滑らかな位相分布を得ることができる。

[0105] <実施の形態1の効果>

以上説明したように、本実施の形態1の光学素子1は、基板2の表面に、光の位相を変化させる微細構造3を有し、微細構造3は複数の構造体30を有する。構造体30の高さ H 、直径(すなわち幅) D およびピッチ(すなわち間隔) P は、微細構造3内の領域Bによって異なる。そのため、露光装置の分解能を高くせずに、位相分布を高精度に制御することができ、光学素子1の製造コストを低減することができる。

[0106] また、光の波長を λ とし、基板2の屈折率を n とすると、構造体30のピッチ P を $1.1\times\lambda/n\sim 1.7\times\lambda/n$ とすることにより、光学素子1の透過率を高くし、また透過率のばらつきを抑制することができる。

[0107] また、構造体30の直径 D を $0.56\times\lambda/n\sim 0.95\times\lambda/n$ とする

ことにより、光学素子 1 の透過率を高くし、また透過率のばらつきを抑制することができる。

[0108] また、微細構造 3 内の領域 B によって、構造体 30 のピッチ P が規定値刻み（例えば 10 nm 刻み）で設定され、構造体 30 の直径幅 D が規定値刻み（例えば 10 nm 刻み）で設定されるため、露光装置の分解能を高くせずに、位相分布を高精度に制御することができる。

[0109] また、構造体 30 は、構造体 30 と空気との界面での光の反射を抑える高さ H、直径 D およびピッチ P を有するため、反射防止膜等を設けなくても、透過率の高い光学素子 1 を得ることができ、製造コストをさらに向上することができる。

[0110] また、構造体 30 の高さ H が上記の（2）式で表されるように決定されるため、光の波長あるいは基板 2 の材質を変えても、透過率の高い光学素子 1 を得ることができる。

[0111] また、微細構造 3 の複数の領域 B のうち、2 以上の領域で、構造体 30 の高さ H のみを異ならせ、構造体 30 の直径 D およびピッチ P を同じにすれば、当該 2 以上の領域 B についてはエッチング深さを変えるだけで位相分布を制御することができる。

[0112] また、波長が 30 μ m 未満の光を対象としているため、可視光および赤外光に利用可能な光学素子 1 を得ることができる。

[0113] また、微細構造 3 が 2π の位相差毎に同心円状の複数の輪帯 A₁ ~ A_m に分割され、各輪帯 A が同心円状の複数の領域 B₁ ~ B_n に分割され、各領域 B に含まれる複数の構造体 30 は、高さ H、直径 D およびピッチ P が同一である。そのため、例えばフレネルレンズと同一の機能を有する光学素子 1 を実現することができる。

[0114] また、光学素子 1 における光の反射率が、基板 2 の屈折率 n と空気の屈折率とからフレネル回折で計算される反射率よりも小さいため、光学素子 1 と空気との界面における光の反射および吸収を低減することができる。

[0115] また、光学素子 1 の厚さを 2 mm 以下にすることにより、厚さの薄い光学

装置 8 への搭載が可能になり、光学装置 8 の小型化、軽量化に資することができる。

[0116] <実施の形態 2>

次に、実施の形態 2 の光学素子 1 A について説明する。以下の説明では、実施の形態 1 の光学素子 1 に対応する構成要素に、同一の符号を付して説明する。

[0117] 上述した実施の形態 1 の光学素子 1 の微細構造 3 では、理想的な位相分布を近似するように構造体 3 0 が配置されていた。これに対し、実施の形態 2 の光学素子 1 A の微細構造 3 A では、理想的な位相分布を近似しつつ、光に与える位相が小さくなるほど構造体 3 0 の高さが低くなるように、構造体 3 0 が配置されている。

[0118] 微細構造 3 A は、実施の形態 1 で図 3 を参照して説明したように、同心円状の複数の輪帯 A 1, A 2, A 3...A m を有する。各輪帯 A は、同心円状の複数の領域 B 1, B 2, B 3...B n を有する。ここでは輪帯 A が 6 つの領域 B 1 ~ B 6 に分割されているが、分割数は 6 に限らず、任意である。各領域 B には、複数の構造体 3 0 が配置されている。

[0119] 図 1 5 (A) は、輪帯 A 1, A 2 の各領域 B の構造体 3 0 を概略的に示す、径方向に沿った断面図である。図 1 5 (B) は、輪帯 A 1, A 2 の各領域 B の構造体 3 0 が光に与える位相 ϕ および構造体 3 0 の高さ H を示すグラフである。縦軸および横軸は、図 6 (B) と同様である。

[0120] 実施の形態 2 の微細構造 3 A では、各領域 B の構造体 3 0 の高さ H が、より光学素子 1 の中心 (光軸 C) に近い領域 B の構造体 3 0 の高さ H 以下となるように、各領域 B 1 ~ B 6 の構造体 3 0 が配置されている。

[0121] 図 1 5 (A), (B) に示した例では、領域 B 2 の構造体 3 0 の高さ H は、領域 B 1 の構造体 3 0 の高さ H よりも低い。また、領域 B 3 の構造体 3 0 の高さ H は、領域 B 2 の構造体 3 0 の高さ H よりも低い。領域 B 4 ~ B 6 の構造体 3 0 についても同様である。

[0122] 実施の形態 2 の光学素子 1 A の製造工程は、実施の形態 1 の光学素子 1 の

製造工程（図8（A）～（H））と概ね同様である。実施の形態2の光学素子1Aでは、構造体30の高さの急激な変化が抑えられるため、基板2のエッチング工程（図8（G））における加工性が向上する。これにより、製造工程を簡単にし、製造コストを低減することができる。

[0123] 実施の形態2の光学素子1Aを設計する際には、実施の形態1と同様、各構造体30における位相が、理想的な位相分布（図15（B）における符号K1）を離散化した値（図15（B）における符号K2）に最も近い値となるように、各構造体30の高さH、直径DおよびピッチPを決定する。但し、実施の形態2では、各領域Bの構造体30の高さHが、その領域Bよりも光学素子1Aの中心に近い領域Bの構造体30の高さH以下となるように決定する。

[0124] 上述した点を除き、実施の形態2の光学素子1Aは、実施の形態1の光学素子1と同様に構成される。

[0125] 以上説明したように、実施の形態2の光学素子1Aでは、微細構造3Aの各領域Bにおける構造体30の高さが、当該領域Bよりも光学素子1Aの中心に近い領域Bにおける構造体30の高さH以下であるため、構造体30の高さの急激な変化が抑えられる。これにより、基板2のエッチング工程の作業性を向上することができ、製造コストを低減することができる。

[0126] 実施の形態1, 2の光学素子1, 1Aの微細構造3, 3A（すなわちメタサーフェス）の形状の解析方法について、補足して説明する。球または楕円体等の立体構造の解析方法として、ミー（Mie）共振器による散乱を利用する方法が知られているが、この方法は任意形状の構造体（すなわちメタ原子）を有する微細構造への適用は難しい。複雑な形状の微細構造3, 3Aの解析方法としては、電磁界シミュレーションが望ましい。具体的には、上述したFDTD、RCWAおよびFEM、並びにBPM（Beam Propagation Method）等が望ましい。

[0127] 実施の形態1, 2の光学素子1, 1Aは、撮像装置等の光学装置8に適用することができる。例えば、図16（A）は、光学素子1を備えた光学装置

8の外観を示す斜視図であり、図16(B)は光学装置8の内部構成を示す模式図である。図16(A)、(B)に示すように、光学素子1は、光学装置8のレンズとして用いられる。

[0128] 光学装置8は、光学素子1と、光学素子1の光軸C上に配置された受光素子9と、これらを覆う筐体80とを有する。筐体80の前面には、光学素子1と対向するように開口部81が形成されている。また、撮像時に使用されるスイッチ82等が設けられている。光学素子1は、被写体の像を受光素子9に結像させ、受光素子9は受信した光信号を電気信号に変換する。

[0129] カメラは複数のレンズを組み合わせたレンズ群を備えるのが一般的であるが、レンズ群を光学素子1で置き換えることができる。光学素子1は厚さが薄く、例えば2mm以下とすることも可能であるため、薄型でコンパクトな光学装置8を実現することができる。光学素子1は、カメラに限らず、センサ、あるいは他の光学装置としても実現することもできる。

[0130] 以上、望ましい実施の形態について具体的に説明したが、本開示は上記の実施の形態に限定されるものではなく、各種の改良または変形を行なうことができる。

符号の説明

[0131] 1, 1A 光学素子、 2 基板、 3, 3A 微細構造、 4 金属マスク、 5 レジスト、 8 光学装置、 9 受光素子、 21 表面、 22 裏面、 30 構造体、 40 金属層、 A1~Am 輪体、 B1~Bn 領域、 C 光軸、 K1 理想的な位相分布、 K2 理想的な位相分布を離散化した値。

請求の範囲

- [請求項1] 基板と、
前記基板の表面に形成され、光の位相を変化させる微細構造と
を有し、
前記微細構造は、複数の構造体を有し、
前記複数の構造体の各構造体は、前記表面に直交する方向に高さを
有し、前記表面に平行な方向に幅を有し、前記表面に平行な方向に間
隔を開けて配置され、
前記構造体の高さ、幅および間隔のうち、間隔を含む少なくとも1
つが、前記微細構造内の領域によって異なる
ことを特徴とする光学素子。
- [請求項2] 前記光の波長を λ とし、前記基板の屈折率を n とすると、
前記構造体の間隔は、 $1.1 \times \lambda / n$ 以上、 $1.7 \times \lambda / n$ 以下で
ある
ことを特徴とする請求項1に記載の光学素子。
- [請求項3] 前記光の波長を λ とし、前記基板の屈折率を n とすると、
前記構造体の幅は、 $0.56 \times \lambda / n$ 以上、 $0.95 \times \lambda / n$ 以下
である
ことを特徴とする請求項1または2に記載の光学素子。
- [請求項4] 前記微細構造の複数の領域で、前記構造体の間隔が規定値刻みで設
定され、前記構造体の幅が規定値刻みで設定される
ことを特徴とする請求項1から3までのいずれか1項に記載の光学
素子。
- [請求項5] 前記微細構造の複数の領域で、前記構造体の高さが規定値刻みで設
定される
ことを特徴とする請求項4に記載の光学素子。
- [請求項6] 前記構造体は、当該構造体と空気との界面での前記光の反射を生じ
させない、高さ、幅および間隔を有する

ことを特徴とする請求項 1 から 5 までのいずれか 1 項に記載の光学素子。

- [請求項7] 前記光の波長を λ とし、位相を ϕ とし、 n を整数とし、 c を定数 0.23 とすると、
前記構造体の高さ H は、以下の式で表される

[数7]

$$\frac{\Phi}{2\pi} = c - \frac{H}{\lambda} + 0.5n \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

ことを特徴とする請求項 1 から 6 までのいずれか 1 項に記載の光学素子。

- [請求項8] 前記微細構造は、前記構造体の高さが異なり、前記構造体の幅および間隔がいずれも同じである 2 以上の領域を有する

ことを特徴とする請求項 1 から 7 までのいずれか 1 項に記載の光学素子。

- [請求項9] 前記光の波長は、 $30 \mu\text{m}$ 未満である

ことを特徴とする請求項 1 から 8 までのいずれか 1 項に記載の光学素子。

- [請求項10] 前記微細構造は、 2π の位相差毎に同心円状の複数の輪帯に分割され、

各輪帯は、同心円状の複数の領域に分割され、各領域に含まれる複数の構造体は、高さ、幅および間隔が同一である

ことを特徴とする請求項 1 から 9 までのいずれか 1 項に記載の光学素子。

- [請求項11] 前記微細構造の各領域における前記構造体の高さは、当該領域よりも前記同心円の中心に近い領域における前記構造体の高さ以下であることを特徴とする請求項 10 に記載の光学素子。

- [請求項12] 前記光学素子における光の反射率が、前記基板の屈折率 n と空気の

屈折率とからフレネル回折で計算される反射率よりも小さい

ことを特徴とする請求項 1 から 1 1 までのいずれか 1 項に記載の光学素子。

[請求項13] 前記光学素子の厚さは、0.3 mm 以上、2 mm 以下である

ことを特徴とする請求項 1 から 1 2 までのいずれか 1 項に記載の光学素子。

[請求項14] 前記構造体は、前記表面に直交する方向に延在する柱状である

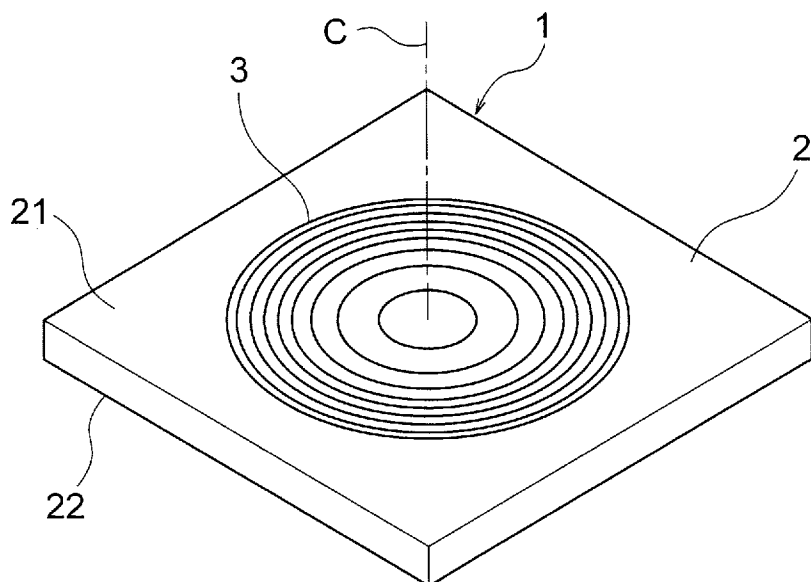
ことを特徴とする請求項 1 から 1 3 までのいずれか 1 項に記載の光学素子。

[請求項15] 請求項 1 から 1 4 までのいずれか 1 項に記載の光学素子と、

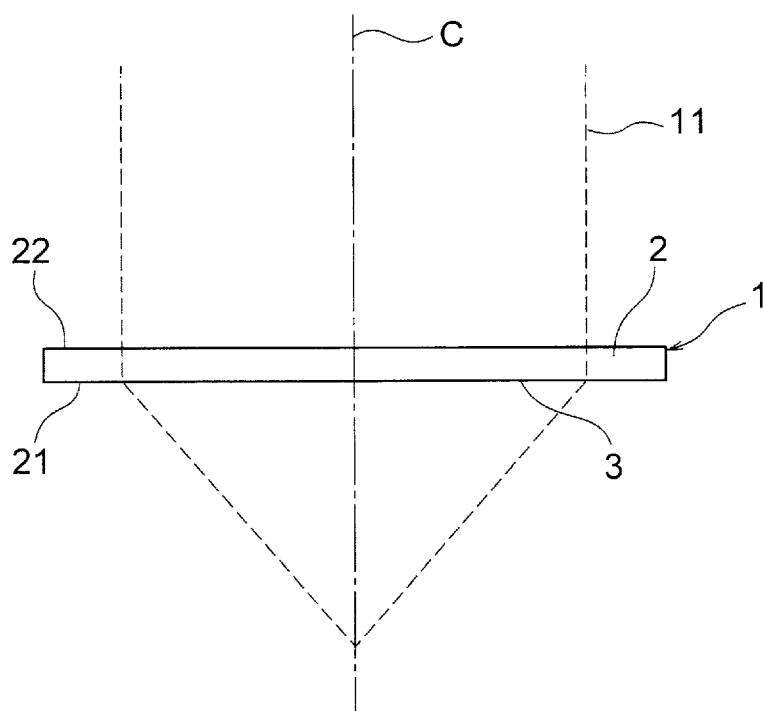
前記光学素子を通し、または前記光学素子で反射された光を受光する受光素子と

を備えたことを特徴とする光学装置。

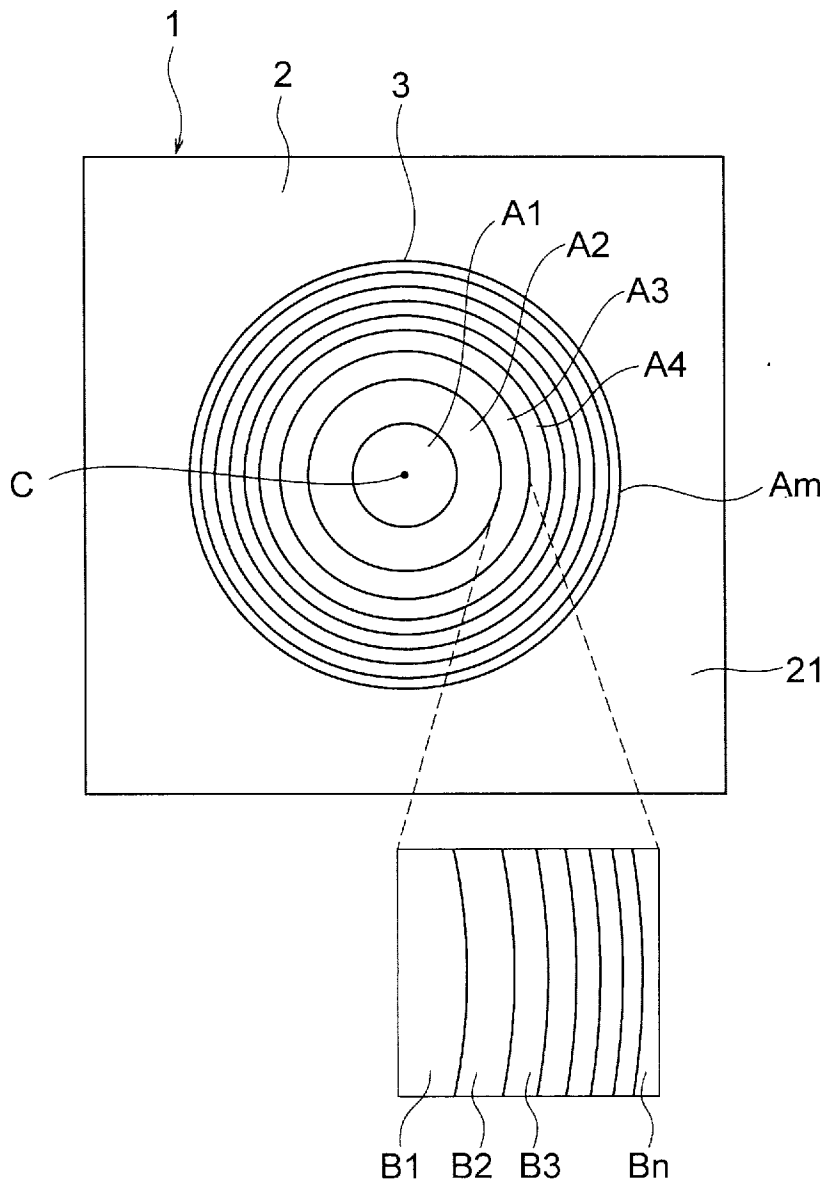
[図1]



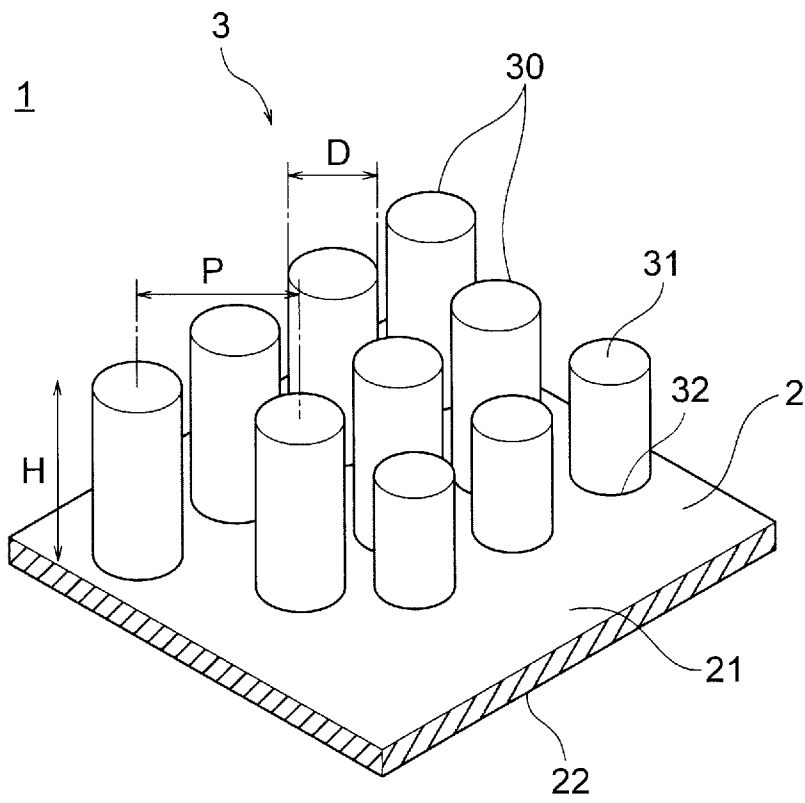
[図2]



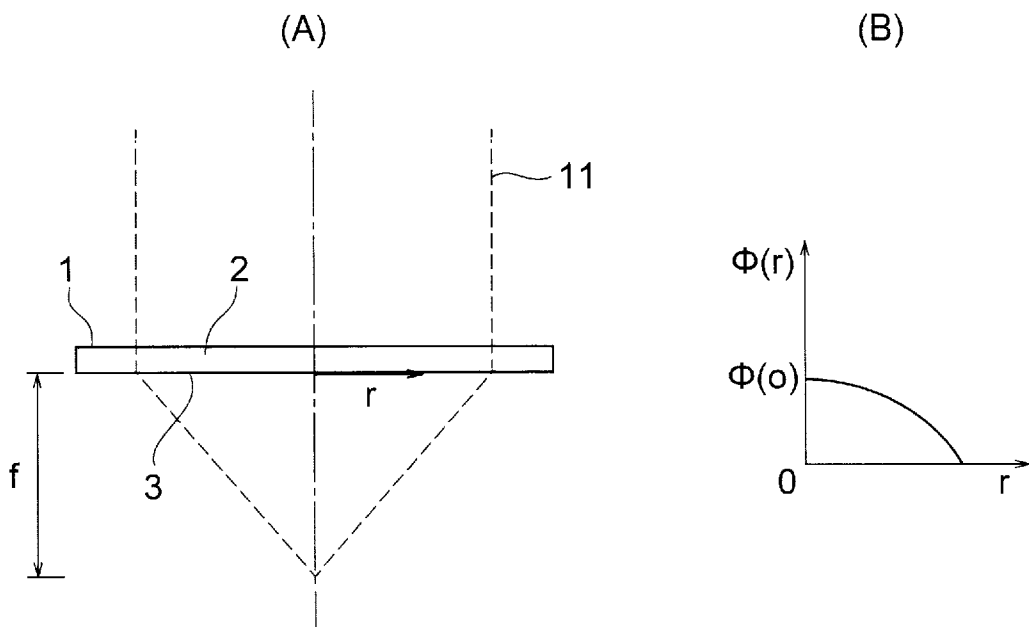
[図3]



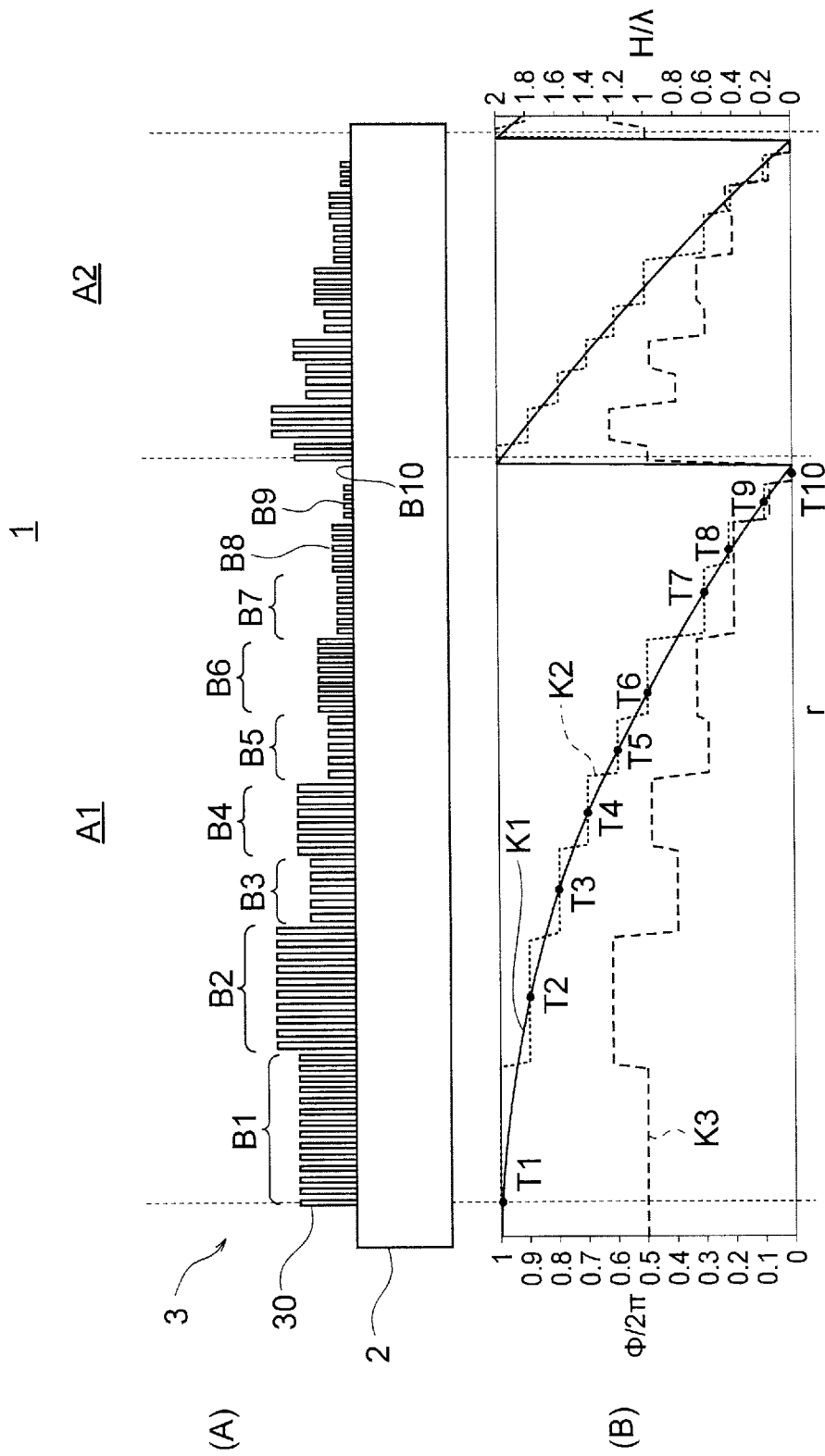
[図4]



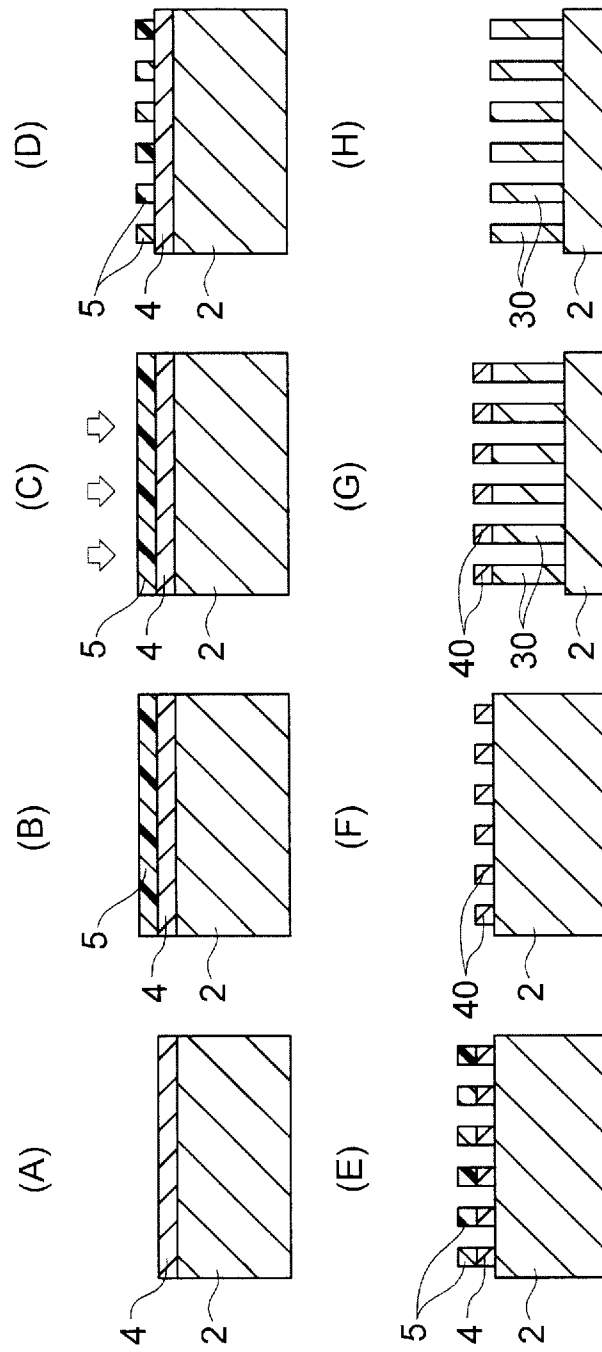
[図5]



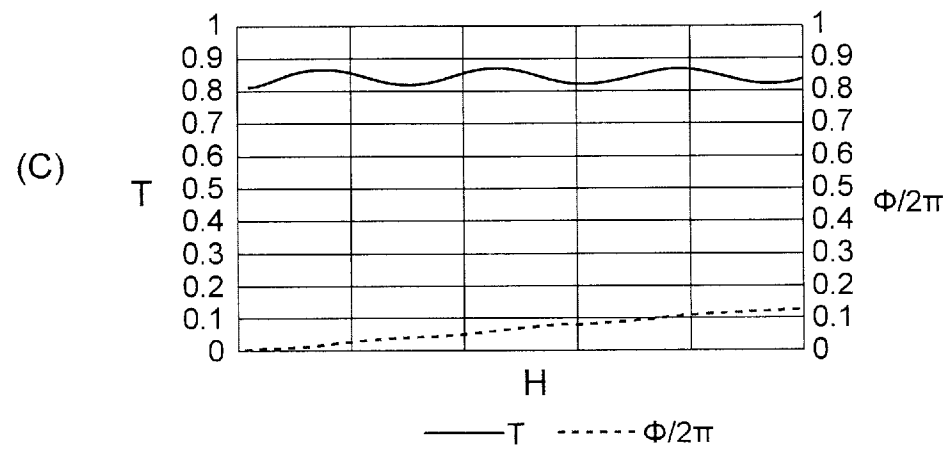
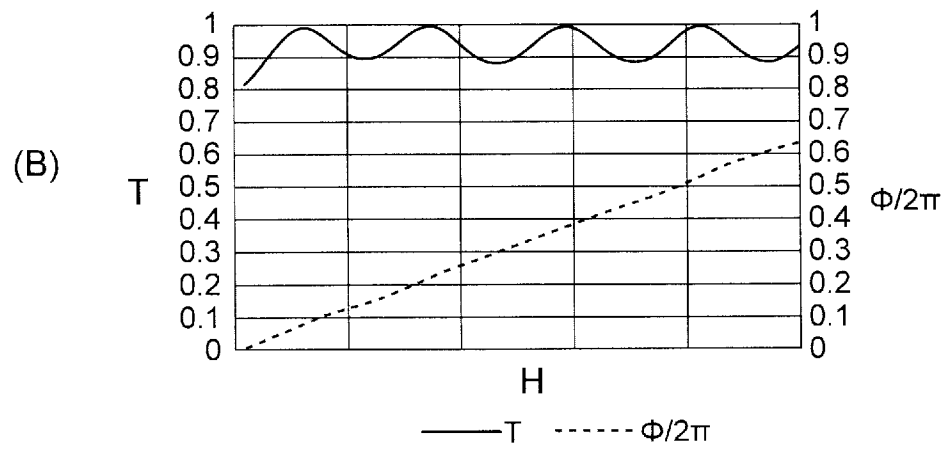
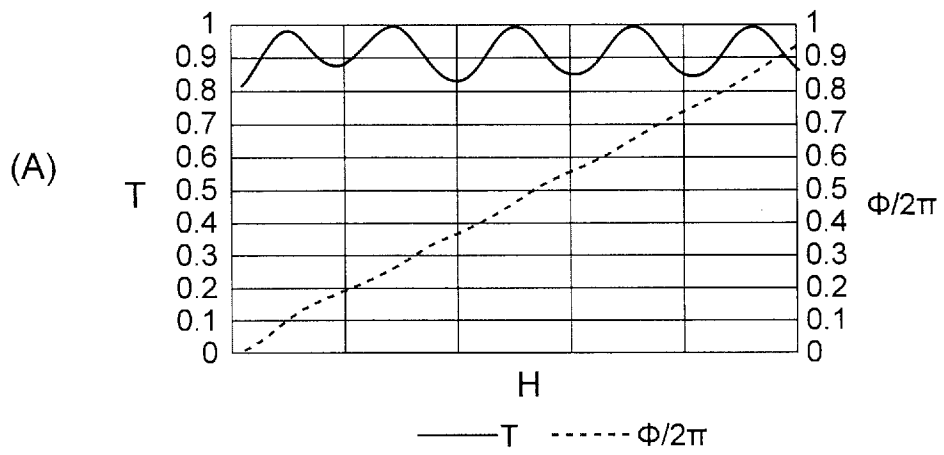
[図6]



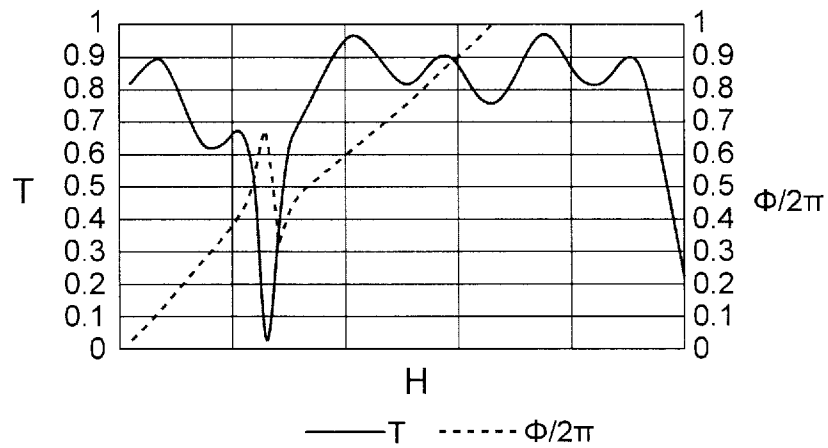
[図8]



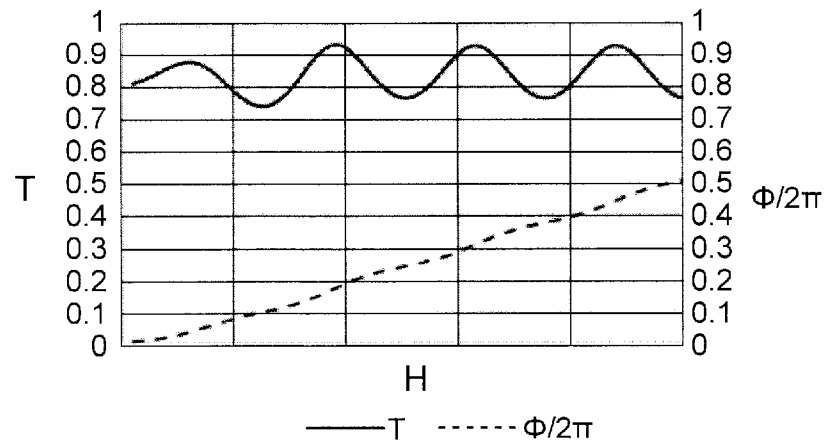
[図9]



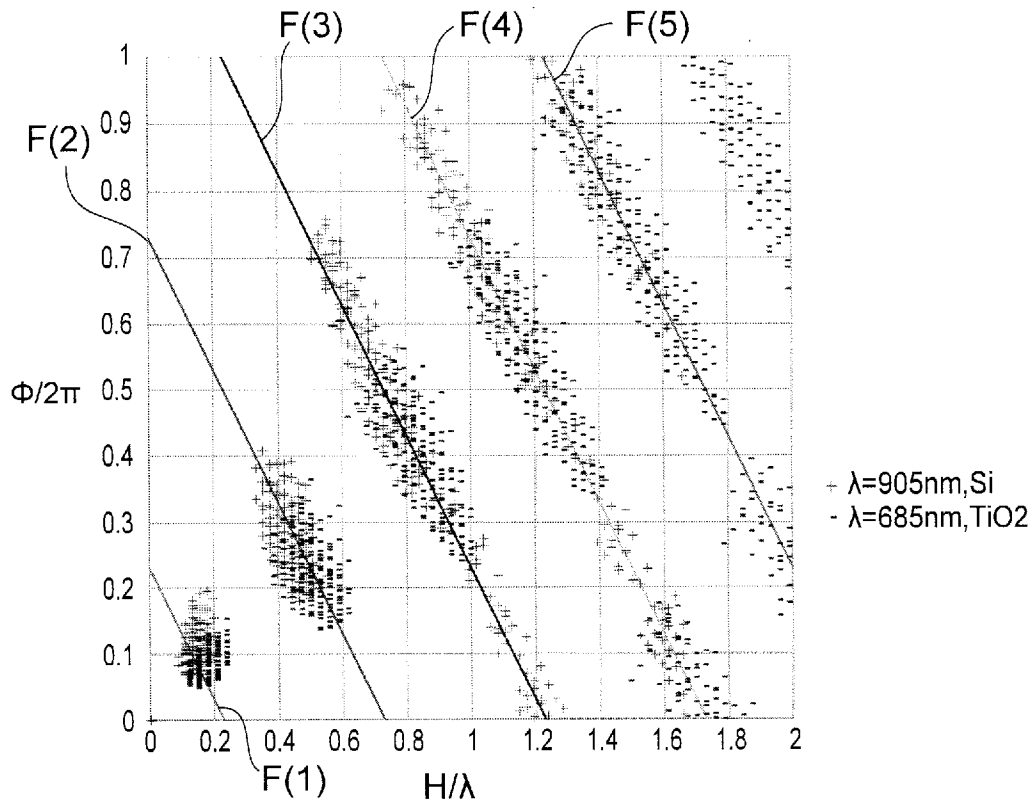
[図10]



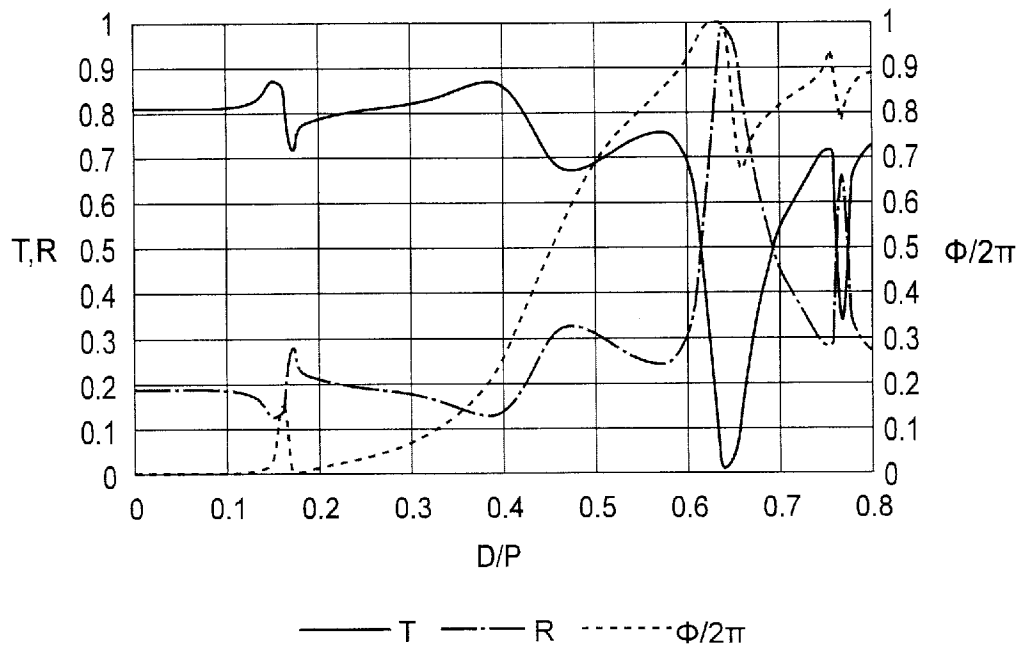
[図11]



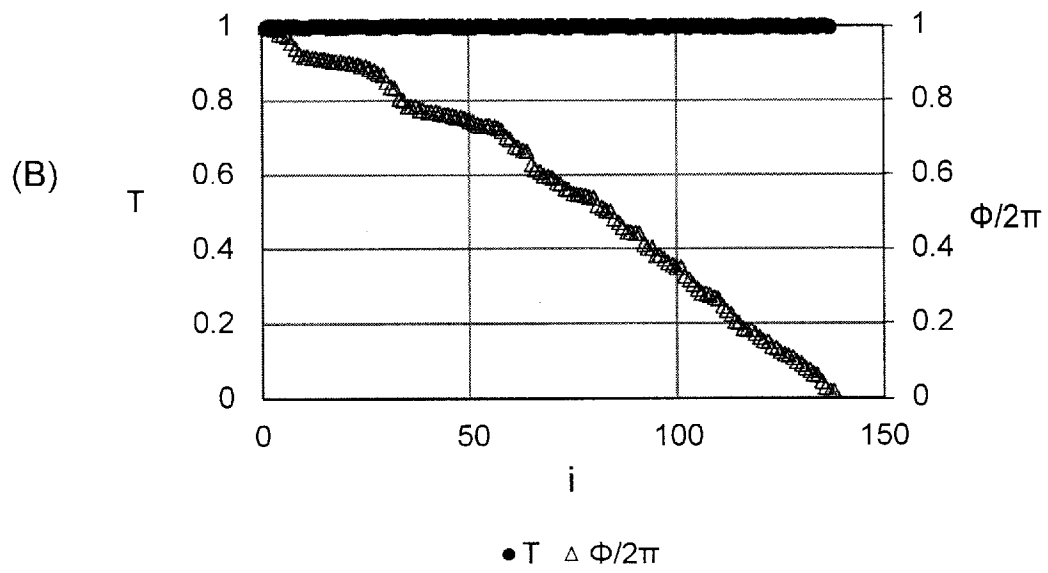
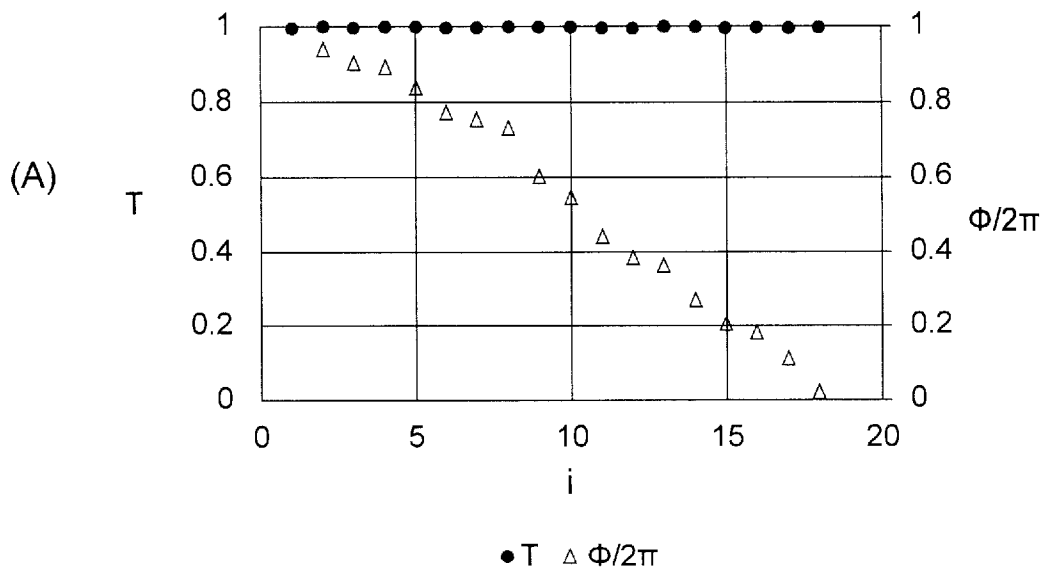
[図12]



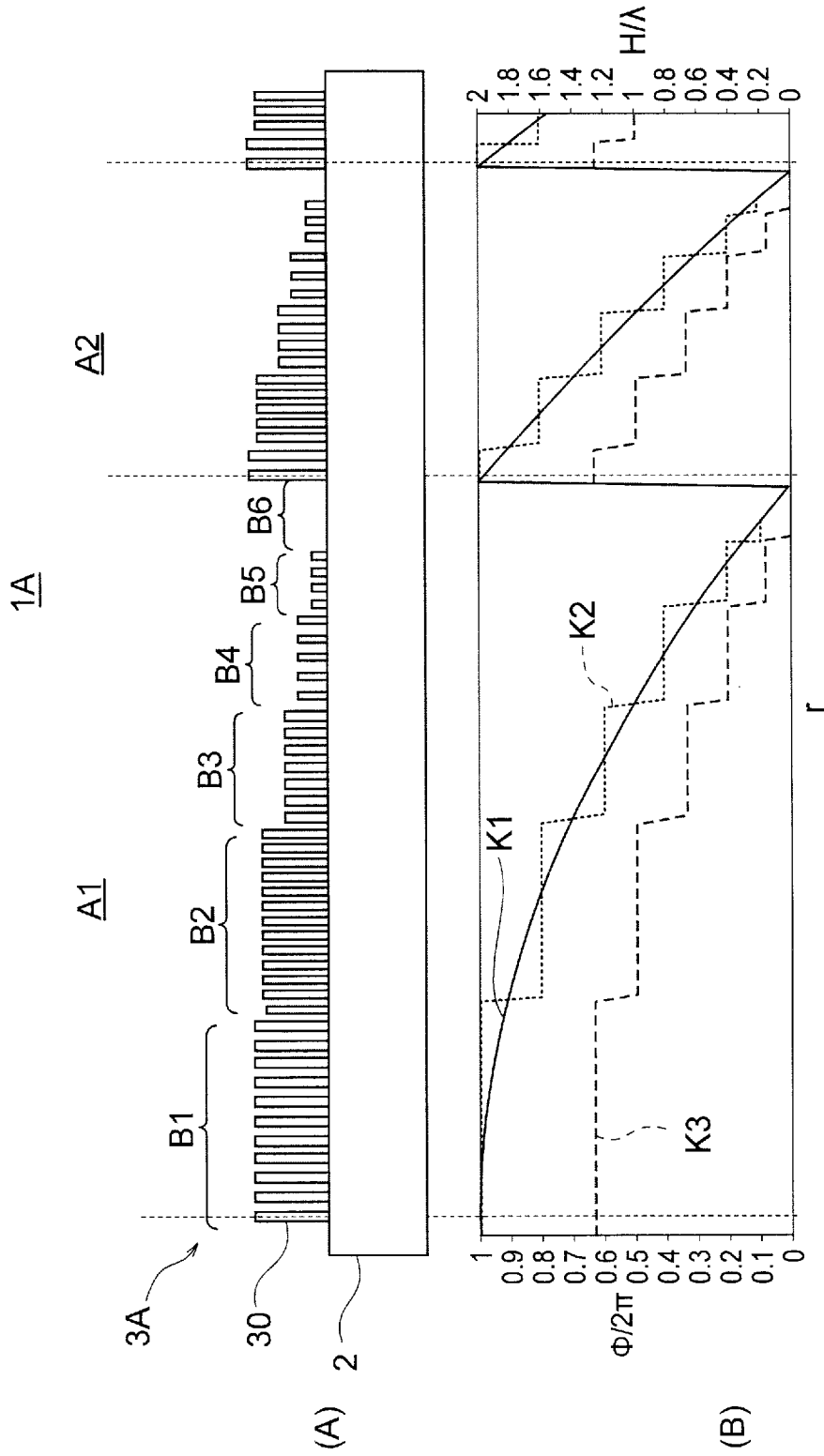
[図13]



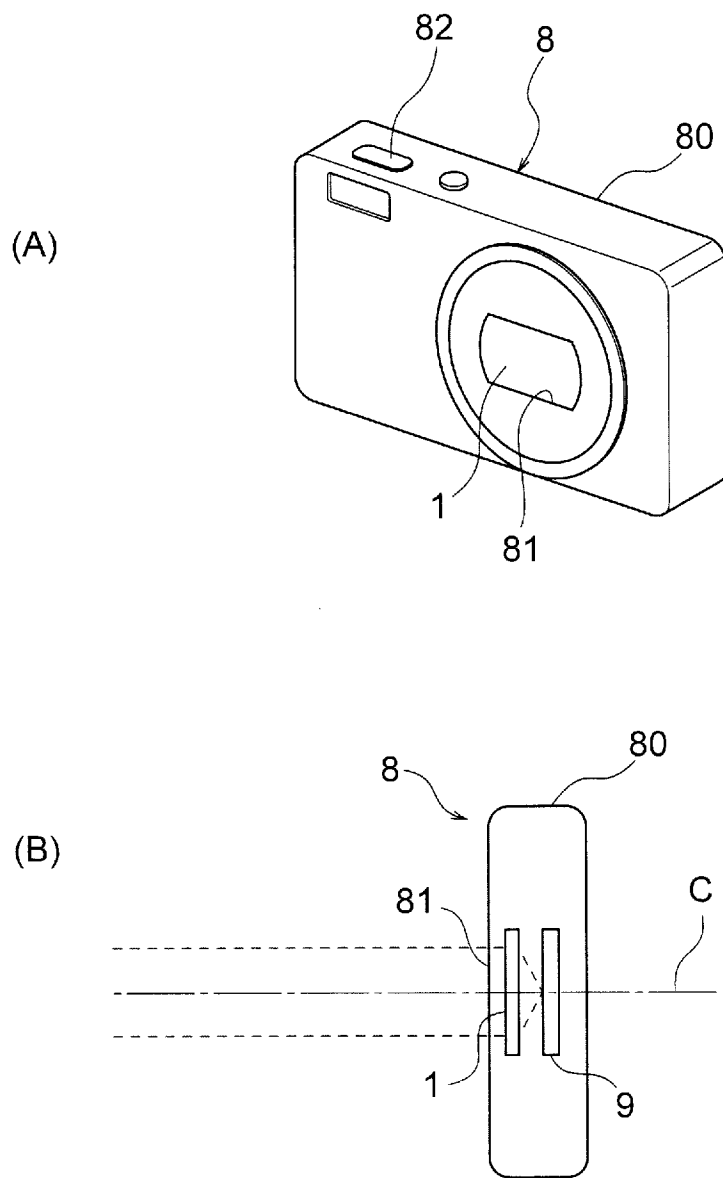
[図14]



[図15]



[図16]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/045754

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>G02B 3/08</i> (2006.01)i; <i>G02B 5/18</i> (2006.01)i FI: G02B3/08; G02B5/18 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) 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.
X	JP 2021-193467 A (MAGIC LEAP, INC.) 23 December 2021 (2021-12-23) paragraphs [0081]-[0083], [0114], [0155], [0159]-[0188], [0269], [0315], [0368], [0438]-[0443], [0621], fig. 42, 60, 68	1-9, 12-15
Y	paragraphs [0081]-[0083], [0114], [0155], [0159]-[0188], [0269], [0315], [0368], [0438]-[0443], [0621], fig. 42, 60, 68	1-15
X	US 2018/0292644 A1 (CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 11 October 2018 (2018-10-11) claims 1-12, paragraphs [0003], [0014], [0050]-[0063], fig. 1-14	1-7, 9, 12, 14
Y	claims 1-12, paragraphs [0003], [0014], [0050]-[0063], fig. 1-14	1-15
X	CN 106125176 A (SHANGHAI INSTITUTE OF TECHNICAL PHYSICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 16 November 2016 (2016-11-16) paragraphs [0001]-[0024], fig. 1-4	1, 4, 5, 14, 15
Y	paragraphs [0001]-[0024], fig. 1-4	1-15
Y	JP 2021-99399 A (HAMAMATSU PHOTONICS KK) 01 July 2021 (2021-07-01) paragraphs [0001], [0002]-[0017], [0029]-[0038], fig. 1-15	1-15
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 15 February 2023		Date of mailing of the international search report 28 February 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
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2022/045754

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP	2021-193467	A	23 December 2021	US 2018/0052320 A1 paragraphs [0291]-[0293], [0324], [0365], [0369]-[0397], [0479], [0525], [0578], [0648]- [0653], [0831], fig. 42, 60, 68	
				WO 2018/039273 A1	
				EP 3500889 A1	
				TW 201819989 A	
				AU 2017316667 A	
				CA 3034389 A	
				KR 10-2019-0039801 A	
				CN 109863446 A	

US	2018/0292644	A1	11 October 2018	(Family: none)	

CN	106125176	A	16 November 2016	(Family: none)	

JP	2021-99399	A	01 July 2021	US 2021/0194144 A1 paragraphs [0001], [0002]- [0016], [0047]-[0057], fig. 1-15	
				CN 113009608 A	

JP	2019-516128	A	13 June 2019	US 2019/0154877 A1 claim 1, paragraphs [0141]- [0153], [0175]-[0190], fig. 1, 8, 9, 10	
				WO 2017/176921 A1	
				EP 3440484 A1	
				CA 3020261 A	
				KR 10-2018-0124106 A	
				SG 11201808772W A	
				CN 109196387 A	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G02B 3/08(2006.01)i; G02B 5/18(2006.01)i FI: G02B3/08; G02B5/18		
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）） 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
X	JP 2021-193467 A (マジック リープ, インコーポレイテッド MAGIC LEAP, INC.) 23.12.2021 (2021-12-23) 段落[0081]-[0083], [0114], [0155], [0159]-[0188], [0269], [0315], [0368], [0438]-[0443], [0621], 図42, 図60, 図68	1-9, 12-15
Y	段落[0081]-[0083], [0114], [0155], [0159]-[0188], [0269], [0315], [0368], [0438]-[0443], [0621], 図42, 図60, 図68	1-15
X	US 2018/0292644 A1 (CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 11.10.2018 (2018-10-11) 請求項1-12, 段落[0003], [0014], [0050]-[0063], 図1-図14	1-7, 9, 12, 14
Y	請求項1-12, 段落[0003], [0014], [0050]-[0063], 図1-図14	1-15
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> 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、一般的な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	15.02.2023	国際調査報告の発送日 28.02.2023
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） 池田 博一 20 3491 電話番号 03-3581-1101 内線 3271	

C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリ*	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
X	CN 106125176 A (SHANGHAI INST TECHNICAL PHYSICS CAS) 16.11.2016 (2016 - 11 - 16) 段落[0001]-[0024], 図1-図4	1, 4, 5, 14, 15
Y	段落[0001]-[0024], 図1-図4	1-15
Y	JP 2021-99399 A (浜松ホトニクス株式会社) 01.07.2021 (2021 - 07 - 01) 段落[0001], [0002]-[0017], [0029]-[0038], 図1-図15	1-15
Y	JP 2019-516128 A (プレジデント・アンド・フェロウズ・オブ・ハーバード・カレッジ) 13.06.2019 (2019 - 06 - 13) 請求項1, 段落[0049]-[0060], [0080]-[0094], 図1, 図8, 図9, 図10	1-15

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/JP2022/045754

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2021-193467 A	23.12.2021	US 2018/0052320 A1 段落[0291]-[0293], [0324], [0365], [0369]-[0397], [0479], [0525], [0578], [0648]-[0653], [0831], 図42, 図60, 図68	
		WO 2018/039273 A1	
		EP 3500889 A1	
		TW 201819989 A	
		AU 2017316667 A	
		CA 3034389 A	
		KR 10-2019-0039801 A	
		CN 109863446 A	
US 2018/0292644 A1	11.10.2018	(ファミリーなし)	
CN 106125176 A	16.11.2016	(ファミリーなし)	
JP 2021-99399 A	01.07.2021	US 2021/0194144 A1 段落[0001], [0002]-[0016], [0047]-[0057], 図1-図15	
		CN 113009608 A	
JP 2019-516128 A	13.06.2019	US 2019/0154877 A1 請求項1, 段落[0141]-[0153], [0175]-[0190], 図1, 図8, 図9, 図10	
		WO 2017/176921 A1	
		EP 3440484 A1	
		CA 3020261 A	
		KR 10-2018-0124106 A	
		SG 11201808772W A	
		CN 109196387 A	