

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5676928号
(P5676928)

(45) 発行日 平成27年2月25日(2015.2.25)

(24) 登録日 平成27年1月9日(2015.1.9)

(51) Int.Cl.

F 1

G02B 5/18 (2006.01)
G02B 13/02 (2006.01)G02B 5/18
G02B 13/02

請求項の数 9 (全 36 頁)

(21) 出願番号 特願2010-133595 (P2010-133595)
 (22) 出願日 平成22年6月11日 (2010.6.11)
 (65) 公開番号 特開2011-257663 (P2011-257663A)
 (43) 公開日 平成23年12月22日 (2011.12.22)
 審査請求日 平成25年5月27日 (2013.5.27)

(73) 特許権者 000001007
 キヤノン株式会社
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
 (74) 代理人 100110412
 弁理士 藤元 亮輔
 (74) 代理人 100104628
 弁理士 水本 敦也
 (72) 発明者 牛込 礼生奈
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ャノン株式会社内

審査官 貝沼 慶司

(56) 参考文献 特開2004-126394 (JP, A)

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】回折光学素子、光学系、及び、光学機器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第1の格子面及び第1の格子壁面を備える第1の回折格子と、第2の格子面及び第2の格子壁面を備える第2の回折格子と、を有する回折光学素子であって、

前記第1の格子壁面と接するように配置された反射部材を有し、

前記第2の回折格子は、前記第2の格子面が前記第1の格子面に接し、かつ前記第2の格子壁面が前記反射部材に接するように配置されており、

画面外光束が前記回折光学素子の面法線に対して入射角度 i で入射したとき、前記第1又は第2の格子壁面から射出される最大強度の光束の射出角度 o は、以下の式を満たし、

10

 $o = i$

前記反射部材の最大幅を W (μm)、前記第1及び第2の回折格子の格子ピッチを P (μm)、とするとき、以下の式を満たすことを特徴とする回折光学素子。

$$0 < W / P < 0.04$$

$$0.02 < \frac{W}{P}$$

【請求項 2】

前記反射部材は、均一な厚さの膜形状を有することを特徴とする請求項1に記載の回折光学素子。

【請求項 3】

前記第1の格子面と前記面法線とのなす角度を α 、前記第1の格子面と前記第2の格子

20

壁面とのなす角度を、前記第1の格子面と前記第1の格子壁面とのなす角度を、とするとき、以下の式を満たすことを特徴とする請求項1に記載の回折光学素子。

<

【請求項4】

更に以下の式を満たすことを特徴とする請求項3に記載の回折光学素子。

$$- > 0 . 5 ^\circ$$

【請求項5】

前記反射部材の厚さは、入射側から射出側に向けて増加していることを特徴とする請求項3又は4に記載の回折光学素子。

【請求項6】

前記反射部材を構成する材料の可視波長帯域における消衰定数をkとするとき、以下の式を満たすことを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項に記載の回折光学素子。

$$0 . 8 < k$$

【請求項7】

前記反射部材は、金属又は金属を含有した材料から成ることを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項に記載の回折光学素子。

【請求項8】

請求項1乃至7のいずれか1項に記載の回折光学素子と、該回折光学素子の後側に配置された絞りと、を有することを特徴とする光学系。

【請求項9】

請求項8に記載の光学系を有することを特徴とする光学機器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光学系のレンズに用いられる回折光学素子に関する。

【背景技術】

【0002】

光学系のレンズに用いられる回折光学素子において、2つの回折格子を密着配置し、各回折格子を構成する材料と格子高さを適切に設定することで広い波長帯域で高い回折効率を得ることが知られている。この格子面と格子壁面を備えた回折光学素子に光束が入射すると、その入射光束が格子壁面で反射又は屈折することにより、不要光(フレア)が発生する。特許文献1には、格子壁面を吸収体又は金属材料で被覆した被覆層を設け、球面波状の波の発生を抑えて設計回折次数の回折効率を向上させた回折光学素子が開示されている。特許文献2には、格子壁面に金属材料を形成し、設計入射光束のうちで格子壁面に入射する光束を回折角方向に反射させることで、設計回折次数の回折効率を向上させた回折光学素子が開示されている。特許文献3は、厳密結合波解析(R C W A : R e g o r o u s C o u p l e d W a v e A n a l y s i s)を使用した回折効率の計算について開示している。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2003-315526号公報

【特許文献2】特開2005-115176号公報

【特許文献3】特開2009-217139号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

光学系のレンズに用いられる回折光学素子において、特に問題となる不要光は設計入射光束とは異なる斜入射角度(画面外光入射角度)で入射する光束により高屈折率媒質と低屈折率媒質の界面で発生する全反射に起因する不要光である。しかし特許文献1及び特許

10

20

30

40

50

文献2には、設計入射光束とは異なる斜入射角度（画面外光入射角度）で入射する光束により不要光が発生する問題については言及されていない。このため、特許文献1及び特許文献2に開示された回折光学素子の構成では、不要光を低減させることはできず、像性能の劣化を効果的に抑制することができない。

【0005】

そこで本発明は、像性能の劣化を抑制する回折光学素子を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の一側面としての回折光学素子は、第1の格子面及び第1の格子壁面を備える第1の回折格子と、第2の格子面及び第2の格子壁面を備える第2の回折格子と、を有する回折光学素子であって、前記第1の格子壁面と接するように配置された反射部材を有し、前記第2の回折格子は、前記第2の格子面が前記第1の格子面に接し、かつ前記第2の格子壁面が前記反射部材に接するように配置されており、画面外光束が前記回折光学素子の面法線に対して入射角度 i で入射したとき、前記第1又は第2の格子壁面から射出される最大強度の光束の射出角度 θ は、以下の式を満たし、

$$\theta < \frac{i}{W}$$

前記反射部材の最大幅を W (μm)、前記第1及び第2の回折格子の格子ピッチを P (μm)、とするとき、以下の式を満たすことを特徴とする。

$$0 < W / P < 0.04$$

$$0.02 < \frac{W}{P} < 0.04$$

【0007】

本発明の他の目的及び特徴は、以下の実施例において説明される。

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、像性能の劣化を抑制する回折光学素子を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】 本実施例における回折光学素子の要部概略図である。

【図2】 (a) 実施例1の回折光学素子を備えた光学系の要部断面図、(b) 前記光学系における不要光の光線の概念図である。

【図3】 本実施例における回折光学素子の拡大断面図である。

【図4】 実施例1の回折光学素子の素子構造と画面外入射光束の関係を示す模式図である。

【図5】 実施例1における回折格子部の拡大断面図である。

【図6】 実施例1における回折光学素子の設計入射光束に対する回折効率のグラフである。

【図7】 実施例1における回折光学素子の設計入射光束に対する不要光の伝播の様子を示す模式図である。

【図8】 実施例1における回折光学素子の画面外入射 + 10度の光束に対する回折効率のグラフである。

【図9】 実施例1における回折光学素子の画面外入射 - 10度の光束に対する回折効率のグラフである。

【図10】 実施例2における回折光学素子の入射光束に対する回折効率のグラフである。

【図11】 実施例3における回折格子部の拡大断面図である。

【図12】 実施例3における回折光学素子の入射光束に対する回折効率のグラフである。

【図13】 実施例4における回折格子部の拡大断面図である。

【図14】 実施例4における回折光学素子の入射光束に対する回折効率のグラフである。

【図15】 本実施例における回折光学素子の要部概略図である。

【図16】 実施例5における撮影光学系の概略断面図である。

【図17】 比較例における回折光学素子の設計入射光束に対する回折効率のグラフである。

10

20

30

40

50

。

【図18】比較例における回折光学素子の設計入射光束に対する不要光の伝播の様子を示す模式図である。

【図19】比較例における回折光学素子の画面外入射 + 10度の光束に対する回折効率のグラフである。

【図20】比較例における回折光学素子の画面外入射 + 10度の光束に対する不要光の伝播の様子を示す模式図である。

【図21】比較例における回折光学素子の画面外入射 - 10度の光束に対する回折効率のグラフである。

【図22】比較例における回折光学素子の画面外入射 - 10度の光束に対する不要光の伝播の様子を示す模式図である。 10

【図23】比較例における回折光学素子の構造と画面外入射光束との関係を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、本発明の実施例について、図面を参照しながら詳細に説明する。各図において、同一の部材については同一の参照番号を付し、重複する説明は省略する。

【実施例1】

【0011】

まず、本発明の実施例1における回折光学素子について説明する。本実施例の回折光学素子は、光学系のレンズに適して用いられる。図1は、回折光学素子の概略図（正面図及び側面図）である。回折光学素子1は、平板又はレンズより構成される基板2、3に挟まれた回折格子部10を備えて構成される。本実施例では、回折格子部10が設けられる基板2、3の面は、曲面となっている。回折格子部10は、光軸Oを中心とした同心円状の回折格子形状であり、レンズ作用を有する。 20

【0012】

図3は、図1のA-A'面を切断して拡大した回折光学素子1の拡大断面図である。格子形状を分かりやすくするために、図3は格子深さ方向にデフォルメされた図となっている。また、格子数も実際よりは少なく描かれている。以降に説明する断面図についても同様である。図3に示されるように、回折光学素子1の回折格子部10は、第1の回折格子11、第2の回折格子12、及び、反射部材20を備えて構成される。第1の回折格子11は、格子面11a（第1の格子面）と格子壁面11b（第1の格子壁面）とを備え、第1の屈折率を有する。第2の回折格子12は、格子面12a（第2の格子面）と格子壁面12b（第2の格子壁面）とを備える。第2の回折格子12は、第1の屈折率とは異なる第2の屈折率を有する。第1の回折格子11の格子面11aは、第2の回折格子12の格子面12aと接している（密着している）。反射部材20は、格子壁面11b、12bとの間に配置され、膜形状構造を有する。反射部材20の材料や形状を適切に設定することにより、斜入射（画面外入射）光束によって発生する不要光を制御し、結像面に到達する不要光を減少させることができるとなる。格子壁面11bは反射部材20の一方の面に接し、格子壁面12bは反射部材20の他方の面に接している。 30

【0013】

図1及び図3に示されるように、第1の回折格子11及び第2の回折格子12は、それぞれ格子面11a、12aと格子壁面11b、12bから構成される同心円状のブレーズ構造の回折格子である。そして、光軸Oから円の外周に近づくに従って格子ピッチPを徐々に変化させることにより、レンズ作用（光の収斂作用や発散作用）を有するように構成されている。また、格子面11a、12a及び格子壁面11b、12bは、反射部材20を介して互いに隙間なく接しており、第1の回折格子11及び第2の回折格子12は、全体で1つの回折格子部10として作用する。また、回折格子部10をブレーズ構造にすることで、回折光学素子1に入射した光（入射光）は、回折格子部10で回折せずに透過する0次回折方向に対し、特定の回折次数（本実施例では+1次）方向に集中して回折する 40

。

【0014】

また、本実施例の回折光学素子1の使用波長領域は可視域である。このため、可視領域全体で設計次数の回折光の回折効率が高くなるように、第1の回折格子11及び第2の回折格子12を構成する材料及び格子高さdが選択される。すなわち、複数の回折格子（第1の回折格子11、第2の回折格子12）を通過する光の最大光路長差（回折部の山と谷の光学光路長差の最大値）が使用波長域内で、その波長の整数倍付近となるように、各回折格子の材料及び格子高さdが決定される。このように回折格子の材料及び形状を適切に設定することにより、使用波長全域で高い回折効率が得られる。なお、回折格子の格子高さdは、格子周期方向に垂直な方向（面法線方向）の格子先端と格子溝の高さで定義される。また、格子壁面が面法線方向からシフトしているときや格子先端が変形しているとき等の場合には、格子面の延長線と面法線との交点との距離で定義される。10

【0015】

続いて、本実施例における回折光学素子1の構成および不要光について説明する。図4は、回折光学素子1を構成する回折格子部10の拡大断面図である。格子形状を分かりやすくするために、図4は格子深さ方向にデフォルメされ、また、格子数も実際よりは少なく描かれている。以降の断面図についても同様である。図5は、回折格子部10をさらに拡大した断面図である。

【0016】

第1の回折格子11を形成する材料としては、フッ素アクリル系紫外線硬化樹脂にITO微粒子を混合させた樹脂（nd = 1.504、d = 16.3、gF = 0.390、n550 = 1.511）が用いられる。第2の回折格子12を形成する材料としては、アクリル製紫外線硬化樹脂にZrO2微粒子を混合させた樹脂（nd = 1.567、d = 47.0、gF = 0.569、n550 = 1.570）が用いられる。格子高さdは9.29 μm、設計次数は+1次である。なお、各回折格子11、12のそれぞれのndはd線に対する屈折率、dはd線に対するアッベ数、gFはg線とF線に対する部分分散比、n550は波長550 nmに対する屈折率である。また、格子壁面1b、1b'に沿って、略膜形状の反射部材20が設けられている。反射部材20は、格子壁面に沿って実質的に均一な厚さの薄膜形状を有し、斜入射（画面外入射）光束によって発生する不要光を制御し、結像面に到達する不要光を減少させる。反射部材20を構成する材料は例えばA1で、反射部材20の幅wは1.0 μmである。2030

【0017】

図6は、回折光学素子1の設計入射角度である入射角度0度（図5のa）、格子ピッチ100 μm、波長550 nmにおいて、厳密結合波解析（RCWA：R e g o r o u s C o u p l e d W a v e A n a l y s i s）を行った結果である。図6（a）は、設計次数である+1次回折光付近での回折効率である。横軸は回折次数、縦軸は回折効率である。図6（b）は、図6（a）の縦軸の回折効率の低い部分を拡大し、横軸を回折次数から回折角にして高回折角度範囲について示した結果である。回折角は、図5の下向きを正の方向としている。図6（a）に示されるように、設計次数である+1次回折光の回折効率は97.46%（回折角+0.20度）である。残りの光は不要光となり、図6（b）に示されるように、略0次光を中心にピークを有する不要光となって伝播する。この不要光は、図7に示されるように、入射光束の格子壁面付近に入射する成分のうち、格子壁面に対して、高屈折率材料側（第2の回折格子12側）に入射する光束a'は、格子壁面において高屈折率材料側に回り込む。また、低屈折率材料側（第1の回折格子11側）に入射する光束a''は、光束a'を反転させたように格子壁面において低屈折率材料側に回り込む。これは、格子壁面の反射部材20により、格子壁面の低屈折率材料側から高屈折率材料側への電磁場の伝播が遮断されたためと考えられる。また、反射部材20により、本来、第1の回折格子11及び第2の回折格子12によって+1次光に回折される光束の一部も遮光され、位相の不整合が生じる。この結果、比較的低次（およそ±35次、回折角±10度）の次数の回折効率が増加し、設計次数である+1次回折光の回折効率が下4050

がる。ここで想定される格子ピッチ P は、一つの基準として $100 \mu\text{m}$ としている。図 1 に示されるように、光軸に近い輪帯ほど格子ピッチは大きくなり、格子壁面および反射部材 20 による悪影響が小さくなる。このため、設計次数の回折効率は高く、不要光の回折効率は低くなる。

【0018】

次に、実際の光学系に回折光学素子 1 を適用した場合において、画面外光の入射に伴つて発生する不要光について説明する。図 2 (a) は、本実施例の回折光学素子を備えた望遠タイプの撮影光学系（光学系）の概略構成図である。この撮影光学系には、回折光学素子 1 に加えて絞り 40 と結像面 41 が設けられ、焦点距離 $f = 392.00 \text{ mm}$ 、F 値 $F_{n_0} = 4.12$ 、半画角 3.16° であり、第 2 面に回折面が設けられている。図 2 (b) 10 は、図 2 (a) の光学系における不要光の模式図である。

【0019】

図 2 (b) 及び図 4 において、光軸 O に対して入射角 i で入射した画面外光束 B, B' は、回折光学素子 1 の基板 2 を通過後、それぞれ光軸 O から図中の上方向に数えて m 番目、図の下方向に数えて m 番目の回折格子である m 格子、 m' 格子に入射する。画面外光束 B, B' の m 格子、 m' 格子に対しての入射角度は、主光線方向に対して角度 i, i' である。ここで、格子壁面 1b、1b' の高さ方向は主光線方向と等しいものとする。

【0020】

次に、設計入射角度より下向きの斜入射角度（画面外光入射角度）で回折光学素子に入射する光束（図 5 の b、図 4 の B）を想定する。図 8 は、入射角度 + 10 度、格子ピッチ $100 \mu\text{m}$ 、波長 550 nm における RCWA 計算結果である。入射角は、図 5 の下向きを正の方向としている。図 8 (a) は、設計次数である + 1 次回折光付近での回折効率である。横軸は回折次数、縦軸は回折効率である。図 8 (b) は、図 8 (a) の縦軸の回折効率の低い部分を拡大し、横軸を回折次数から回折角にして高回折角度範囲について示した結果である。回折角は、図 5 の下向きを正の方向としている。図 8 (a) に示されるように、設計次数である + 1 次回折光の回折効率が集中しているが、回折効率は 96.00% (回折次数 + 1、回折角 + 9.94 度) で設計入射角度である 0 度から傾いているため低下している。この画面外光入射角度の + 1 次回折光は、像面に到達することはないためその影響は小さい。残りの不要光は、図 8 (b) に示されるように、特定の角度方向にピークをもつ不要光となって伝播する。この不要光は略 - 10 度方向にピークを有し、この伝播方向は、格子壁面に入射する画面外入射角度 + 10 度の光束の成分が全反射して伝播する射出方向 - 10 度方向と略等しい。30

【0021】

図 2、図 4 に示されるように、回折光学素子を光学系に適用した場合、設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度 + 0.20 度に略一致する画面外光による不要光の回折光が、少なくとも像面に到達する。図 7 の回折角 + 0.20 度付近の回折効率は、RCWA 計算結果から、回折次数 - 46 (回折角 + 0.34 度) の回折効率が 0.0038% 、回折次数 - 47 (回折角 + 0.14 度) の回折効率が 0.0039% となる。このように、回折効率は極めて小さい。

【0022】

次に、設計入射角度より上向きの斜入射角度（画面外光入射角度）で回折光学素子に入射する光束（図 5 の c、図 4 の B'）を想定する。図 9 は、入射角度 - 10 度、格子ピッチ $100 \mu\text{m}$ 、波長 550 nm における RCWA 計算結果である。入射角は、図 5 の下向きを正の方向とする（図 4 の m' 格子では上向きが正の方向となる）。図 9 (a) は、設計次数である + 1 次回折光付近での回折効率である。横軸は回折次数、縦軸は回折効率である。図 9 (b) は、図 9 (a) の縦軸の回折効率の低い部分を拡大し、横軸を回折次数から回折角にして高回折角度範囲について示した結果である。図 9 (a) に示されるように、設計次数である + 1 次回折光の回折効率が集中しているが、回折効率は 95.80% (回折次数 + 1、回折角 - 9.42 度) で設計入射角度である 0 度から傾いているため低下する。この画面外光入射角度の + 1 次回折光は、像面に到達することはないためその影 50

響は小さい。残りの不要光は、図9(b)に示されるように、特定の角度方向にピークを有する不要光となって伝播する。この不要光は、略+10度方向にピークを有する。この略+10度方向のピークの伝播方向は、格子壁面に入射する画面外入射角度-10度光束が反射部材20で反射した反射光の射出方向+10度に略等しい。

【0023】

図2、図4に示されるように、回折光学素子を光学系に適用した場合、設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度+0.20度に略一致する画面外光による不要光の回折光が、少なくとも像面に到達する。図9の回折角+0.20度付近の回折効率はRCWA計算結果から、回折次数+49(回折角+0.26度)の回折効率が0.0043%、回折次数+48(回折角+0.06度)の回折効率が0.0041%である。このように、回折効率は極めて小さい。10

【0024】

本実施例の回折光学素子1を適用した光学系に画面外光束が入射した場合、反射部材20を設けることにより、図2、図4に示されるように、m格子及びm'格子での不要光は極めて小さくなる。この結果、結像面に到達する不要光が小さくなるため、像性能の低下を抑制することができる。同時に、設計次数の回折効率の低減を像性能に影響しない程度に抑制することができる。

なお、ここでは格子ピッチ $100\mu m$ としている。さらに格子ピッチの広い輪帯においては壁面の寄与が小さくなるため、設計次数の回折効率は高く、不要光の回折効率は低くなる。また、図示してはいないが、この不要光の伝播方向については格子ピッチに依存せず、伝播方向は同じであった。このため、ひとつの基準として格子ピッチ $100\mu m$ の回折効率を示している。20

また、ここでは画面外光束B, B'の入射角は画面外+10度(光軸方向に対しては入射角は+13.16度)を想定する。この入射角度より小さい角度ではレンズ表面や結像面反射によるゴーストやレンズ内部、表面微小凹凸による散乱が多いため回折光学素子の不要光は比較的目立たない。また、この入射角度より大きい角度では、前側レンズ面の反射やレンズ鏡筒による遮光により回折光学素子の不要光の影響度は比較的小さい。このため、画面外入射光束は+10度付近が回折光学素子の不要光に対して最も影響が大きく、ここでは画面外光束の入射角は略+10度を想定する。

【0025】

本実施例では、図2(b)に示されるように、不要光のピークが絞り40で遮光されている(図2(b)中のBm-及びB'm-)が、これは一例であって、これに限定されるものではない。不要光のピークをレンズ鏡筒に導いて遮光し、又は、後側のレンズにより像面に到達しない角度に反射させること等によっても不要光の抑制は可能である。また、本実施例では、代表的な格子についての例を示している。勿論、全回折格子に渡って、結像面に到達する回折次数及び回折効率をRCWA計算することが好ましく、より厳密な評価が可能である。また、この手法を光学系に対して適用することにより、結像面に到達する不要光の厳密な計算を行うことができ、不要光を抑制した回折光学素子を設計することが可能となる。

【0026】

また、本実施例において、各回折格子の材料や格子高さは限定されない。本実施例では、回折格子の材料として微粒子を分散させた樹脂材料を用いているが、これに限定されるものではない。例えば、樹脂材料等の有機材料、ガラス材料、光学結晶材料、又は、セラミックス材料等を用いてもよい。また、微粒子を分散させる微粒子材料としては、酸化物、金属、セラミックス、複合物、混合物のいずれかの無機微粒子材料を用いることができるが、これらの微粒子材料に限定されるものではない。微粒子材料の平均粒子径は、回折光学素子への入射光の波長(使用波長又は設計波長)の1/4以下であることが好ましい。これよりも粒子径が大きいと、微粒子材料を樹脂材料に混合する際にレイリー散乱が大きくなる可能性がある。また、微粒子材料を混合する樹脂材料としては、紫外線硬化樹脂であって、アクリル系、フッ素系、ビニル系、エポキシ系のいずれかの有機樹脂が適して4050

用いられるが、これらの樹脂材料に限定されるものではない。本実施例では、設計次数を + 1 次にしているが、これに限定されるものではない。+ 1 次以外の設計次数であっても同様の効果が得られる。

【 0 0 2 7 】

本実施例の反射部材 2 0 を構成する材料は A 1 等の金属材料（又は、金属を含有した材料）であるが、画面外入射光束を反射させる作用を有するものであれば、金属材料に限定されるものではない。また、反射部材 2 0 の幅又は形状を回折光学素子の輪帯毎に変えるように制御することも可能である。この結果、結像面に到達する不要光を効果的に抑制することができる。

10

【 0 0 2 8 】

反射部材 2 0 の製造方法は、特に限定されるものではない。例えば、まず第 2 の回折格子 1 2 を製造し、その後、反射部材 2 0 を選択的に形成する。具体的には、反射部材 2 0 を構成する材料を真空蒸着手法等で薄膜形状に成膜した後、リソグラフィー手法やナノインプリント法等でパターニングしてからエッチング手法等で選択的に形成する手法を用いることができる。また、マスクパターンを用いて選択的に蒸着手法等で形成する方法や、インクジェットプロセスを用いて格子壁面部のみに直接形成する方法等を用いることができる。その後、第 1 の回折格子 1 1 を形成することで回折光学素子を製造することができる。

【 0 0 2 9 】

20

本実施例では、回折光学素子 1 の第 1 の回折格子 1 1 と第 2 の回折格子 1 2 の屈折率の関係が $n_{11} < n_{22}$ であるとして説明しているが、この関係が $n_{11} > n_{22}$ であっても構わない。第 1 の回折格子 1 1 と第 2 の回折格子 1 2 の屈折率の関係が $n_{11} > n_{22}$ の場合には、屈折率の関係が逆であるため、回折格子の格子形状の向きも逆に構成される。

【 実施例 2 】

【 0 0 3 0 】

次に、本発明の実施例 2 における回折光学素子について説明する。本実施例は、反射部材の幅（厚さ）が実施例 1 とは異なるが、他の構成は実施例 1 と同様であるため、実施例 1 と同様の構成に関する説明は省略する。本実施例の反射部材 2 0 の幅 w（厚さ）は 0 . 1 μm である。

30

【 0 0 3 1 】

図 1 0 (a) は、設計入射角度である入射角度 0 度、格子ピッチ 1 0 0 μm 、波長 5 5 0 nm における回折光学素子に対して R C W A 計算を行った結果である。設計次数である + 1 次回折光の回折効率は 9 8 . 3 8 % である。残りの光は不要光となり、実施例 1 と同様略 0 次光を中心ピーケーを有する不要光となって伝播する。本実施例の反射部材 2 0 は、実施例 1 より幅（厚さ）が薄くなっている。このため、本実施例では、実施例 1 と比較して + 1 次回折光の回折効率の低減量が小さくなる。

【 0 0 3 2 】

次に、設計入射角度より下向きの斜入射角度（画面外光入射角度）の回折光学素子に入射する光束を想定して図 1 0 (b) に、入射角度 + 1 0 度、格子ピッチ 1 0 0 μm 、波長 5 5 0 nm における R C W A 計算結果を示す。設計次数である + 1 次回折光の回折効率が集中しており、回折効率は 9 6 . 9 5 % で、設計入射角度である 0 度から傾いているため低下している。画面外光入射角度の + 1 次回折光は像面に到達することはないため、その影響は小さい。残りの不要光は、実施例 1 と同様、略 - 1 0 度方向にピーケーを有する。この伝播方向は格子壁面に入射する画面外入射角度 + 1 0 度の光束の成分が全反射して伝播する射出方向 - 1 0 度方向と略等しい。

40

【 0 0 3 3 】

図 2、図 4 に示されるように、回折光学素子を光学系に適用した場合の画面外光が入射した際の不要光については、設計入射角での設計回折次数が伝播する回折角度 + 0 . 2 0

50

度に略一致する画面外光による不要光の回折光が、少なくとも像面に到達する。これにより、図10(a)の回折角+0.20度付近の回折効率は、RCWA計算結果より、回折次数-46の回折効率が0.0078%、回折次数-47の回折効率が0.0078%となる。このように、回折効率は大幅に減少する。

【0034】

次に、設計入射角度より上向きの斜入射角度(画面外光入射角度)で回折光学素子に入射する光束を想定して図10(c)に入射角度-10度、格子ピッチ100μm、波長550nmにおけるRCWA計算結果を示す。設計次数である+1次回折光の回折効率が集中し、回折効率は96.74%で設計入射角度である0度から傾いているため低下する。この画面外光入射角度の+1次回折光は像面に到達することはないため、その影響は小さい。残りの不要光は、実施例1と同様図10(c)に示されるように、略+10度方向にピークを有する。この略+10度方向のピークの伝播方向は、格子壁面に入射する画面外入射角度-10度の光束が反射部材で反射した反射光の射出方向+10度に略等しい。10

【0035】

図2、図4に示されるように、回折光学素子を光学系に適用した場合の画面外光が入射した際の不要光については、設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度+0.20度に略一致する画面外光による不要光の回折光が、少なくとも像面に到達する。図9の回折角+0.20度付近の回折効率は、RCWA計算結果より、回折次数+49の回折効率が0.0074%、回折次数+48の回折効率が0.0075%である。このように、回折効率の値は極めて小さくなる。20

【0036】

本実施例の回折光学素子を適用した光学系に画面外光束が入射した場合、反射部材を設けることにより、結像面に到達する不要光を減少させることができるために、像性能の低下を抑制することが可能となる。また、設計次数の回折効率の低減を像性能に影響ない程度に抑制することが可能となる。反射部材の膜厚依存性は小さく反射部材の構造敏感度が小さいため、反射部材の材料や製造プロセスの選択が広がる。

【実施例3】

【0037】

次に、本発明の実施例3における回折光学素子について説明する。本実施例では、反射部材の構造が実施例1、2とは異なる。本実施例の反射部材は、格子壁面に沿って略均一な厚さの薄膜形状を有しない。図11は、本実施例における回折格子部の拡大断面図である。各回折格子の材料、格子高さd及び設計次数は、実施例1及び2と同様である。本実施例の回折光学素子には反射部材24が設けられている。反射部材24は、格子壁面に沿って均一な膜形状ではなく、回折格子の頂点からその幅(厚さ)が厚くなるように形成されている。すなわち反射部材24は、図11中の入射側(左側)から射出側(右側)に向かって幅(厚さ)が厚くなるように形成されている。回折光学素子の格子面(第1の格子面、第2の格子面)と面法線とのなす角度を θ_1 、格子面と第2の格子壁面とのなす角度を θ_2 、格子面と第1の格子壁面とのなす角度を θ_3 とするとき、 $\theta_1 = \theta_2 < \theta_3$ が成立する。反射部材24はA1で構成され、反射部材24の角度($\theta_1 = \theta_2$)は2degで膜形状の最大幅Wは0.32μmである。なお、角度 θ_3 は面法線方向に対する反射部材24の角度である。3040

【0038】

図12(a)は、回折光学素子への入射角度が設計入射角度である0度、格子ピッチ100μm、波長550nmの場合にRCWA計算を行った結果である。設計次数である+1次回折光の回折効率は98.10%(回折角+0.20度)である。残りの光は不要光となり、実施例1と同様に図12(a)に示されるように、略0次光を中心ピークを有する不要光となって伝播する。本実施例において、回折光学素子全域を考慮した場合、この格子ピッチ100μmの回折効率0.66%の低減量は、設計入射角度(撮影光入射角度)において日中の太陽等の高輝度光源を直接撮影することは稀であるため、ほとんど影響せず、問題とはならない。50

【0039】

次に、設計入射角度より下向きの斜入射角度（画面外光入射角度）で回折光学素子に入射する光束を想定して、図12（b）に入射角度+10度、格子ピッチ100μm、波長550nmにおけるRCWA計算結果を示す。設計次数である+1次回折光の回折効率が集中しており、回折効率は96.98%（回折次数+1、回折角+9.94度）であり、設計入射角度である0度から傾いているため低下する。画面外光入射角度の+1次回折光は像面に到達しないため、その影響は小さい。残りの不要光は、実施例1と同様に図12（a）に示されるように、略-10度方向にピークを有する。その伝播方向は、格子壁面に入射する画面外入射角度+10度の光束の成分が全反射して伝播する射出方向-10度方向と略等しい。図2、図3に示されるように、回折光学素子を光学系に適用した場合、設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度+0.20度に略一致する画面外光による不要光の回折光が少なくとも像面に到達する。これより、図12（b）の回折角+0.20度付近の回折効率は、RCWA計算結果から、回折次数-46の回折効率が0.0072%、回折次数-47の回折効率が0.0071%である。反射部材を設けることにより、回折効率は大幅に減少する。

10

【0040】

次に、設計入射角度より上向きの斜入射角度（画面外光入射角度）で回折光学素子に入射する光束を想定して図12（c）に入射角度-10度、格子ピッチ100μm、波長550nmにおけるRCWA計算結果を示す。設計次数である+1次回折光の回折効率が集中している。回折効率は96.12%（回折次数+1、回折角-9.42度）で、設計入射角度である0度から傾いているため低下している。この画面外光入射角度の+1次回折光は像面に到達することはないため、その影響は小さい。残りの不要光は、図12（c）に示されるように、略+15度方向にピークを有する。この略+15度方向のピークの伝播方向は、格子壁面に入射する画面外入射角度-10度光束が反射部材で反射した反射光の射出方向+14度に略等しい。本実施例では、略均一膜形状の反射部材を備えた実施例1及び2の場合の射出方向よりも高角度にシフトして射出している。これは、反射部材が回折格子の頂点から、その厚さが厚くなる構造であって、入射角度-10度の入射光が反射する角度がシフトしたためである。このように反射部材の構造を変化させることによって不要光のピークをシフトさせることができる。

20

【0041】

30

図2、図4に示されるように、光学系に回折光学素子を適用した場合、設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度+0.20度に略一致する画面外光による不要光の回折光が少なくとも像面に到達する。図12（c）の回折角+0.20度付近の回折効率は、RCWA計算結果から、回折次数+49の回折効率が0.0045%、回折次数+48の回折効率が0.0046%である。この回折効率は実施例1及び2よりも低い。これは、反射部材に角度を設けることで不要光のピークを高射出角度にシフトさせているためである。本実施例では、少なくとも結像面に到達する回折角度+0.20度に略一致する回折効率が減少している。

【0042】

40

以上のように、反射部材を設けた回折光学素子が適用された光学系に画面外光束が入射した場合、結像面に到達する不要光を小さくし、像性能の低下を抑制することができる。また、設計次数の回折効率の低減を像性能に影響ない程度に抑制することができる。また、本実施例の反射部材は、製造上の製造公差、量産性やコスト等を考慮して、その製造方法を適宜選択することができる。また、反射部材の角度を制御することにより、不要光のピークをシフトさせることができる。このため、光学系に応じて、不要光を制御して結像面に到達することを抑制することができる。

【0043】

50

本実施例では、反射部材24は第2の回折格子12の格子壁面に対して傾いて設けられているが、これに限定されるものではない。反射部材24は、逆に、第1の回折格子11の格子壁面に対して傾いて設けられてもよい。また反射部材24は、入射側が薄くて射出

側が厚い構造となっているが、逆に、入射側が厚くて射出側が薄い構造でも構わない。また、格子壁面の位置によって反射部材 24 の厚さが任意に変化した構造であってもよい。

【実施例 4】

【0044】

次に、本発明の実施例 4 における回折光学素子について説明する。本実施例は、実施例 3 の変形例であり、反射部材が格子壁面に沿って不均一な厚さを有する反射部材についての実施例である。図 13 は、実施例 4 の回折格子の拡大断面図である。各回折格子の材料、格子高さ d 、及び、設計次数は、実施例 1 乃至 3 と同様である。回折光学素子の格子面（第 1 の格子面、第 2 の格子面）と面法線とのなす角度を α 、格子面と第 2 の格子壁面とのなす角度を β 、格子面と第 1 の格子壁面とのなす角度を γ とするとき、 $\alpha < \beta < \gamma$ が成立する。¹⁰ 反射部材 24 の材料は A1 であり、反射部材 24 の角度 α_1 、 α_2 はいずれも $2d$ である。反射部材 24 の最大幅 W は $0.65 \mu\text{m}$ である。角度 $\alpha_1 (= \beta - \gamma)$ は、図 13 の断面図において、面法線方向と、反射部材 24 と第 1 の回折格子 11 との接触面方向（格子壁面）とのなす角度である。角度 $\alpha_2 (= \gamma - \beta)$ は、面法線方向と、反射部材 24 と第 2 の回折格子 12 との接触面方向（格子壁面）とのなす角度である。

【0045】

図 14 (a) は、設計入射角度である入射角度 0 度、格子ピッチ $100 \mu\text{m}$ 、波長 550 nm における R C W A 計算結果である。設計次数である +1 次回折光の回折効率は 97.79% （回折角 $+0.20$ 度）である。残りの光は不要光となり、実施例 1 と同様図 14 (a) に示されるように、略 0 次光を中心にピークを有する不要光となって伝播する。²⁰ また反射部材 24 によって、本来、第 1 の回折格子 11 及び第 2 の回折格子 12 によって +1 次光に回折される光束の一部も遮光され、位相の不整合が生じる。この結果、比較的低次（およそ ± 3.5 次、回折角 ± 10 度）の次数の回折効率が増加し、設計次数である +1 次回折光の回折効率が下がる。

【0046】

次に、設計入射角度より下向きの斜入射角度（画面外光入射角度）で回折光学素子に入射する光束を想定して図 14 (b) に入射角度 $+10$ 度、格子ピッチ $100 \mu\text{m}$ 、波長 550 nm における R C W A 計算結果を示す。設計次数である +1 次回折光の回折効率が集中している。回折効率は 96.33% で、設計入射角度である 0 度から傾いているため低下している。この画面外光入射角度の +1 次回折光は像面に到達することはないため、その影響は小さい。残りの不要光は、略 $+1.5$ 度方向にピークを有する。この略 $+1.5$ 度方向のピークの伝播方向は、格子壁面に入射する画面外入射角度 -10 度光束が反射部材 24 で反射した反射光の射出方向 $+14$ 度に略等しい。本実施例では、実施例 1 乃至 3 よりも高角度にシフトして射出している。これは、反射部材 24 が回折格子の頂点から、その厚さが厚くなる構造であって、入射角度 -10 度の入射光が反射する角度がシフトしたためである。このように反射部材の構造を変化させることによって不要光のピークをシフトさせることができる。³⁰

【0047】

図 2、図 3 に示されるように、光学系に回折光学素子を適用した場合、設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度 $+0.20$ 度に略一致する画面外光による不要光の回折光が少なくとも像面に到達する。これより、図 14 (b) の回折角 $+0.20$ 度付近の回折効率は、R C W A 計算結果から、回折次数 -46 の回折効率が 0.0037% 、回折次数 -47 の回折効率が 0.0035% である。本実施例の回折効率は、実施例 1 乃至 3 の場合よりも低い。これは、反射部材に角度を設けて不要光のピークを高射出角度にシフトさせることにより、少なくとも結像面に到達する回折角度 $+0.20$ 度に略一致する回折効率が減少しているためである。⁴⁰

【0048】

次に、設計入射角度より上向きの斜入射角度（画面外光入射角度）で回折光学素子に入射する光束を想定して図 14 (c) に入射角度 -10 度、格子ピッチ $100 \mu\text{m}$ 、波長 550 nm における R C W A 計算結果を示す。設計次数である +1 次回折光の回折効率が集
⁵⁰

中している。回折効率は 9.6 . 17 % で、設計入射角度である 0 度から傾いているため低下している。この画面外光入射角度の + 1 次回折光は像面に到達することはないため、その影響は小さい。残りの不要光は、図 14 (c) に示されるように、略 + 15 度方向にピークを有する。この略 + 15 度方向のピークの伝播方向は、格子壁面に入射する画面外入射角度 - 10 度の光束が反射部材で反射した反射光の射出方向 + 14 度に略等しい。本実施例では、略均一膜形状の反射部材を備えた実施例 1 と 2 の場合の射出方向よりも高角度にシフトして射出している。これは、反射部材が回折格子の頂点から、その厚さが厚くなる構造であって入射角度 - 10 度の入射光が反射する角度がシフトしたためである。このように反射部材の構造を変化させることによって不要光のピークをシフトさせることができる。

10

【 0049 】

図 2、図 3 に示されるように、光学系に回折光学素子を適用した場合、設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度 + 0 . 20 度に略一致する画面外光による不要光の回折光が少なくとも像面に到達する。図 14 (c) の回折角 + 0 . 20 度付近の回折効率は、RCWA 計算結果から、回折次数 + 49 の回折効率が 0 . 0036 % 、回折次数 + 48 の回折効率が 0 . 0037 % である。この回折効率は、実施例 1 及び 2 の場合よりも低い。反射部材に角度を設けて不要光のピークを高射出角度にシフトさせることにより、少なくとも結像面に到達する回折角度 + 0 . 20 度に略一致する回折効率が減少している。

【 0050 】

以上のように、本実施例の回折光学素子によれば、結像面に到達する不要光を小さくし、像性能の低下を抑制することができる。また、設計次数の回折効率の低減を像性能に影響ない程度に抑制することができる。また、本実施例における反射部材の角度 1、2 によって不要光のピークをシフトさせることができ、角度 1、2 をそれぞれ独立に制御することにより不要光を制御することが可能である。実施例 1 乃至 4 では、少なくとも結像面に到達する不要光にのみ具体的な数値を示している。ただし、回折光学素子の後の光学系、絞りの位置によって不要光が像面に到達する回折次数、回折角度（図 2 (b) の Bm ~ Bm+ の関係）の範囲が異なり、像性能の低下を招く場合がある。このため、光学系に応じて、角度 1、2 によって不要光を制御して結像面に到達することを抑制することができる。この反射部材の角度は、特に光学系の焦点距離、光学系における回折光学素子の位置等によって変わり、適宜適切に設計すればよい。光学系の焦点距離が長く、回折光学素子の位置がより物体側に配置するほど角度を小さくすることができる。

20

【 0051 】

次に、上述の実施例 1 乃至 4 について、表 1 を用いて説明する。表 1 は、実施例 1 乃至 4 の回折光学素子に用いられる第 1 の回折格子の材料の d 線での屈折率 n_{d1} 、アッベ数 v_{d1} 、部分分散比 g_F および波長 550 nm の屈折率 n_{1550} を示す。また、第 2 の回折格子の材料の d 線での屈折率 n_{d2} 、アッベ数 v_{d2} 、波長 550 nm の屈折率 n_{2550} を示す。また、回折格子の格子高さ d 、反射部材を構成する材料、形状、実施例 3、4 については反射部材の幅、実施例 1、2 については反射部材の角度、最大幅をそれぞれ示す。

30

【 0052 】

40

【表1】

	実施例1	実施例2	実施例3	実施例4
nd1	1.504	1.504	1.504	1.504
vd1	16.3	16.3	16.3	16.3
θ_{gF1}	0.390	0.390	0.390	0.390
nd1_550	1.511	1.511	1.511	1.511
nd2	1.567	1.567	1.567	1.567
vd2	47.0	47.0	47.0	47.0
nd2_550	1.570	1.570	1.570	1.570
格子厚 d (μm)	9.29	9.29	9.29	9.29
反射部材の材料	A1	A1	A1	A1
反射部材の構造	膜形状	膜形状	格子頂点から厚層化	格子頂点から厚層化
反射部材の幅 w (μm)	1.0	0.1	0.32 (最大幅)	0.65 (最大幅)
反射部材の角度 θ (deg)	-	-	2.0	2.0 ($\theta 1$) 2.0 ($\theta 2$)

10

20

【0053】

実施例1乃至4のように、光学系の軸外光束の入射角度以上の角度で入射する画面外入射光束が、レンズ（回折光学素子）の面法線に対して回折光学素子に入射角度 i で入射したときを想定する。このとき、格子壁面（第1の格子壁面11b、第2の格子壁面12b）から射出する光束の最大強度の射出角度 θ （レンズの面法線に対する角度）は、好みしくは、以下の式（1）を満たす。

$$\theta < i \dots (1)$$

式（1）を満たすことにより、不要光を制御して結像面に到達する不要光を抑制することができる。

30

【0054】

また、回折光学素子の格子面（第1の格子面11a、第2の格子面12a）と面法線とのなす角度、格子面と第2の格子壁面12bとのなす角度、及び、第1の格子面11aと第1の格子壁面11bとのなす角度は、以下の式（2）を満たすことが好ましい。

【0055】

$$< \dots (2)$$

角度 α 、 β が式（2）を満たすように設定することで、不要光を制御することができる。この反射部材の角度は、特に光学系の焦点距離、光学系における回折光学素子の位置等に応じて適宜設計される。また、角度 α 、 β は、反射部材の機能を十分に発揮するため、以下の式（3）を満たすことがより好ましい。

40

【0056】

$$\alpha > 0.5^\circ \dots (3)$$

また、反射部材が格子壁面の50%以上の領域に形成されることによって不要光を効果的に反射させることができる。

【0057】

反射部材の幅が大きくなると、位相の不整合領域が拡大し、設計次数の回折効率が低下する。このため、反射部材の最大幅W (μm)、及び、回折格子（第1の回折格子11、第2の回折格子12）のそれぞれの格子ピッチP (μm)は、以下の式（4）を満たすことが好ましい。

$$0 < W / P < 0.04 \dots (4)$$

50

実施例3、4のように反射部材の厚さが入射側から射出側に向けて増加している場合（反射部材が不均一な膜厚である場合）、反射部材の幅の最大距離が式（4）を満足することが好ましい。なお、格子ピッチPを基準として $100\mu m$ とした回折格子を示したが、設計次数の回折効率に関しては反射部材の幅wと格子ピッチPの関係は線形関係を有する。反射部材の幅wと格子ピッチPの回折格子の設計次数の回折効率と反射部材の幅 $w \times 2$ と格子ピッチ $P \times 2$ の回折格子の設計次数の回折効率はほぼ同じである。例えば、実施例1に示した格子ピッチ $100\mu m$ 、反射部材の幅の和 $1.0\mu m$ の回折格子と格子ピッチ $200\mu m$ 、反射部材の幅の和 $2.0\mu m$ の回折格子の設計次数の回折効率はほぼ同じである。このため、格子ピッチPと反射部材の最大幅Wの関係式は式（4）を満たすことが好ましい。像性能に影響ない回折光学素子を得るためにには、以下の式（5）を満たすことがより好ましい。10

【0058】

$$0 < W / P < 0.02 \dots (5)$$

また、反射部材の膜厚に関し、反射部材への入射角度が通常よく用いられる光学機器の反射膜より高角度であるため、通常の反射膜では膜厚が $200nm$ 以上必要である。一方、各実施例の反射部材はそれよりも薄い反射膜で十分な反射機能を発揮できるため、以下の式（6）を満足することが好ましい。

【0059】

$$0.02 < W \dots (6)$$

また、反射部材を構成する材料としては、不要光を効果的に反射させるため、可視波長帯域における消衰定数kが以下の式（7）を満足する材料から選択することが好ましい。20

【0060】

$$0.8 < k \dots (7)$$

また、実施例1乃至4では、密着2層DOEからなる回折光学素子を用いているが、これに限定されるものではなく、さらに回折格子を積層した積層DOEによる回折光学素子を用いてもよい。また、反射部材を中心領域から周辺領域で変化させて最適な回折光学素子を構成することができる。また、全ての輪帯に反射部材を設ける必要はなく、輪帯の一部に設けてもよい。この際、図15のように最小格子ピッチを含む一部に反射部材を設けることが有効である。これは、格子ピッチが小さい回折格子は不要光の回折効率が大きく、回折光学素子全体で発生する不要光の寄与が大きいいためである。また、不要光を低減させるため、設計次数を+1次以外の次数にする、格子壁面角度をシフトさせる、格子壁面形状を階段状にさせる等の不要光の制御手段と反射部材とを組み合わせて用いてもよい。30
(比較例)

以下、実施例1乃至4に対する比較例としての回折光学素子について説明する。回折格子の材料および格子高さは実施例1～4と同様で、格子壁面部に反射部材が設けられていない場合である。

【0061】

図17は、本比較例における回折光学素子の設計入射角度である入射角度0度（図17のa）、格子ピッチ $100\mu m$ 、波長 $550nm$ におけるRCWA計算結果である。図17(a)は、設計次数である+1次回折光付近での回折効率である。横軸は回折次数、縦軸は回折効率である。図17(b)は、図17(a)の縦軸の回折効率の低い部分を拡大し、横軸を回折次数から回折角にして高回折角度範囲について表示した結果である。図17(a)に示されるように、設計次数である+1次回折光に回折効率が集中しているが、回折効率は 98.76% （回折次数+1次、回折角 0.20 度）で 100% にはならない。残りの光は不要光となり、図17(b)に示されるように、特定角度方向にピークを有する不要光となって伝播している。この不要光は、図18に示されるように、入射光束のうち格子壁面付近に入射する成分 a' が格子壁面において高屈折率材料側に回り込む回折現象により生じると考えられる。しかし、この設計入射角度（撮影光入射角度）において、日中の太陽等の高輝度光源を直接撮影することは稀であるため、この不要光はほとんど影響せず、問題とはならない。4050

【0062】

次に、設計入射角度より下向きの斜入射角度（画面外光入射角度）で回折光学素子に入射する光束を想定して、入射角度 + 10 度、格子ピッチ 100 μm、波長 550 nm における R C W A 計算結果を図 19 に示す。図 19 (a) は、設計次数である + 1 次回折光付近での回折効率である。横軸は回折次数、縦軸は回折効率である。図 19 (b) は、図 19 (a) の縦軸の回折効率の低い部分を拡大し、横軸を回折次数から回折角にして高回折角度範囲について表示した結果である。図 19 (a) に示されるように、設計次数である + 1 次回折光の回折効率が集中していることが、回折効率は 97.15%（回折次数 + 1 次、回折角 + 9.94 度）で設計入射角度である 0 度から傾いているため 100% より低下している。この画面外光入射角度の + 1 次回折光は像面に到達することはないため、その影響は小さい。残りの不要光は、図 19 (b) に示されるように、特定角度方向にピークを有する不要光となって伝播している。この不要光は、略 - 10 度方向にピークを有し、この伝播方向は格子壁面に入射する画面外入射角度 + 10 度光束の成分が全反射にして伝播する射出方向 - 10 度方向と略等しい。格子壁面に対しては、高屈折率材料側から低屈折率材料側に臨界角 74.2 度以上の + 80 度で入射するため、全反射が発生している。また、この不要光は、略 - 10 度方向のピークから高角度範囲に広がっている。また不要光は、図 20 に示されるように、入射光束のうち格子壁面付近に入射する成分 b' が格子壁面において全反射して - 10 度方向に伝播し、さらに全反射射出方向中心に不要光が広がって伝播していると考えられる。この不要光は、回折角 0 度付近（図 20 の b''）まで広がっている。回折角 0 度（図 20 の b''）は、設計入射角 0 度による + 1 次回折光の回折角 0.20 度に略等しい。光学系に回折光学素子を適用した場合、設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度 + 0.20 度に略一致する画面外光による不要光の回折光が、少なくとも像面に到達する。図 19 (b) の回折角 + 0.20 度付近の回折効率について、R C W A 計算結果から、回折次数 - 46（回折角 + 0.34 度）の回折効率が 0.014%、回折次数 - 47（回折角 + 0.14 度）の回折効率が 0.014% である。10

【0063】

次に、設計入射角度より上向きの斜入射角度（画面外光入射角度）で回折光学素子に入射する光束を想定して、入射角度 - 10 度、格子ピッチ 100 μm、波長 550 nm における R C W A 計算結果を図 21 に示す。図 21 (a) は、設計次数である + 1 次回折光付近での回折効率である。横軸は回折次数、縦軸は回折効率である。図 21 (b) は、図 21 (a) の縦軸の回折効率の低い部分を拡大し、横軸を回折次数から回折角にして高回折角度範囲について表示した結果である。図 21 (a) に示されるように、設計次数である + 1 次回折光の回折効率が集中しているが、回折効率は 97.00%（回折次数 + 1 次、回折角 - 9.42 度）で設計入射角度である 0 度から傾いているため 100% より低下している。残りの不要光は、図 21 (b) に示されるように、特定角度方向にピークを有する不要光となって伝播している。この不要光は、略 - 17 度方向、略 + 10 度方向にも小さなピークを有し、この伝播方向は、格子壁面に入射する画面外入射角度 - 10 度光束の透過光の射出方向 - 18.6 度と反射光の射出方向 + 9.5 度に略等しい。また、格子壁面に対しては、低屈折率材料側から高屈折率材料側に + 80 度で入射するため、透過光の透過率は 91%、反射光の反射光は 9% であり、略 - 15 度方向のピークが大きく、略 + 10 度方向のピークが小さいことと対応している。また、この不要光はピークから高角度範囲に広がっており、図 22 に示されるように、入射光束のうち格子壁面付近に入射する成分 c' が格子壁面において透過光と反射光に別れて伝播し、さらに各ピークを中心広がって伝播していると考えられる。光学系に回折光学素子を適用した場合、設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度 + 0.20 度に略一致する画面外光による不要光の回折光が、少なくとも像面に到達する。図 21 (b) の回折角 + 0.20 度付近の回折効率について、R C W A 計算結果から、回折次数 + 49（回折角 + 0.26 度）の回折効率が 0.0022%、回折次数 + 48（回折角 + 0.06 度）の回折効率が 0.0022% である。304050

【0064】

以上のように、本比較例の回折光学素子を適用した光学系にて画面外入射角略10度の光束が入射した場合、図2(b)、図23に示すように、m格子による回折角0度付近に射出する不要光が大きく、m'格子による回折角0度付近に射出する不要光が小さい。このため、像性能の低下に対してはm格子の寄与が大きいことになる。実際に回折光学素子および光学系を構成して実写したところ、像面に不要光が到達し、像性能の低下が確認された。

【0065】

従来の手法では、格子壁面に入射する光束を幾何光学現象として扱っているが、その場合は格子壁面に入射する光はスネルの法則に従って特定の方向にのみ射出し伝播する。図2(b)、図23のように、光学系に回折光学素子を適用し、画面外入射角略10度の光束が入射した場合、m格子では全反射のみ、m'格子では91%の透過光および9%の反射光が発生する。しかし、その場合はいずれも絞り40で遮光されるため結像面41へ到達しないことになる。以上のように、従来の手法では不要光の抑制に対しては不十分であり、抑制すべき不要光が十分考慮されていなかったといえる。

10

【実施例5】**【0066】**

本実施例における実施例5について説明する。図16は、本実施例における撮影光学系の概略断面図である。図16において、101は撮影レンズ(光学系)であり、その内部に、上記各実施例の回折光学素子1、及び、回折光学素子1の後側に配置された絞り40を備える。41は結像面であり、フィルム又はCCDやCMOS等の光電変換素子が配置される。特に、回折光学素子1の回折格子部に入射する光束の入射角の分布の重心(図形の重心と同じ)が包絡面の回折格子の中心での面法線に対し、回折格子部の中心よりに分布するように構成されている。本実施例によれば、格子壁面に光束が入射した場合でも、不要光の発生が大幅に改善されているため、フレアが少なく解像力も高い高性能な撮影レンズが得られる。

20

【0067】

図16では、前玉のレンズの貼り合せ面に回折光学素子1を設けたが、これに限定されるものではなく、レンズ表面に設けてもよく、また、撮影レンズ101内に複数の回折光学素子を用いてもよい。また本実施例では、撮影レンズ101は光学機器としてのカメラに用いられる場合について説明したが、これに限定されるものではない。他の光学機器であるビデオカメラ、事務機のイメージスキャナー、デジタル複写機のリーダーレンズなど広波長域で使用される結像光学系にも適用可能である。

30

【0068】

以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されず、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。

【符号の説明】**【0069】**

1：回折光学素子

11：第1の回折格子

40

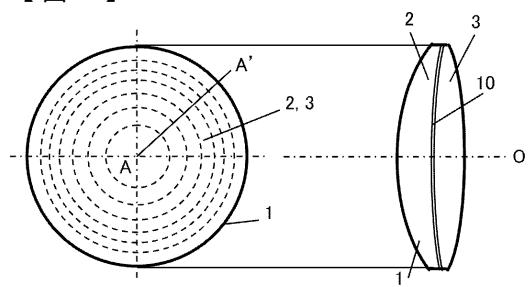
12：第2の回折格子

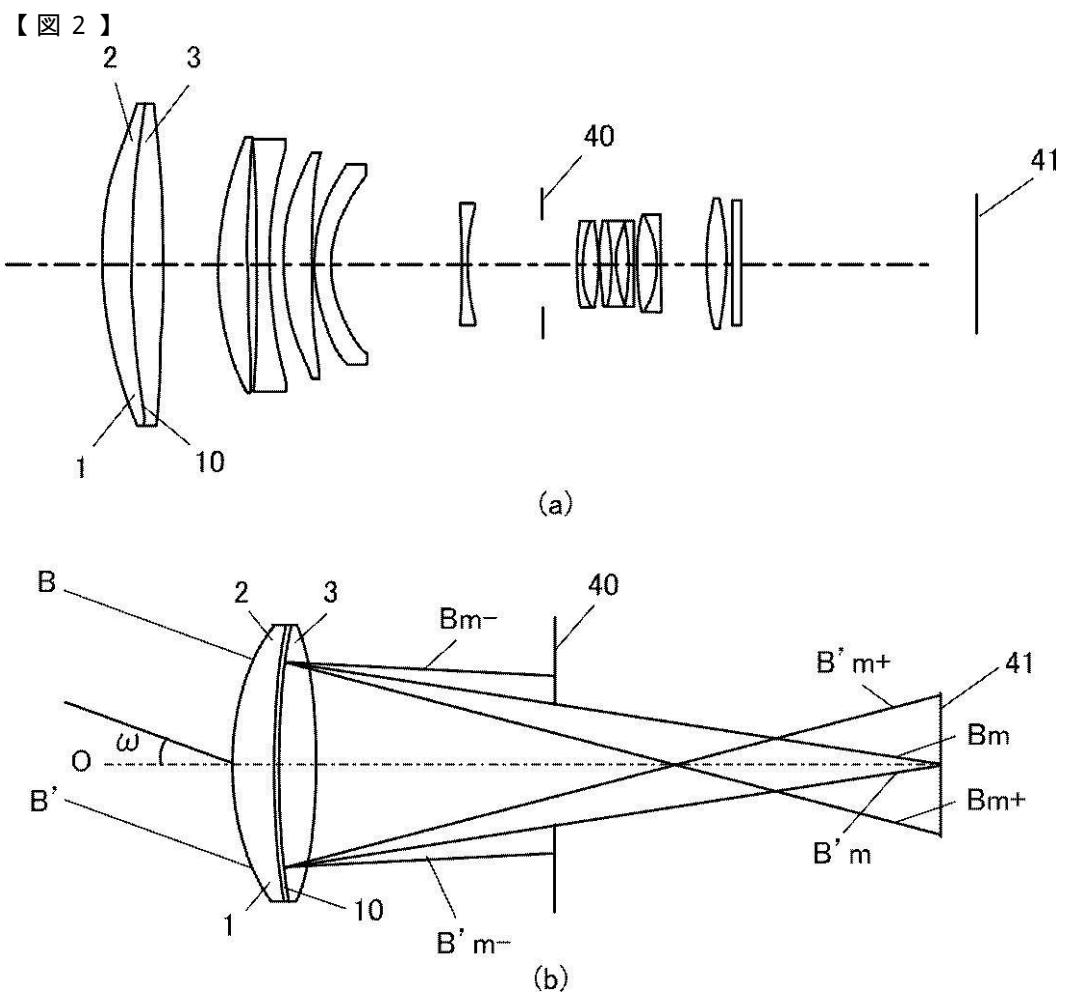
11a、12a：格子面

11b、12b：格子壁面

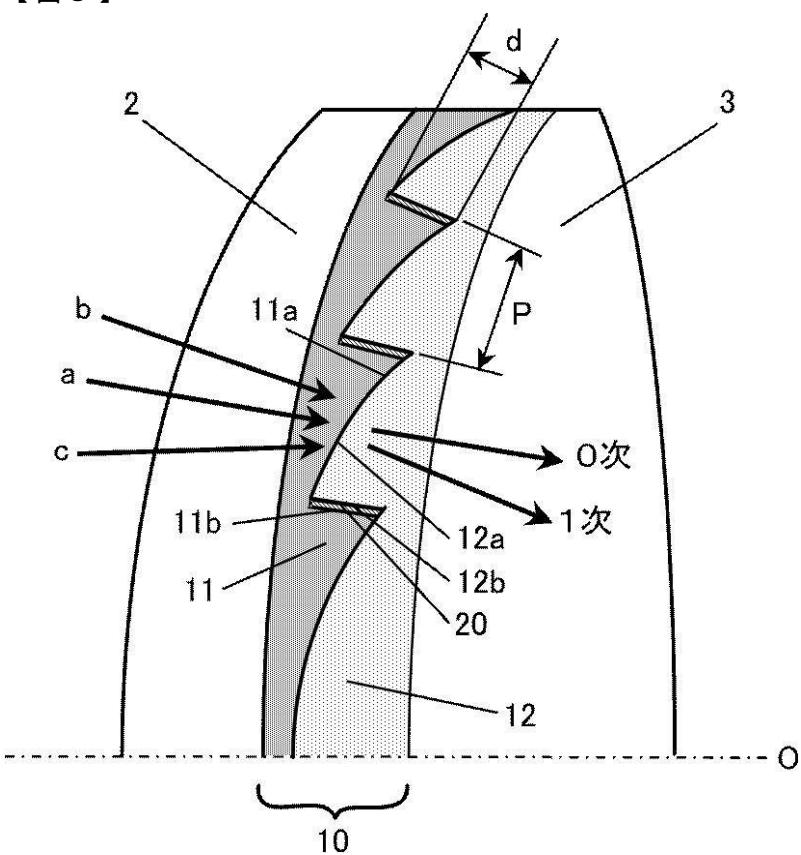
20、24：反射部材

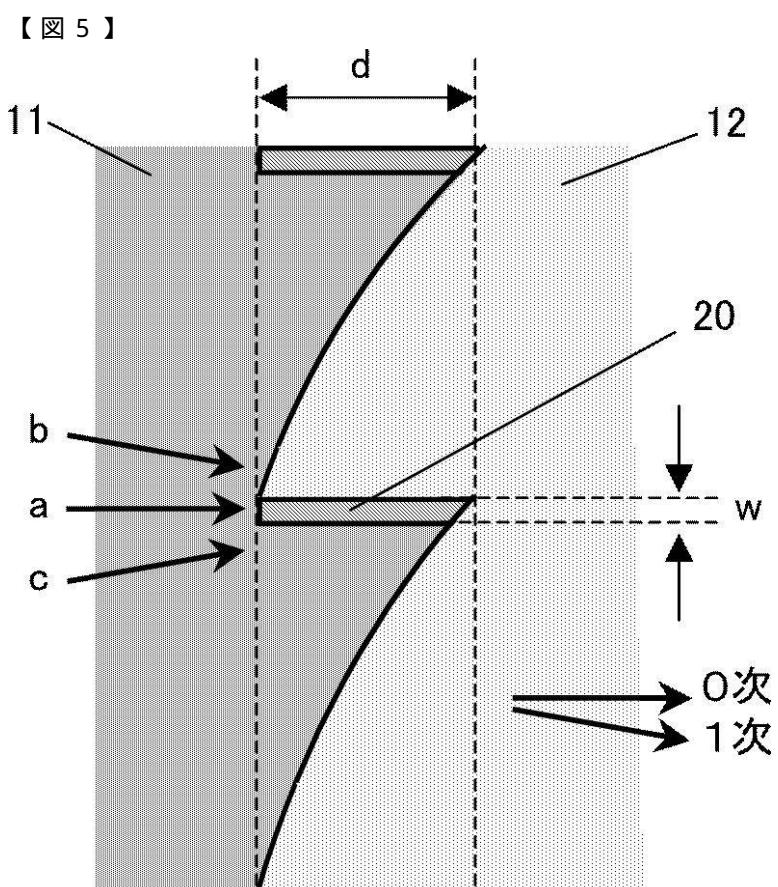
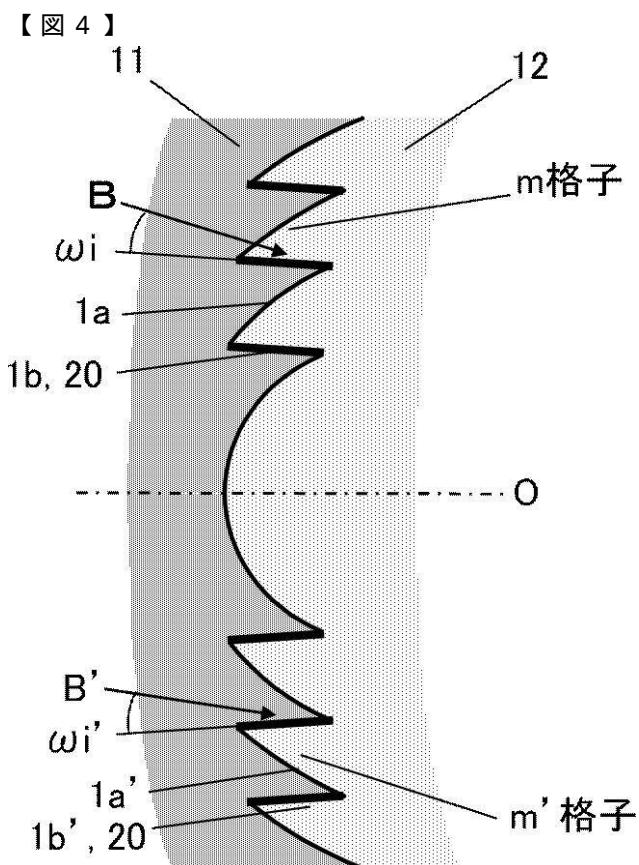
【図1】



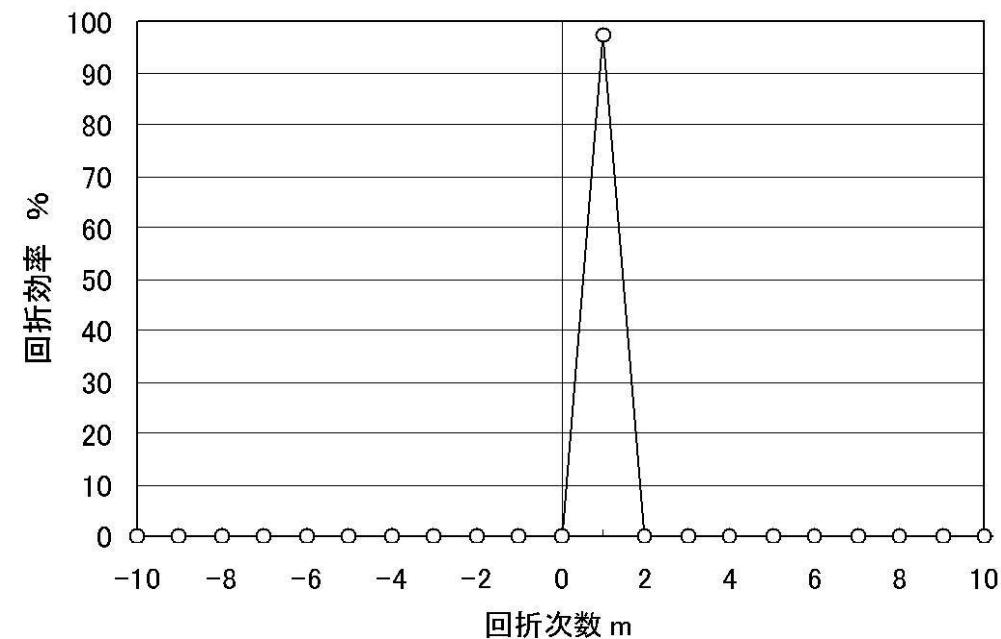


【図3】

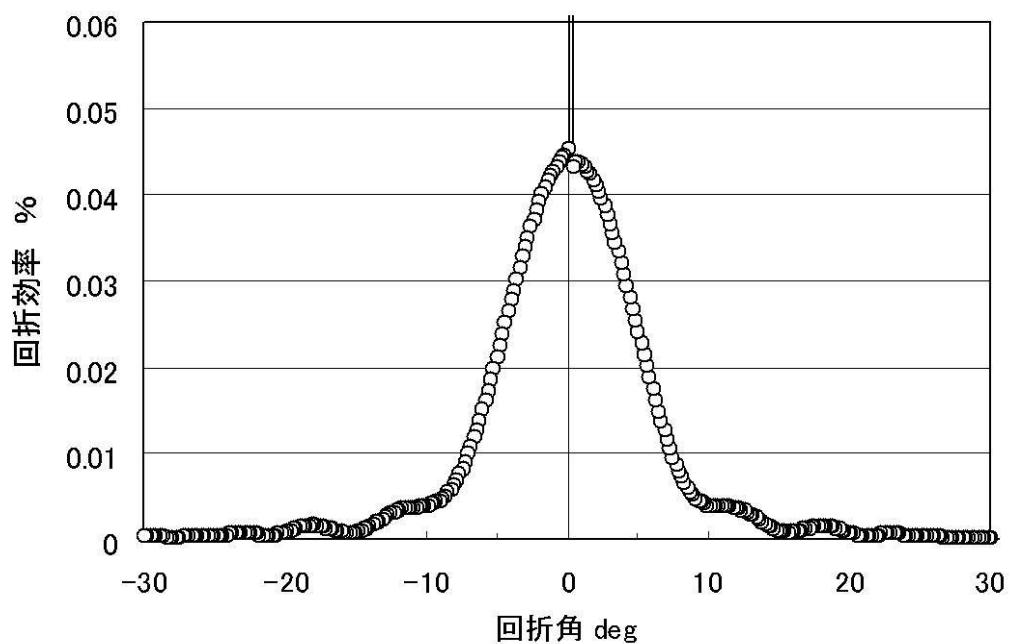




【図6】

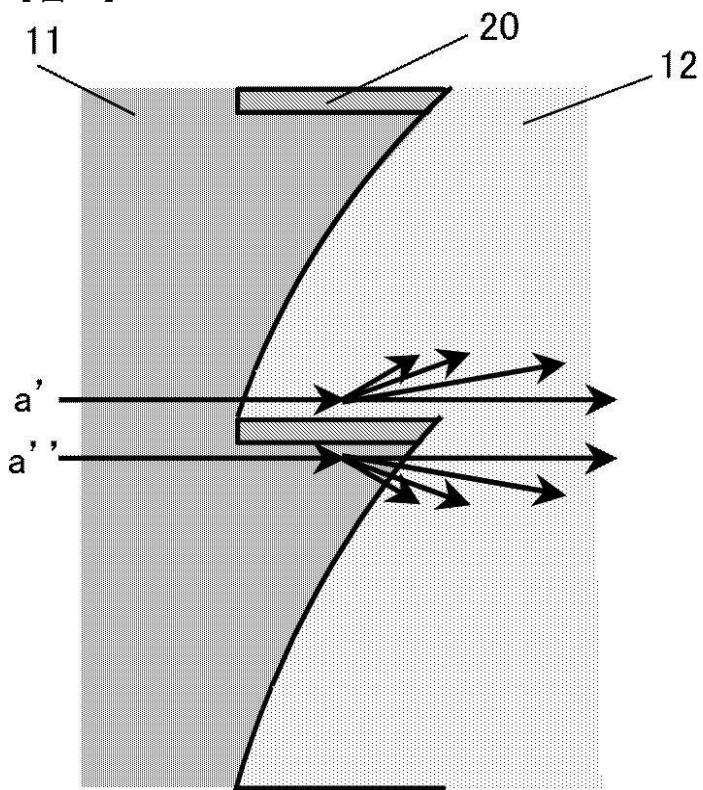


(a)

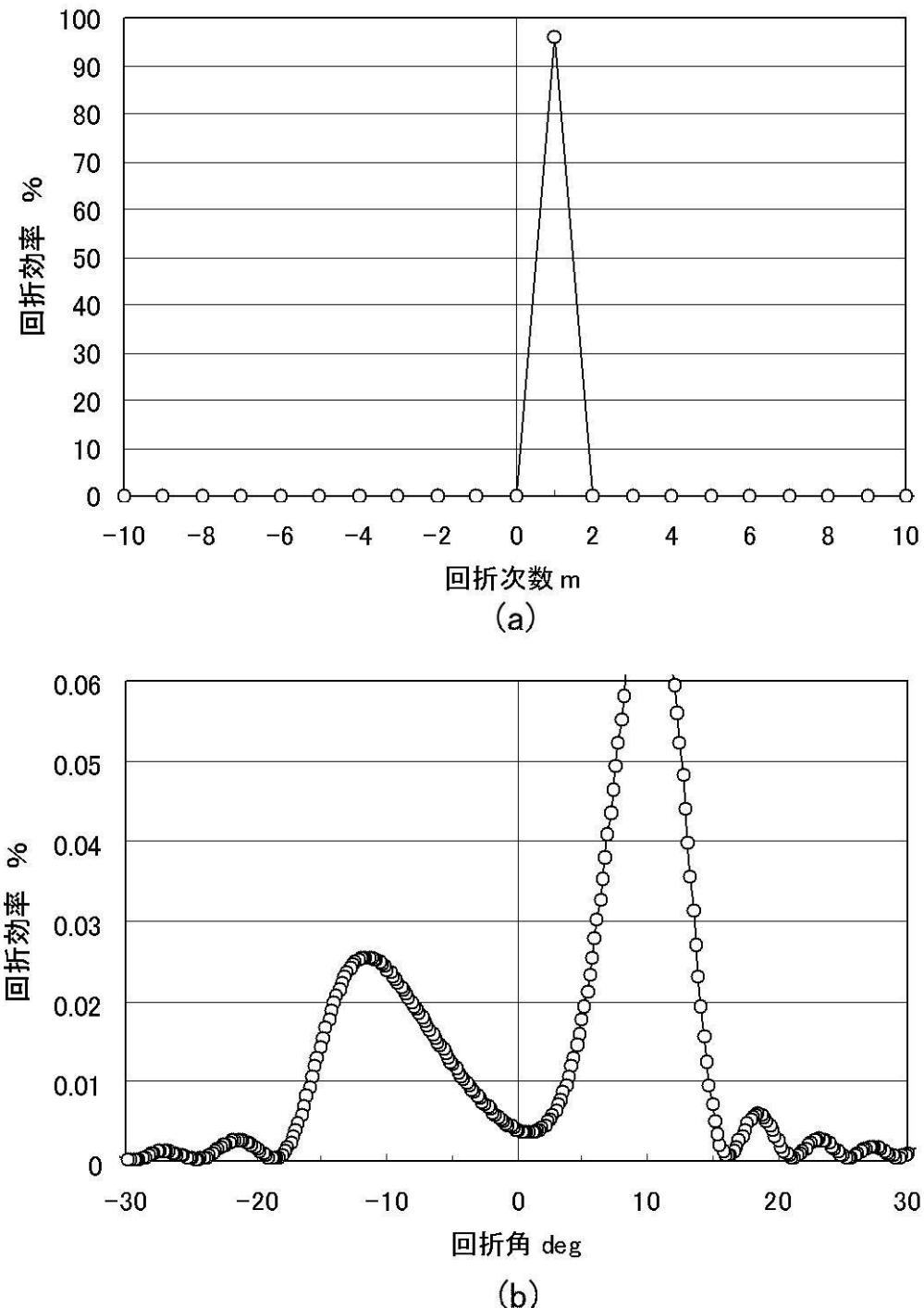


(b)

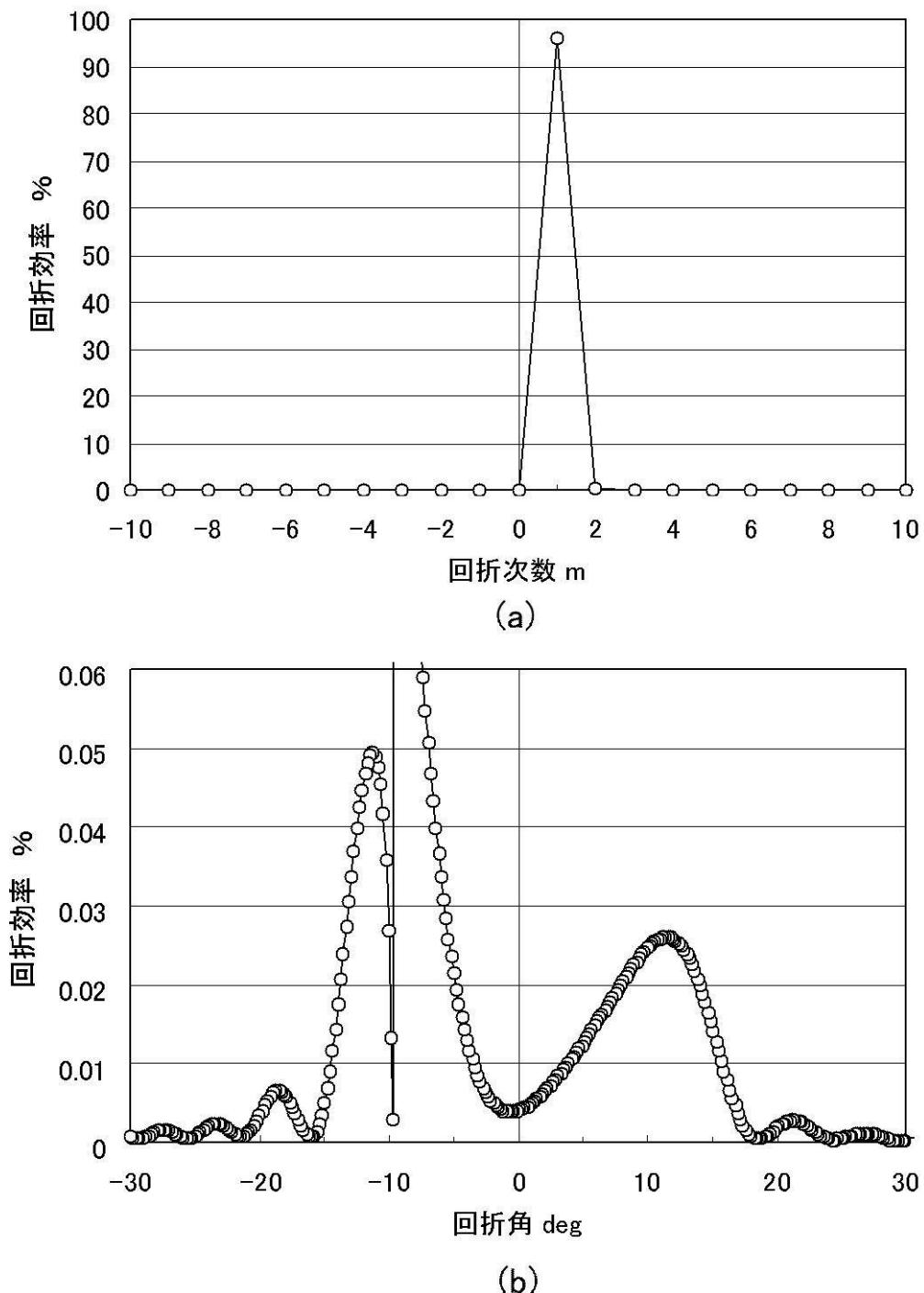
【図7】



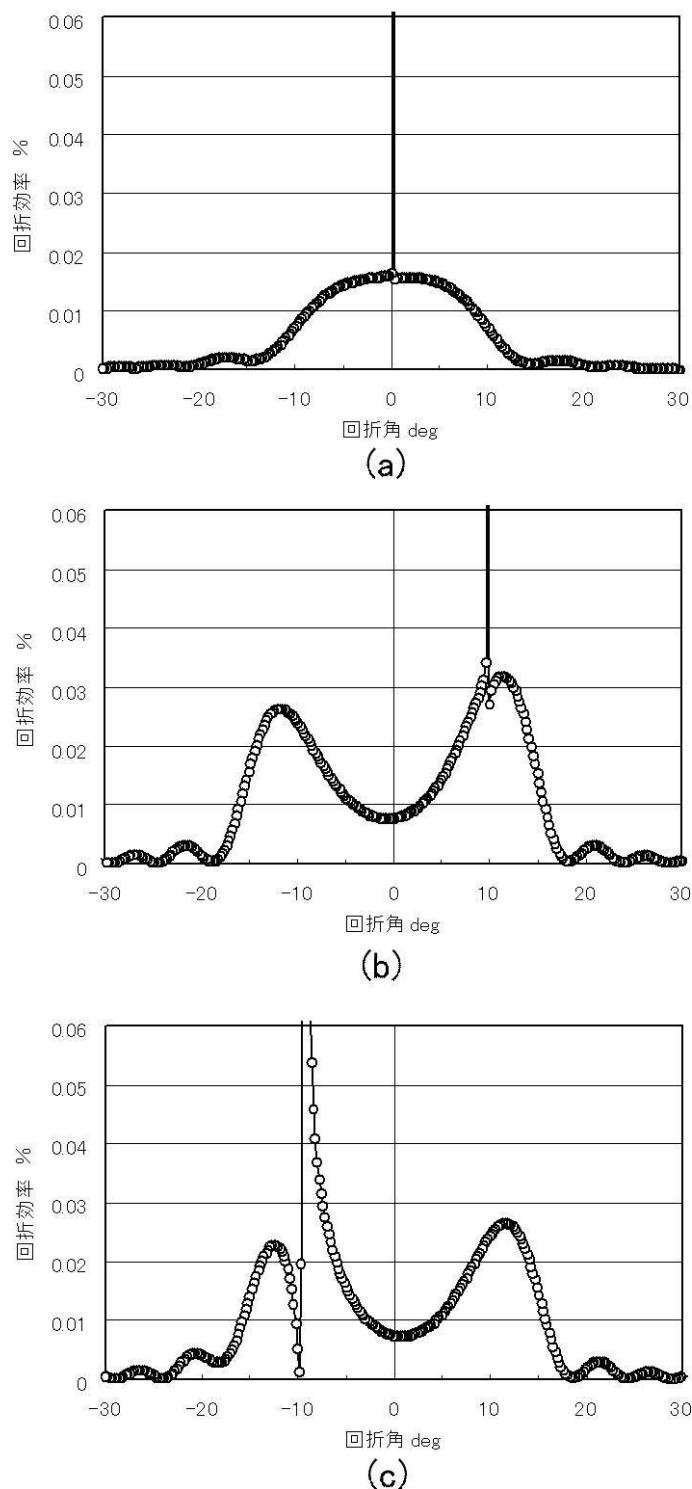
【図8】



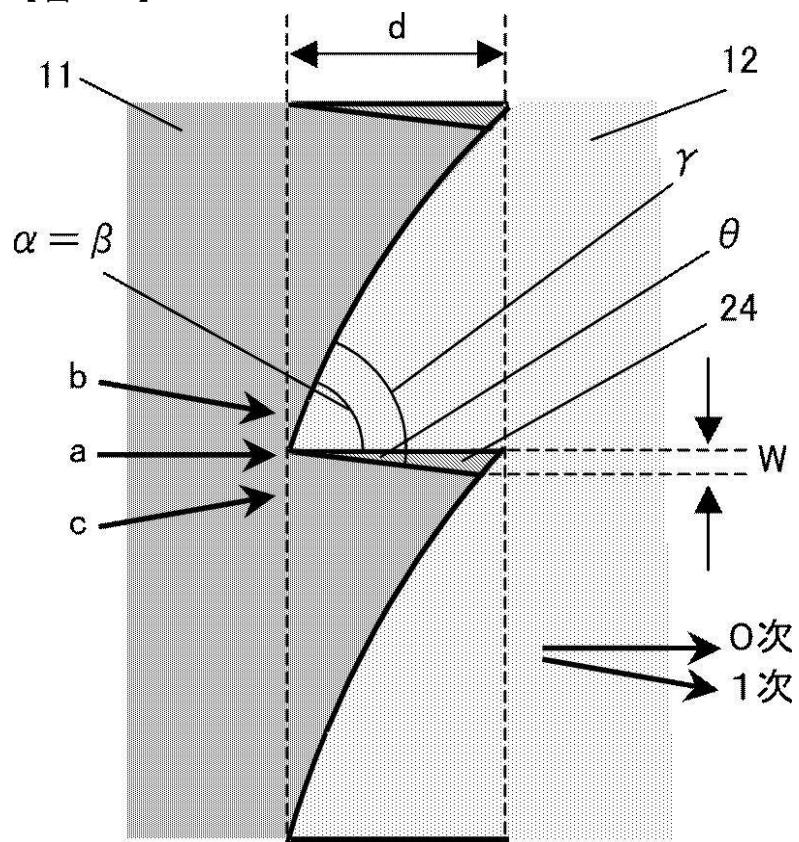
【図9】



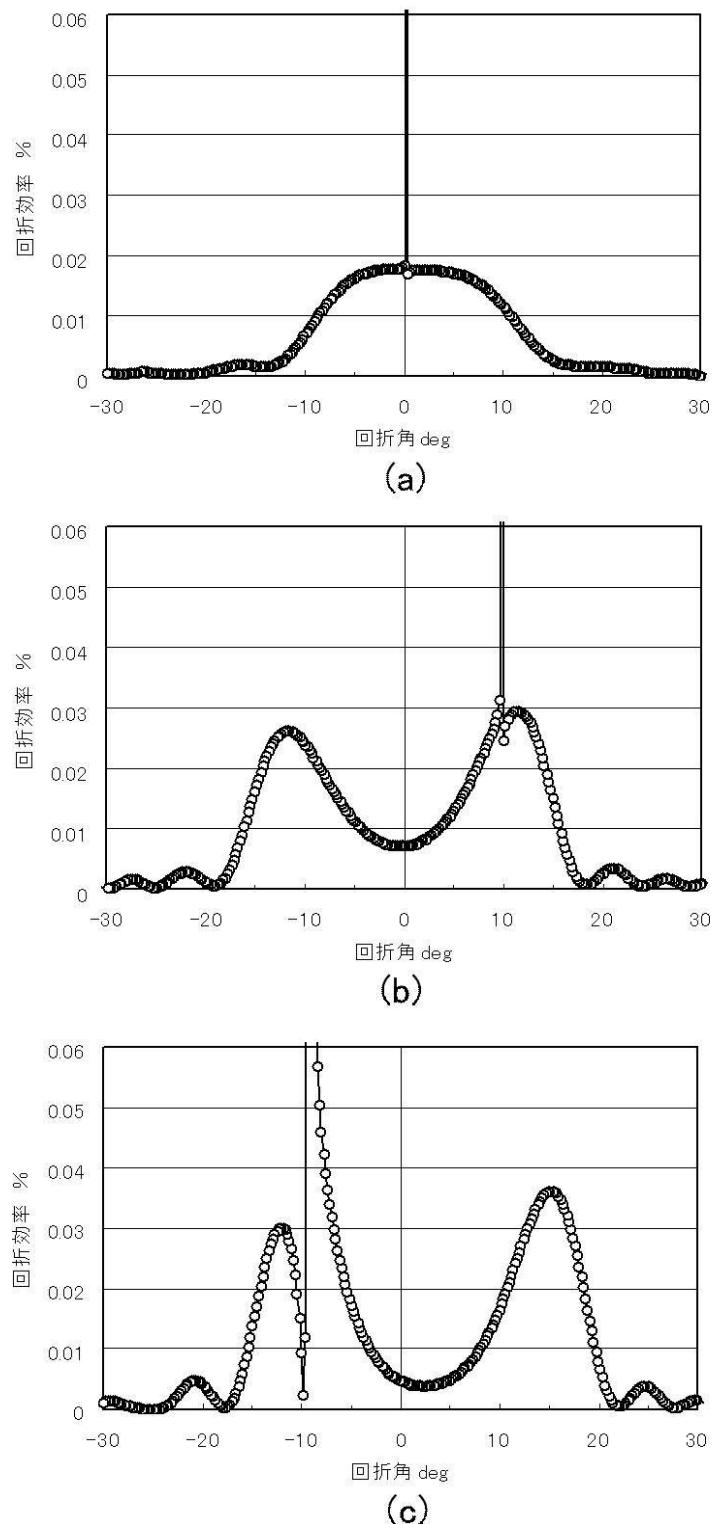
【図10】



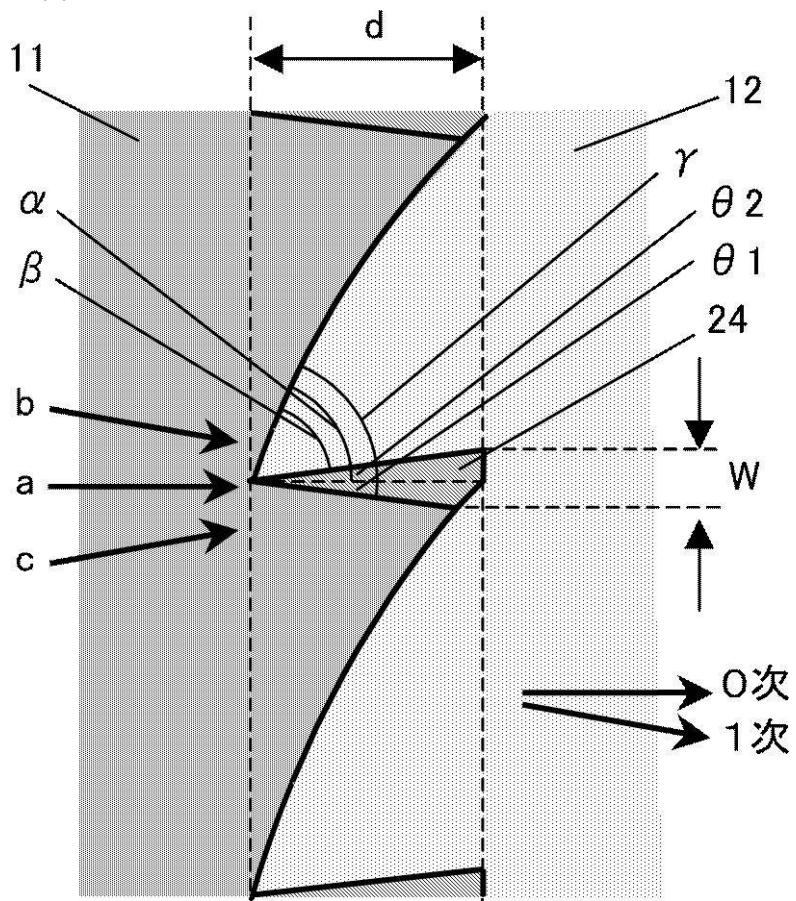
【図11】



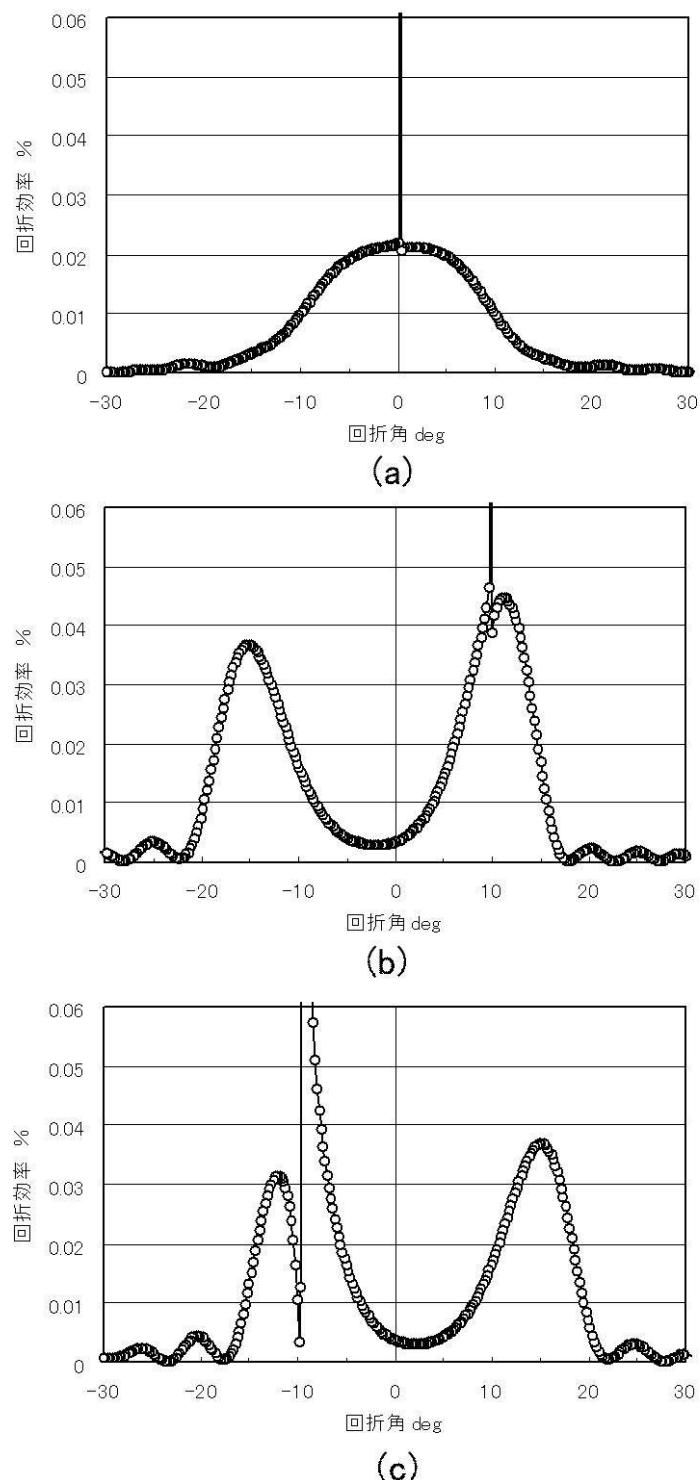
【図12】



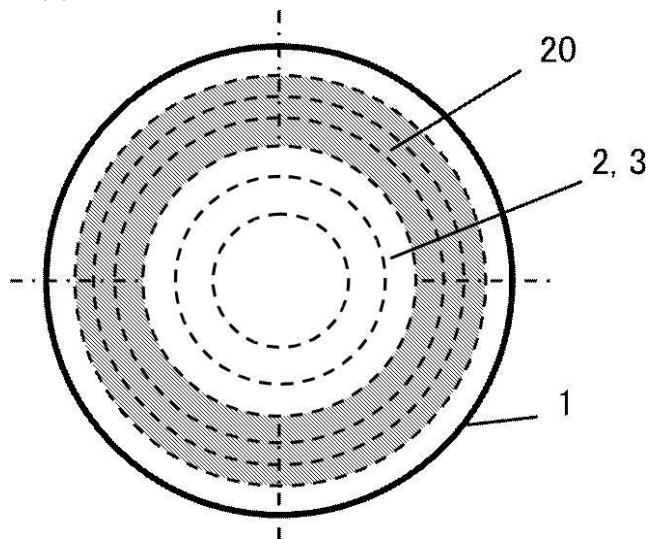
【図13】



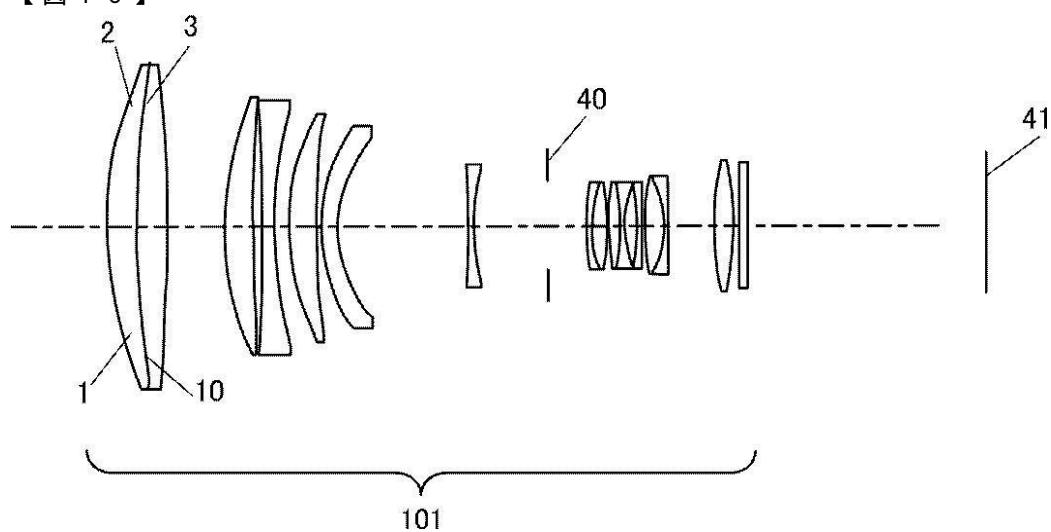
【図14】



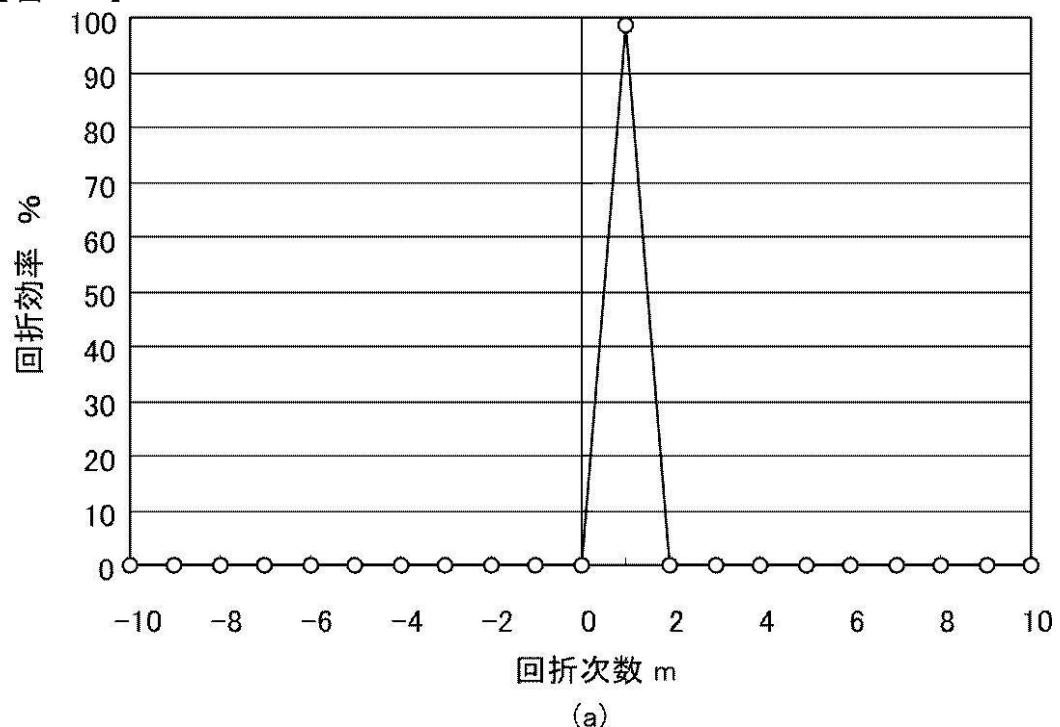
【図15】



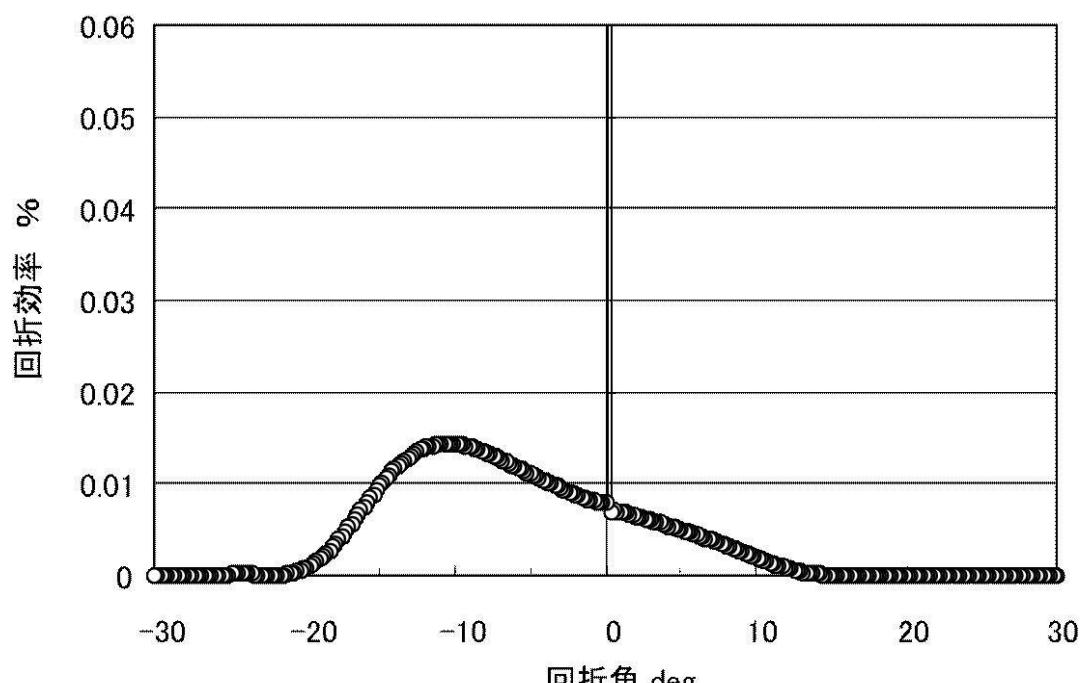
【図16】



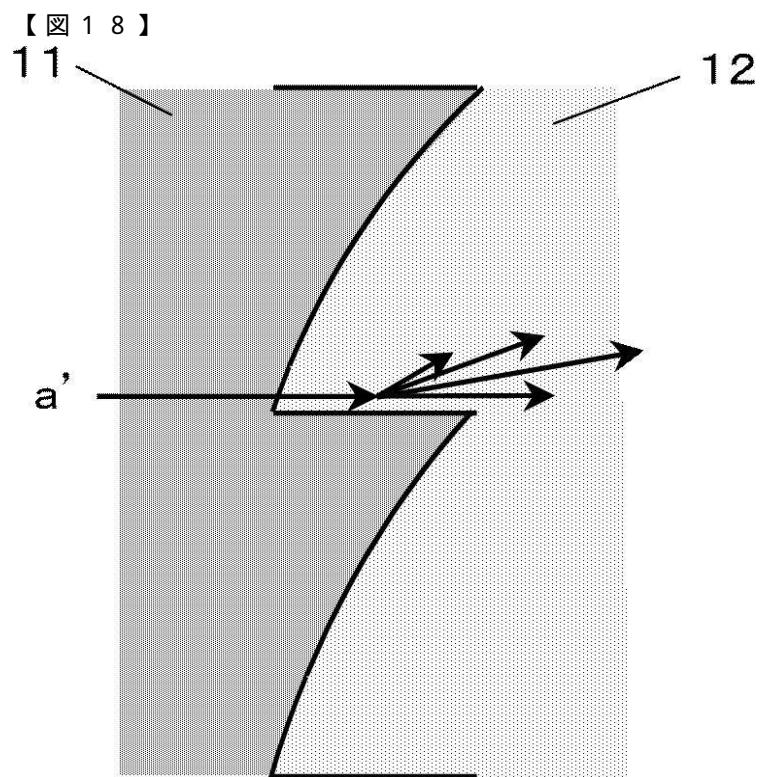
【図 17】



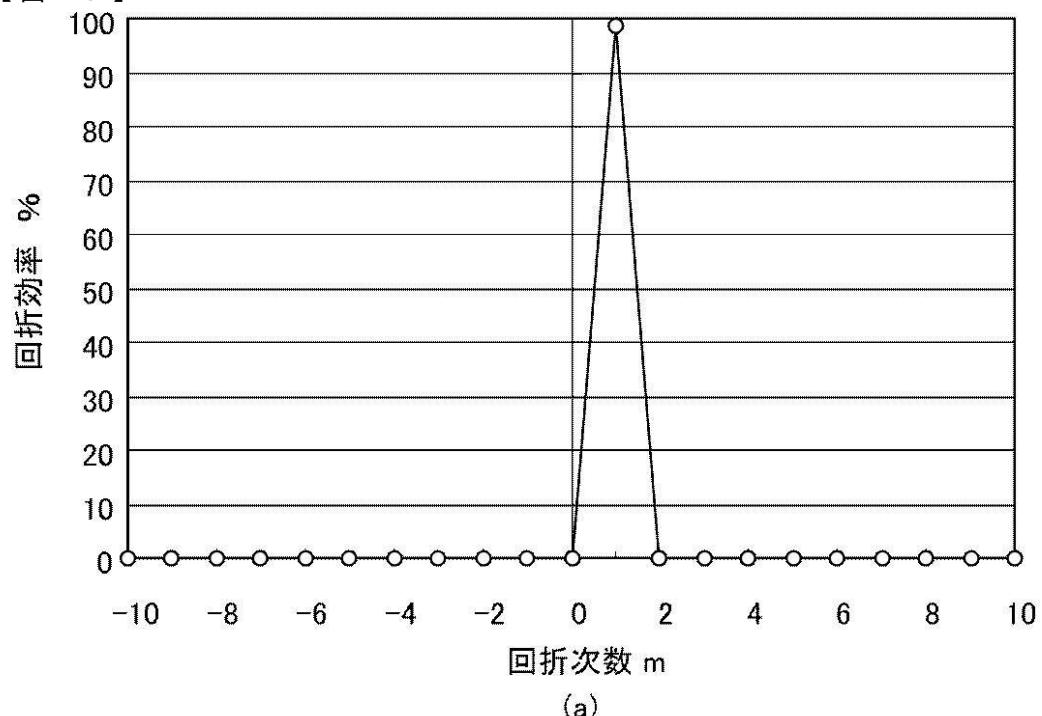
(a)



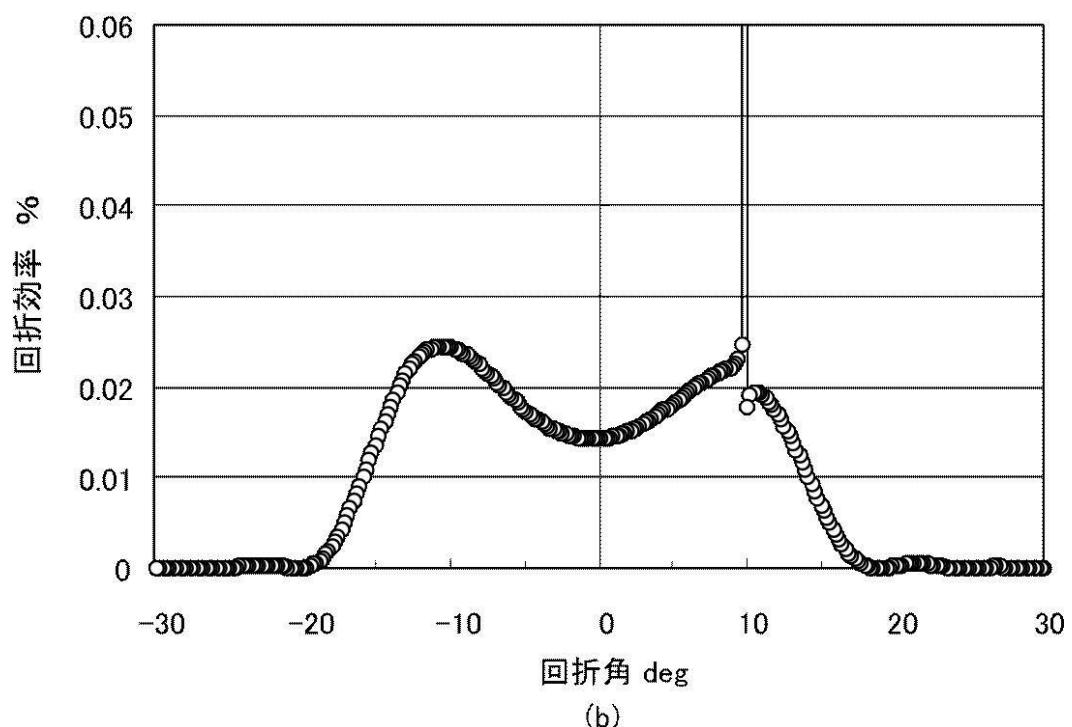
(b)



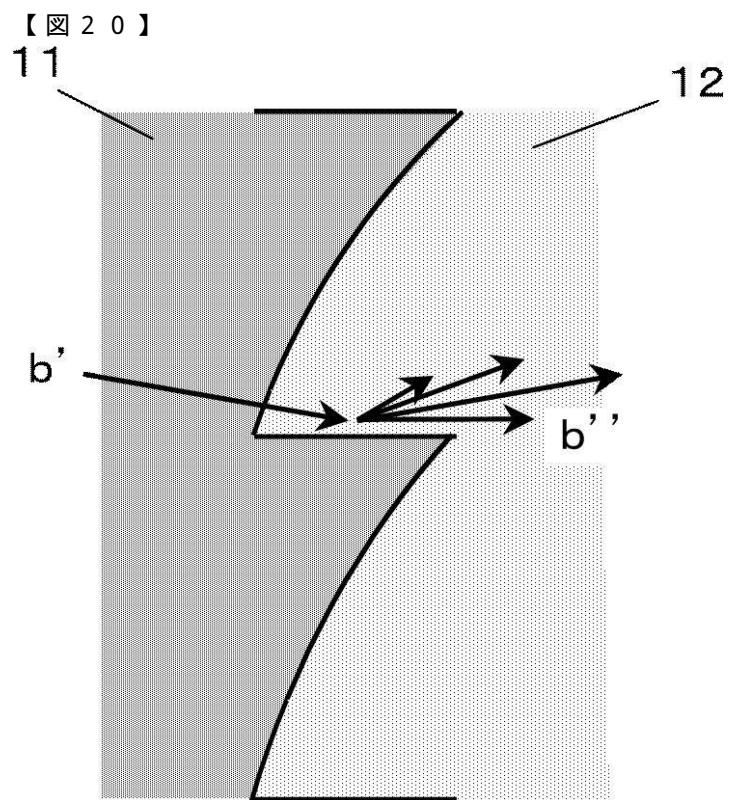
【図19】



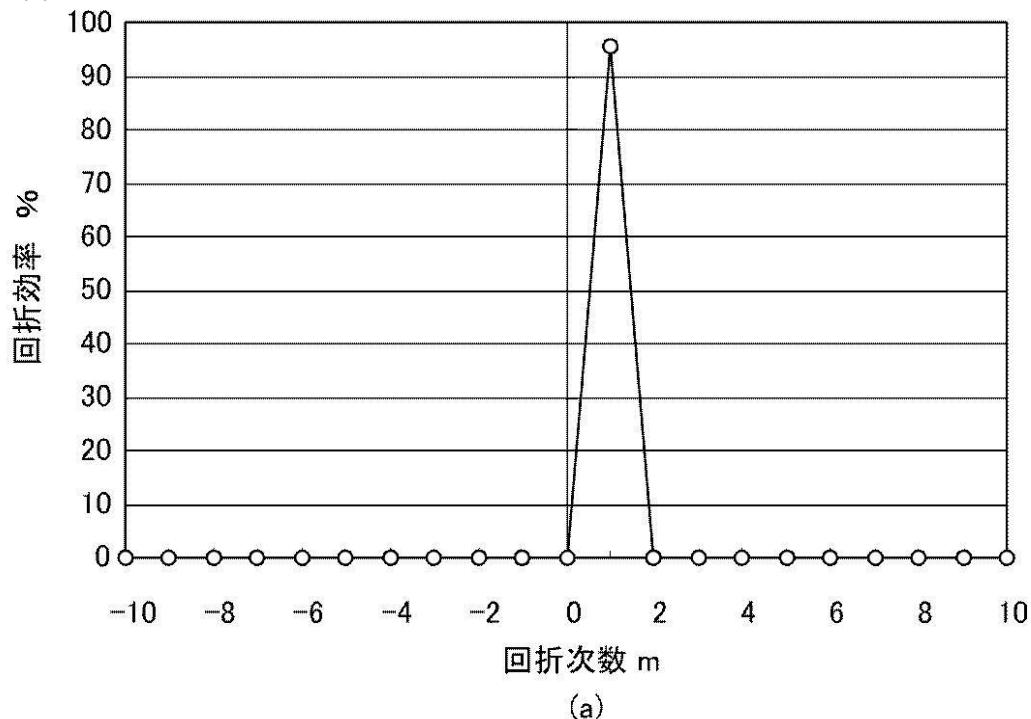
(a)



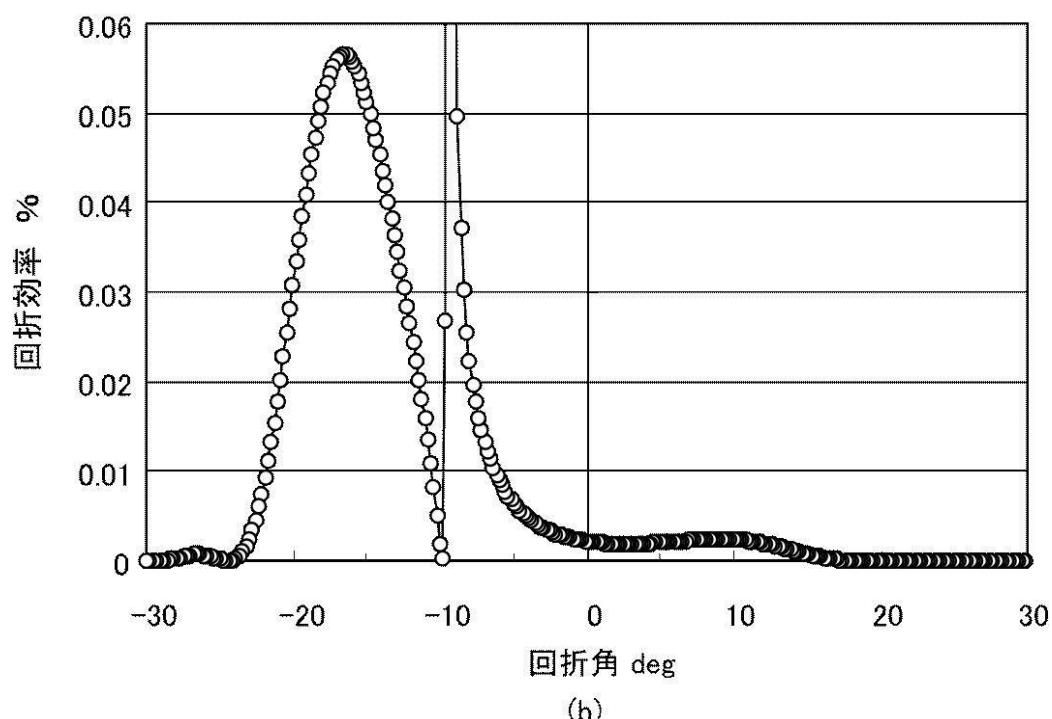
(b)



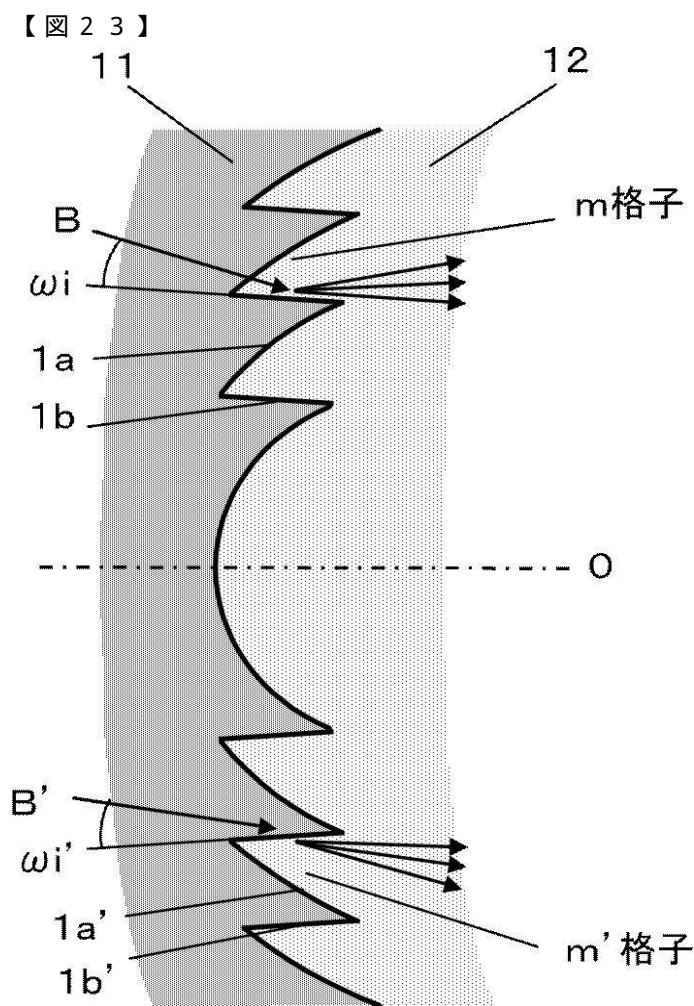
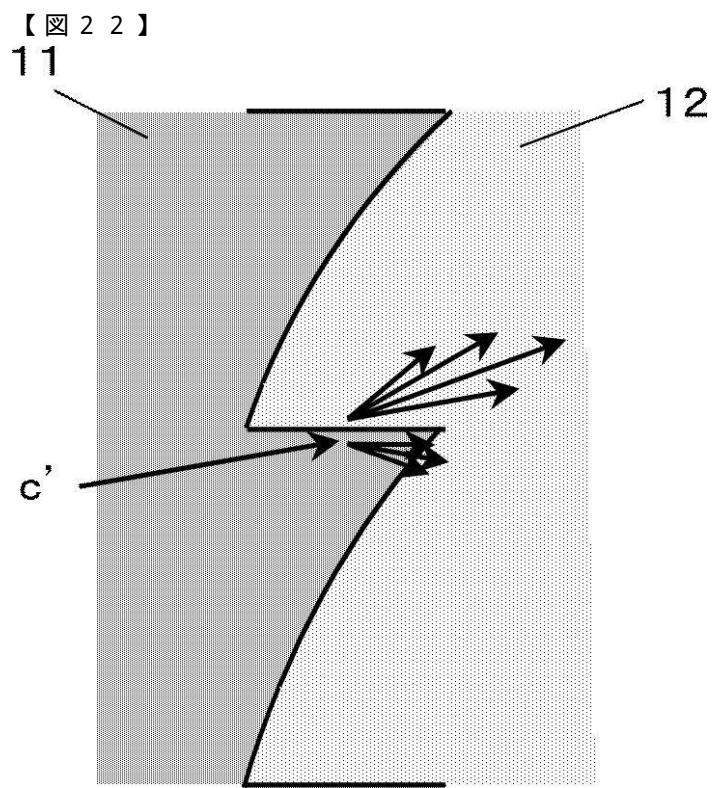
【図 2.1】



(a)



(b)



フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 02 B 5 / 18

G 02 B 13 / 02