

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5676929号
(P5676929)

(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

G O 2 B 5/18 (2006.01)

G O 2 B 5/18

G O 2 B 13/02 (2006.01)

G O 2 B 13/02

請求項の数 17 (全 36 頁)

(21) 出願番号 特願2010-133972 (P2010-133972)
 (22) 出願日 平成22年6月11日(2010.6.11)
 (65) 公開番号 特開2011-257689 (P2011-257689A)
 (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13日(2013.5.13)

(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
 ヤノン株式会社内
 審査官 貝沼 憲司

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 回折光学素子、光学系および光学機器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

互いに異なる材料から成る第1および第2の回折格子が積層された回折光学素子であって、

前記第1の回折格子の格子壁面と前記第2の回折格子の格子壁面との境界面に配置され、前記第1および第2の回折格子の材料とは異なる、使用波長帯域の光に対して透明な材料から成る単層または多層で構成された薄膜を有し、

前記第1の回折格子の材料のd線に対する屈折率を n_{d1} 、前記第2の回折格子の材料のd線に対する屈折率を n_{d2} 、前記薄膜の一層を構成する材料のd線に対する最大の屈折率を n_{d3} 、前記薄膜の最大の屈折率を有する層の最大の厚さを w 、前記薄膜の全体の厚さを W 、前記回折光学素子の格子ピッチを P 、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。

$$n_{d1} < n_{d2}$$

$$0.5 < n_{d3} - n_{d2} < 0.8$$

$$0 \mu m < w < 2 \mu m$$

$$0 < W / P < 0.05$$

【請求項 2】

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。

$$0 < n_{d2} - n_{d1} < 0.223$$

【請求項 3】

前記薄膜は、前記第 1 の回折格子の格子壁面と前記第 2 の回折格子の格子壁面との境界面にのみ設けられていることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の回折光学素子。

【請求項 4】

前記第 1 の回折格子の格子面と前記第 2 の回折格子の格子面との境界面にも前記薄膜が配置されており、前記厚さ W は、前記第 1 の回折格子の格子壁面と前記第 2 の回折格子の格子壁面との境界面における前記薄膜の全体の厚さであることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の回折光学素子。

【請求項 5】

前記第 1 の回折格子の格子壁面と前記第 2 の回折格子の格子壁面との境界面における前記薄膜の全体の厚さと、前記第 1 の回折格子の格子面と前記第 2 の回折格子の格子面との境界面における前記薄膜の全体の厚さと、は互いに異なることを特徴とする請求項 4 に記載の回折光学素子。

10

【請求項 6】

前記薄膜は、互いに異なる屈折率を有する複数の層を含み、該複数の層において屈折率の高い層の厚さは屈折率の低い層の厚さよりも物理的に厚いことを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

【請求項 7】

前記薄膜の最大の屈折率を有する層の材料は TiO_2 であることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

【請求項 8】

20

以下の式を満たすことを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

$$nd3 = 2.323$$

【請求項 9】

前記薄膜は、 d 線に対する屈折率が 2.323 である層と、 d 線に対する屈折率が 1.482 である層と、を有することを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

【請求項 10】

前記薄膜は、 TiO_2 から成る層と SiO_2 から成る層とを有することを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

30

【請求項 11】

前記薄膜の最大の屈折率を有する層の材料は Ta_2O_5 であることを特徴とする請求項 1 乃至 10 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

【請求項 12】

以下の式を満たすことを特徴とする請求項 1 乃至 11 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

$$nd3 = 2.154$$

【請求項 13】

光軸に近い輪帯ほど格子ピッチが大きいことを特徴とする請求項 1 乃至 12 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

40

【請求項 14】

前記第 1 の回折格子について、 d 線に対する屈折率は 1.504、アッペ数は 16.3、部分分散比は 0.390、波長 550 nm での屈折率は 1.511、であり、前記第 2 の回折格子について、 d 線での屈折率は 1.567、アッペ数は 47.0、部分分散比は 0.569、波長 550 nm での屈折率は 1.570、であることを特徴とする請求項 1 乃至 13 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

【請求項 15】

前記第 1 の回折格子は ITO 微粒子を混合させたフッ素アクリル系紫外線硬化樹脂から成り、前記第 2 の回折格子は ZrO_2 微粒子を混合させたアクリル系紫外線硬化樹脂から成ることを特徴とする請求項 1 乃至 14 のいずれか一項に記載の回折光学素子。

50

【請求項 16】

請求項 1 乃至 15 のいずれか一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 17】

請求項 16 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、光学系および光学機器に関する。

10

【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及び2は、格子壁面での不要光（フレア）を抑制するために格子壁面に吸収膜を設けた回折光学素子を提案している。特許文献3及び4は、2つの回折格子を密着配置し、その境界面に密着性を向上する目的で薄膜を設けることを提案している。特許文献5は、厳密結合波解析（RCWA: Rigorous Coupled Wave Analysis）を使用した回折効率の計算について開示している。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2003-240931号公報

【特許文献2】特開2004-126394号公報

【特許文献3】特開2004-13081号公報

【特許文献4】特開2005-62717号公報

【特許文献5】特開2009-217139号公報

30

【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1～4はこれについて検討していないために不要光を抑制する効果も十分ではないおそれがある。

【0005】

そこで、本発明は、不要光を抑制する回折光学素子、光学系および光学機器を提供することを例示的な目的とする。

40

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の回折光学素子は、互いに異なる材料から成る第1および第2の回折格子が積層された回折光学素子であって、前記第1の回折格子の格子壁面と前記第2の回折格子の格子壁面との境界面に配置され、前記第1および第2の回折格子の材料とは異なる、使用波長帯域の光に対して透明な材料から成る単層または多層で構成された薄膜を有し、前記第1の回折格子の材料のd線に対する屈折率を n_{d1} 、前記第2の回折格子の材料のd線に対する屈折率を n_{d2} 、前記薄膜の一層を構成する材料のd線に対する最大の屈折率を n_{d3} 、前記薄膜の最大の屈折率を有する層の最大の厚さを w 、前記薄膜の全体の厚さを W 、前記回折光学素子の格子ピッチを P 、とするとき、以下の式を満たすことを特徴とする

50

。

【 0 0 0 7 】

$$n d 1 < n d 2$$

$$0.5 < n d 3 - n d 2 < 0.8$$

$$0 \mu m < w < 2 \mu m$$

$$0 < W / P < 0.05$$

【発明の効果】

【 0 0 0 8 】

本発明によれば、不要光を抑制する回折光学素子、光学系および光学機器を提供することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【 0 0 0 9 】

【図 1】回折光学素子の平面図及び側面図である。（実施例 1）

【図 2】図 1 の部分拡大断面図である。（実施例 1）

【図 3】図 1 に示す回折格子部の部分拡大斜視図である。（実施例 1）

【図 4】図 2 の部分拡大断面図である。（実施例 1）

【図 5】図 1 に示す回折光学素子を有する光学系の光路図である。（実施例 1）

【図 6】図 5 に示す光学系において不要光の影響を説明するための模式図である。（実施例 1）

【図 7】図 5 に示す回折光学素子の画面外入射 + 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（実施例 1）

20

【図 8】図 7 に対する比較例としてのグラフである。

【図 9】図 8 に示す比較例における問題点を説明するための模式図である。

【図 10】図 1 に示す回折光学素子の効果を説明するための模式図である。（実施例 1）

【図 11】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。（実施例 1）

【図 12】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。（比較例）

【図 13】回折光学素子の画面外入射 - 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（実施例 1）

【図 14】回折光学素子の画面外入射 - 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（比較例）

30

【図 15】回折光学素子の画面外入射 + 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（実施例 2）

【図 16】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。（実施例 2）

【図 17】回折光学素子の画面外入射 - 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（実施例 2）

【図 18】回折光学素子の画面外入射 + 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（実施例 3）

【図 19】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。（実施例 3）

【図 20】回折光学素子の画面外入射 - 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（実施例 3）

40

【図 21】回折光学素子の部分拡大断面図である。（実施例 4）

【図 22】図 21 に示す回折光学素子の画面外入射 + 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（実施例 4）

【図 23】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。（実施例 4）

【図 24】回折光学素子の画面外入射 - 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（実施例 4）

【図 25】回折光学素子の部分拡大断面図である。（実施例 5）

【図 26】図 25 に示す回折光学素子の画面外入射 + 10 度光束に対する回折効率のグラフである。（実施例 5）

【図 27】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。（実施例 5）

50

【図 28】回折光学素子の画面外入射 - 10 度光束に対する回折効率のグラフである。(実施例 5)

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、添付図面を参照して、本発明の実施例を説明する。

【実施例 1】

【0011】

図 1 は、実施例 1 の回折光学素子 (DOE) 1 の平面図と側面図である。DOE 1 は、可視波長体全域の使用波長領域で特定の一つの次数 (以下、「特定次数」または「設計次数」ともいう) の回折光の回折効率を高めるように構成されている。

10

【0012】

DOE 1 は透明な一对の基板 2 および 3 と、その間に配置された回折格子部 10 と、を有する。各基板 2 および 3 は、平板又はレンズ作用を奏する形状を有するが、本実施例では、基板 2 の上下面と基板 3 の上下面はそれぞれ曲面を有する。

【0013】

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を有し、レンズ作用を奏する。図 2 は図 1 の中央部付近の部分拡大断面図であり、図 3 は、回折格子部 10 の部分拡大斜視図である。図 4 は図 2 の拡大断面図である。

【0014】

格子形状を分かりやすくするために、図 2 ~ 図 4 は格子深さ方向にかなりデフォルメされ、格子数も実際よりは少なく描かれている。図 3 および図 4 において、入射光束 a は、DOE 1 の設計入射角度である入射角度 0 度で入射する光束である。入射光束 b は、斜入射角度 (画面外光入射角度) で下向きに入射する光束である。入射光束 c は、斜入射角度 (画面外光入射角度) で上向きに入射する光束である。

20

【0015】

図 1、図 3 において、回折格子部 10 は、回折格子 (第 1 の回折格子) 11 と回折格子 (第 2 の回折格子) 12 とが光軸方向に密着することによって形成され、回折格子 11 および 12 の格子壁面には使用波長帯域で透明な薄膜 20 が設けられている。回折格子 11 は基板 2 と一体であってもよいし別体であってもよい。回折格子 12 は基板 3 と一体であってもよいし別体であってもよい。

30

【0016】

なお、本実施例では回折格子 11 と 12 が光軸方向において密着しているが、介在する薄膜 20 は後述するように両者の境界面の全域に亘って設けられている場合もあるので、回折格子 11 と 12 が光軸方向に積層されていれば足りる。本実施例では、回折格子 11 と 12 の間には空間が設けられていない。

【0017】

回折格子 11 は格子面 11a と格子壁面 11b から構成される同心円状のブレード構造を有し、回折格子 12 は格子面 12a と格子壁面 12b から構成される同心円状のブレード構造を有する。各回折格子 11 および 12 は、光軸 O から外周部にいくに従って格子ピッチを徐々に変化させてレンズ作用 (光の収斂作用や発散作用) を実現している。

40

【0018】

格子面 11a、12a および格子壁面 11b、12b は互いに隙間なく接しており、回折格子 11、12 は、全体で 1 つの DOE 10 として作用する。また、ブレード構造にすることで、DOE 1 に入射した入射光は、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 (図では +1 次) 方向に集中して回折する。

【0019】

本実施例の DOE 1 の使用波長領域は可視域であるため、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、回折格子 11 及び 12 を構成する材料及び格子高さを選択している。すなわち、複数の回折格子 (回折格子 11、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

50

付近となるように、各回折格子の材料及び格子高さが定められている。このように回折格子の材料、形状を適切に設定することによって、使用波長全域で高い回折効率を得られる。

【0020】

一般に、回折格子の格子高さは、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。なお、回折格子材料や格子高さは限定されない。

【0021】

回折格子11は、ITO微粒子を混合させたフッ素アクリル系紫外線硬化樹脂（ $n_d = 1.504$ 、 $d = 16.3$ 、 $gF = 0.390$ 、 $n_{550} = 1.511$ ）から構成されている。回折格子12は、 ZrO_2 微粒子を混合させたアクリル系紫外線硬化樹脂（ $n_d = 1.567$ 、 $d = 47.0$ 、 $gF = 0.569$ 、 $n_{550} = 1.570$ ）から構成されている。なお、各回折格子11、12のそれぞれの n_d は d 線に対する屈折率、 d は d 線に対するアッペ数、 gF は g 線と F 線に対する部分分散比、 n_{550} は波長550nmに対する屈折率である。

【0022】

本実施例では、回折格子11と12は互いに異なる材料により形成され、回折格子11は低屈折率分散材料から構成され、回折格子12はそれよりも高い屈折率を有する高屈折率分散材料から構成されている。但し、回折格子11の材料の d 線に対する屈折率と回折格子12の材料の d 線に対する屈折率のうちどちらかが大きければ足りる。

【0023】

また、微粒子を分散させた樹脂材料は、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を含むが、特に限定されない。また、本実施例では設計次数を+1次に行っているが、設計次数を+1次以外であっても同様の効果が得られるため、設計次数に限定されない。

【0024】

微粒子は、酸化物、金属、セラミックス、複合物、混合物を含むが、特に限定されない。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くなると、微粒子材料を樹脂材料に混合した際に、レイリー散乱が大きくなる可能性が生じる。

【0025】

微粒子を分散させた樹脂材料の代わりに、樹脂材料等の有機材料、ガラス材料、光学結晶材料、セラミックス材料等を使用してもよい。

【0026】

また、回折光学素子の輪帯毎に薄膜の幅または形状を変えることによって輪帯毎に制御してもよい。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。

【0027】

薄膜20は格子壁面に沿って略均一な厚さを有し、斜入射（画面外入射）光束によって発生して結像面に到達する不要光を減少させ、回折光学素子の使用波長帯域の光に対して透明な膜である。薄膜20は単層または多層で構成されるが、本実施例では、薄膜20は単層から構成されている。

【0028】

薄膜20は、回折格子11と12の境界面の少なくとも一部に配置され、本実施例では、格子壁面1b、1b'に設けられている。格子壁面1b、1b'の図4に示す格子高さ d は $9.29\mu m$ 、設計次数は+1次である。

【0029】

薄膜20は、回折格子11と12とは異なる高い屈折率を有する材料から構成され、本実施例では TiO_2 （ d 線に対する屈折率 $n = 2.323$ ）から構成されている。

【0030】

10

20

30

40

50

薄膜 20 が多層構造を有する場合、その一層を構成する材料の d 線に対する最大の屈折率は 1.3 以上 2.5 以下である必要があることが好ましい。但し、後述する数式に示すように、薄膜の屈折率は回折格子 11、12 の屈折率の大きい方よりも 0.5 以上大きくなければならないから、約 2.0 以上必要となる。また、2.5 以下としたのは現存する材料の屈折率を考慮した場合に材料の選択が困難になるためである。

【0031】

薄膜 20 の、積層面である格子壁面に垂直な方向の厚さまたは幅 w は 0.1 μm である。

【0032】

薄膜 20 の製造方法は特に限定されない。例えば、回折格子 12 を製造し、その後、薄膜 20 を選択的に形成する。具体的には、薄膜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、リソグラフィ手法やナノインプリント法等によるパターニングして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を用いることができる。その後、回折格子 11 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。薄膜 20 は蒸着などのプロセスで製造できるため、特許文献 1 及び 2 に記載された吸収膜を製造するよりも安価かつ容易に製造することができる。

【0033】

図 5 は、撮像装置（カメラなど）に適用可能な、DOE 1 を用いた望遠タイプの撮影光学系で $f = 392.00\text{mm}$ 、 $f\# = 4.12$ 、半画角 3.16 度であり、第 2 面に回折面が設けられている。図 6 は、図 7 の光学系における不要光の模式図である。

【0034】

図 5 において、30 は撮影レンズで、内部に絞り 40 と DOE 1 を有する。絞り 40 は DOE 1 よりも後側に配置されている。41 は結像面であるフィルムまたは CCD や CMOS 等の光電変換素子が配置されている。回折格子部 10 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）は包絡面の回折格子の中心での面法線に対し、回折格子部 10 の中心より分布するように設定されている。図 5 では前玉のレンズの貼り合せ面に DOE 1 を設けたが、これに限定するものではなく、レンズ表面に設けてもよいし、撮影レンズ内に複数、回折光学素子を使用してもよい。

【0035】

DOE 1 が適用可能な光学系は、図 5 に示す撮影光学系に限定されず、ビデオカメラの撮影レンズ、イメージスキャナーや、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、双眼鏡や望遠鏡などの観察光学系、光学式ファインダーであってもよい。また、DOE 1 を含む光学系が適用可能な装置も撮像装置に限定されず、広く光学機器であればよい。

【0036】

図 2 及び図 6 において、光軸 O に対して入射角 θ で入射した画面外光束 B と B' は、基板 2 を通過後、それぞれ光軸 O から上方向に数えて m 番目、下方向に数えて m 番目の回折格子である m 格子と 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 θ_i 、 $\theta_{i'}$ である。また、格子壁面 1b、1b' 方向は主光線方向と等しい。

【0037】

図 7 は、図 4 に示す入射光束 b と図 6 に示す入射光束 B 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 RCWA 計算結果を示すグラフである。入射角は図 4 の下向きを正の方向としている。

【0038】

図 7 (a) は設計次数である + 1 次回折光付近での回折効率であり、横軸は回折次数、縦軸は回折効率である。図 7 (b) は図 7 (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。回折角は図 4 の下向きを正の方向としている。

10

20

30

40

50

【0039】

図7(a)に示すように、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、この+1次回折光は像面に到達しないため影響は小さい。残りの不要光は図7(b)に示すように、特定角度方向にピークを有する不要光となって伝播する。

【0040】

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。

【0041】

図8は、薄膜20を有しない以外は図1と同様の構成を有するDOEを使用した場合の、図7に相当する比較例としてのグラフである。

10

【0042】

この比較例では、図9の光束b1に示すように、格子壁面に対して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度で入射する光束bは格子壁面で全反射し、不要光は略-10度方向から高角度範囲(回折角0度付近)まで広がる。回折角0度は設計入射角0度による+1次回折光の回折角0.20度(図3の+1次光)にほぼ等しいため、画面外光+10度入射の不要光のうち、回折角+0.20度付近に射出する不要光が像面に到達することになる。

【0043】

なお、回折光学素子の後段の光学系によって画面外入射光の不要光が像面に到達する回折次数、回折角度が異なる。しかし、いかなる光学系であっても少なくとも設計入射角における設計回折次数が伝播する回折角度に略一致する画面外光による不要光の回折光は像面に到達するため、像性能の低下を招くことになる。

20

【0044】

図7(b)に示す-10度方向の不要光ピーク角度は図8(b)とほぼ同じだが、不要光の広がりや図7(b)と図8(b)では異なり、図7(b)のほうが低回折角度の回折効率が低い。

【0045】

つまり、本実施例は低回折角度の不要光(図9の光束b1)が少なくなる。図5及び図6に示す光学系においては、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次(回折角+0.34度)の回折効率が0.0084%、回折次数-47次(回折角+0.14度)の回折効率が0.0083%である。

30

【0046】

一方、薄膜を有しない比較例においては、回折次数-46次(回折角+0.34度)の回折効率が0.014%、回折次数-47次(回折角+0.14度)の回折効率が0.014%であるため、本実施例では不要光の影響が大幅に減少していることになる。

【0047】

図10は、本実施例における図9に対応する模式図である。本実施例においては、不要光は、格子壁面付近に入射する光束bの一部は薄膜20の内部に閉じ込められ、光導波路のように光束b3として伝播し、これらの光束が射出後に干渉する結果、像面に到達する光束が比較例よりも減少していると考えられる。

40

【0048】

次に、図4に示す入射光束aとcが及ぼす影響について説明する。

【0049】

図11は、図4に示す入射光束aを想定して入射角度0度、格子ピッチ100μm、波長550nmにおけるRCWA計算を行った結果を示すグラフである。

【0050】

図11(a)は設計次数である+1次回折光付近での回折効率であり、横軸は回折次数

50

、縦軸は回折効率である。図 1 1 (b) は図 1 1 (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。回折角は図 4 の下向きを正の方向としている。

【 0 0 5 1 】

図 1 2 は、薄膜 2 0 を有しない以外は図 1 と同様の構成を有する D O E を使用した場合の、図 1 1 に相当する比較例としてのグラフである。

【 0 0 5 2 】

図 1 1 (a) から設計次数である + 1 次回折光の回折効率は 9 9 . 0 2 % (回折角 + 0 . 2 0 度) であり、図 1 2 (a) の薄膜を設けていない回折格子の場合の + 1 次回折光の回折効率 9 8 . 7 6 % (回折角 + 0 . 2 0 度) と同等以上である。残りの光は不要光となり図 1 1 (b) のように伝播していることがわかる。ここで想定している格子ピッチはひとつの基準として 1 0 0 μ m としている。図 1 に示す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手段による悪影響が小さくなるため、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。

【 0 0 5 3 】

結果として、回折光学素子全域を考慮した場合、この格子ピッチ 1 0 0 μ m の回折効率 0 . 2 6 % の違いは設計入射角度 (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。同時に、不要光の影響も小さい。

【 0 0 5 4 】

次に、図 1 3 は、図 4 に示す入射光束 c を想定して入射角度 - 1 0 度、格子ピッチ 1 0 0 μ m、波長 5 5 0 n m における R C W A 計算を行った結果を示すグラフである。入射角は図 4 の下向きを正の方向としている (図 2 の m ' 格子では上向きが正の方向となる) 。

【 0 0 5 5 】

図 1 3 (a) は設計次数である + 1 次回折光付近での回折効率であり、横軸は回折次数、縦軸は回折効率である。図 1 3 (b) は図 1 3 (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。

【 0 0 5 6 】

図 1 4 は、薄膜 2 0 を有しない以外は図 1 と同様の構成を有する D O E を使用した場合の、図 1 3 に相当する比較例としてのグラフである。

【 0 0 5 7 】

図 1 3 (a) から設計次数である + 1 次回折光の回折効率が集中しているが、この + 1 次回折光は像面に到達することはないため影響は小さい。残りの不要光は図 1 3 (b) のように特定角度方向にピークをもつ不要光となって伝播していることがわかる。図 1 4 (b) と比較すると、+ 方向の不要光のピークは増加し、- 方向の不要光のピークは減少している。これは格子壁面に設けた高屈折率薄膜によって、低屈折率媒質側から格子壁面に入射した光束の一部が反射することで + 方向の不要光が増加し、- 方向の透過に起因する不要光が減少していることを意味している。

【 0 0 5 8 】

図 5 及び図 6 に示す光学系においては、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 . 2 0 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 1 3 の回折角 + 0 . 2 0 度付近の回折効率は R C W A 計算結果から、回折次数 + 4 9 次 (回折角 + 0 . 2 6 度) の回折効率が 0 . 0 1 0 %、回折次数 + 4 8 次 (回折角 + 0 . 0 6 度) の回折効率が 0 . 0 1 0 % である。比較例の場合は図 1 4 より回折次数 + 4 9 次 (回折角 + 0 . 2 6 度) の回折効率が 0 . 0 0 2 1 %、回折次数 + 4 8 次 (回折角 + 0 . 0 6 度) の回折効率が 0 . 0 0 2 2 % である。このように、本発明の方が比較例に比べて増加しているが、回折効率の数値が極めて小さいため、像性能の低下に対しての影響は小さい。

【 0 0 5 9 】

このように、本発明の回折光学素子を適用した光学系において、格子壁面に薄膜を設け

10

20

30

40

50

ることにより、不要光の影響が小さい m' 格子の不要光の増加に影響ない程度に抑制し、不要光の影響が大きい m 格子の不要光を大幅に減少させることができる。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ない程度に抑制することができる。

【0060】

なお、ここでは格子ピッチ $100\mu\text{m}$ 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 $100\mu\text{m}$ の回折効率を示している。

10

【0061】

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。

【0062】

本実施例では、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や回折格子の高さを適切に設定して所定の次数の回折光に対して広い波長帯域で高い回折効率を実現している。

20

【0063】

また、本実施例では、DOE1において、次式を満足することによって結像面に到達する不要光を低減することができる。ここで、 $nd2$ は回折格子12を構成する材料の d 線に対する屈折率、 $nd3$ は薄膜20の一層を構成する材料の d 線に対する（最大の）屈折率である。

【0064】

本実施例では、回折格子11を構成する材料の d 線に対する屈折率 $nd1$ よりも $nd2$ の方が大きい例について説明している。しかし、 $nd1 > nd2$ の場合には回折格子の格子形状の向きも逆になるため、格子壁面による不要光の影響は同様となるため以下のように一般化することができる。

30

【0065】

【数1】

$$nd1 < nd2$$

$$0.5 < nd3 - nd2 < 0.8$$

【0066】

本実施例は、格子壁面の高屈折率薄膜によって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低減されたことと高屈折率薄膜内部に一部の光束が閉じ込められ、光導波路のように伝播されることを利用している。数式1を満足しないと屈折率差が小さくなって不要光の低減効果も減少する。この点、特許文献3は、薄膜と2つの光学層のいずれか一方の屈折率差を 0.01 以下に抑えているため、本実施例の効果が得られない。

40

【0067】

本実施例では、屈折率 $nd3 = 2.323$ 、屈折率 $nd2 = 1.567$ 、屈折率 $nd1 = 1.504$ であるから、 $nd3 - nd2 = 0.756$ 、 $nd3 - nd1 = 0.819$ である。

【0068】

なお、本実施例においては、図6に示すように、不要光のピークを絞り40で遮光して

50

いるが、これに限定されない。

【実施例 2】

【0069】

実施例 2 は実施例 1 と同様であるが、薄膜の幅 w が $0.1 \mu\text{m}$ ではなく $1.0 \mu\text{m}$ である点が相違する。

【0070】

図 15 は、図 4 に示す入射光束 b と図 6 に示す入射光束 B に対して入射角度 $+10$ 度、格子ピッチ $100 \mu\text{m}$ 、波長 550nm における RCWA 計算結果を示すグラフである。

【0071】

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、この $+1$ 次回折光は像面に到達しないため影響は小さい。残りの不要光は実施例 1 と同様に特定角度方向にピークを有する不要光となって伝播する。

【0072】

この -10 度方向の不要光ピーク角度は図 8 (b) とほぼ同じだが、不要光の広がりとは図 15 と図 8 (b) では異なり、図 15 のほうが低回折角度の回折効率が低い。つまり、本実施例は低回折角度の不要光 (図 9 の光束 b_1) が少なくなる。

【0073】

図 5 及び図 6 に示す光学系においては、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 15 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 次の回折効率が 0.0065% 、回折次数 -47 次の回折効率が 0.0074% であるため、図 7 (b) と同様に、回折効率が大幅に減少していることになる。

【0074】

図 16 は、図 4 に示す入射光束 a を想定して入射角度 0 度、格子ピッチ $100 \mu\text{m}$ 、波長 550nm における RCWA 計算を行った結果を示すグラフである。

【0075】

設計次数である $+1$ 次回折光の回折効率は 96.06% であり、薄膜を設けていない回折格子の場合の $+1$ 次回折光の回折効率より低くなっている。残りの光は不要光となり実施例 1 と同様に伝播していることがわかる。この薄膜によって、位相の不整合が生じた結果、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がっている。また、実施例 1 より薄膜の幅が厚いため、実施例 1 と比較して $+1$ 次回折光の回折効率の低減量が大きくなっている。

【0076】

回折光学素子全域を考慮した場合、この格子ピッチ $100 \mu\text{m}$ の回折効率 2.70% 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。同時に、不要光の影響も小さい。

【0077】

次に、図 17 は、図 4 に示す入射光束 c を想定して入射角度 -10 度、格子ピッチ $100 \mu\text{m}$ 、波長 550nm における RCWA 計算を行った結果を示すグラフである。

【0078】

図 17 から設計次数である $+1$ 次回折光の回折効率が集中しているが、この $+1$ 次回折光は像面に到達することはないため影響は小さい。残りの不要光は実施例 1 と同様に特定角度方向にピークをもつ不要光となって伝播していることがわかる。図 2、図 5、図 6 に示すように、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 17 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 $+49$ 次の回折効率が 0.0060% 、回折次数 $+48$ 次の回折効率が 0.0064% である。薄膜を設けていない回折格子の場合と比較して増加しているが、回折効率の数値が極めて小さいため、像性能の低下に対しての影響は小さい。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 9 】

このように、本発明の回折光学素子を適用した光学系において、薄膜を設けることにより、不要光の影響が小さい m' 格子の不要光の増加に影響ない程度に抑制し、不要光の影響が大きい m 格子の不要光を大幅に減少させることができる。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ない程度に抑制することができる。

【 0 0 8 0 】

本実施例でも、 $nd_3 = 2.323$ 、 $nd_2 = 1.567$ 、 $nd_1 = 1.504$ であるから、 $nd_3 - nd_2 = 0.756$ 、 $nd_3 - nd_1 = 0.819$ であり、数式 1 を満足している。

10

【 0 0 8 1 】

以上、本実施例でも、DOE 1 を適用した光学系では、薄膜 20 が結像面に到達する不要光を減少させて像性能の低下を抑制し、設計次数の回折効率を像性能に影響ない程度に抑制することができる。

【 0 0 8 2 】

本実施例で示したように薄膜 20 の厚さに限定されないが、その幅が大きくなると、回折格子 11 と回折格子 12 の位相の不整合領域が拡大し、比較的 low 次数の不要回折光の回折効率が増加し、設計次数の回折効率（像性能）が低下する。

【 0 0 8 3 】

このため、薄膜の全体の厚さ（幅） W を回折光学素子の格子ピッチで割った値は 0 よりも大きく 0.05 未満であるという次式を満足すればよい。ここで、 P は格子ピッチ、 W は薄膜 20 の積層面に垂直な方向の厚さの合計（薄膜が多層構造であれば各層の厚さの合計）である。

20

【 0 0 8 4 】

【 数 2 】

$$0 < W/P < 0.05$$

【 0 0 8 5 】

設計次数の回折効率に関しては薄膜の幅 w と格子ピッチ P の関係は線形関係であり、薄膜 20 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薄膜 20 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。

30

【 0 0 8 6 】

例えば、実施例 1 に示した格子ピッチ $100 \mu m$ 、薄膜の幅の和 $1.0 \mu m$ の回折格子と格子ピッチ $200 \mu m$ 、薄膜の幅の和 $2.0 \mu m$ 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、数式 2 が成立する。

【 0 0 8 7 】

また、薄膜 20 の幅が大きくなると、光導波路内の伝播モード数の増加に起因する漏れ光が増加し、薄膜の最大の屈折率の層の最大の厚さ w が $2 \mu m$ 以上になると不要光のリップルが増加するため、フレア低減効果が減少する。したがって、 $2 \mu m$ 未満であることが好ましい。薄膜が多層構造であれば最大の厚さを有する層の厚さが $2 \mu m$ 未満であることを意味する。

40

【 0 0 8 8 】

【 数 3 】

$$0 < w < 2 \mu m$$

【 実施例 3 】

【 0 0 8 9 】

実施例 3 は薄膜 20 が Ta_2O_5 ($n = 2.154$) である点で実施例 1 と相違し、それ以外は実施例 1 と同様である。

【 0 0 9 0 】

50

図18は、図4に示す入射光束bと図6に示す入射光束Bに対して入射角度+10度、格子ピッチ100 μ m、波長550nmにおけるRCWA計算結果を示すグラフである。

【0091】

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、この+1次回折光は像面に到達しないため影響は小さい。残りの不要光は実施例1と同様に特定角度方向にピークを有する不要光となって伝播する。

【0092】

この-10度方向の不要光ピーク角度は図8(b)とほぼ同じだが、不要光の広がりとは図18と図8(b)では異なり、図18のほうが低回折角度の回折効率が低い。つまり、本実施例は低回折角度の不要光(図9の光束b1)が少なくなる。

10

【0093】

図5及び図6に示す光学系においては、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18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次の回折効率が0.0067%、回折次数-47次の回折効率が0.0067%であるため、図7(b)と同様に、回折効率が大幅に減少していることになる。

【0094】

図19は、図4に示す入射光束aを想定して入射角度0度、格子ピッチ100 μ m、波長550nmにおけるRCWA計算を行った結果を示すグラフである。

【0095】

20

設計次数である+1次回折光の回折効率は98.39%であり、薄膜を設けていない回折格子の場合の+1次回折光の回折効率より低くなっている。残りの光は不要光となり実施例1と同様に伝播していることがわかる。この薄膜によって、位相の不整合が生じた結果、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がっている。

【0096】

回折光学素子全域を考慮した場合、この格子ピッチ100 μ mの回折効率0.37%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。同時に、不要光の影響も小さい。

30

【0097】

次に、図20は、図4に示す入射光束cを想定して入射角度-10度、格子ピッチ100 μ m、波長550nmにおけるRCWA計算を行った結果を示すグラフである。

【0098】

図20から設計次数である+1次回折光の回折効率が集中しているが、この+1次回折光は像面に到達することはないため影響は小さい。残りの不要光は実施例1と同様に特定角度方向にピークをもつ不要光となって伝播していることがわかる。図2、図5、図6に示すように、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20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次の回折効率が0.0084%、回折次数+48次の回折効率が0.0084%である。薄膜を設けていない回折格子の場合と比較して増加しているが、回折効率の数値が極めて小さいため、像性能の低下に対しての影響は小さい。

40

【0099】

このように、本発明の回折光学素子を適用した光学系において、薄膜を設けることにより、不要光の影響が小さいm'格子の不要光の増加に影響ない程度に抑制し、不要光の影響が大きいm格子の不要光を大幅に減少させることができる。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ない程度に抑制することができる。

【0100】

50

本実施例でも、 $nd3 = 2.154$ 、 $nd2 = 1.567$ 、 $nd1 = 1.504$ であるから、 $nd3 - nd2 = 0.587$ 、 $nd3 - nd1 = 0.650$ であり、数式1を満足している。

【0101】

以上、本実施例の光学系では、薄膜20が結像面に到達する不要光を減少させて像性能の低下を抑制し、設計次数の回折効率を像性能に影響ない程度に抑制することができる。

【実施例4】

【0102】

実施例4は薄膜を格子壁面のみではなく境界面全域に設けた（薄膜22が格子壁面から格子面まで連続して設けられた）実施例であり、図21は実施例4の回折格子の拡大断面図である。図21はわかりやすいように格子周期方向にかなりデフォルメされた図となっている。回折格子11と回折格子12の構成は実施例1と同様である。

【0103】

回折格子11と回折格子12の境界面全域には透明な薄膜21が設けられ、薄膜21は格子面から格子壁面の全域に亘って略均一な厚さを有する。薄膜21は、格子面に入射する垂直入射光束（画面内入射）光束に対して反射防止機能と斜入射（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機能を有している。

【0104】

薄膜21は回折格子11から回折格子12に向かう方向に順に、15H、27L、120H、28L、15Hを有する多層膜で構成されている。ここで、Hは高屈折率層（ TiO_2 層）、Lは低屈折率層（ SiO_2 （ $n = 1.482$ ）層）、数値は物理膜厚（nm）を表す。5層の薄膜のうちで1つの高屈折率薄膜が他の薄膜よりも物理的に厚くなるように設計されている。この回折光学素子の格子面における設計入射角度である入射角度0度（入射光束a）に対して、可視域全域（430nm～670nm）の透過率が99.7%以上になるように設計されている。

【0105】

図22は、図21に示す入射光束bと図6に示す入射光束Bに対して入射角度+10度、格子ピッチ100μm、波長550nmにおけるRCWA計算結果を示すグラフである。

【0106】

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、この+1次回折光は像面に到達しないため影響は小さい。残りの不要光は実施例1と同様に、特定角度方向にピークを有する不要光となって伝播する。

【0107】

この-10度方向の不要光ピーク角度は図8（b）とほぼ同じだが、不要光の広がりとは図22と図8（b）では異なり、図22のほうが低回折角度の回折効率が低い。つまり、本実施例は低回折角度の不要光（図9の光束b1）が少なくなる。

【0108】

図5及び図6に示す光学系においては、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22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次の回折効率が0.010%、回折次数-47次の回折効率が0.010%であるため、図7（b）と同様に、回折効率が大幅に減少していることになる。

【0109】

図23は、図4に示す入射光束aを想定して入射角度0度、格子ピッチ100μm、波長550nmにおけるRCWA計算を行った結果を示すグラフである。

【0110】

設計次数である+1次回折光の回折効率は98.61%であり、薄膜を設けていない回折格子の場合の+1次回折光の回折効率より低くなっている。残りの光は不要光となり実

10

20

30

40

50

施例 1 と同様に伝播していることがわかる。この薄膜によって、位相の不整合が生じた結果、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下がっている。回折光学素子全域を考慮した場合、この格子ピッチ $100\ \mu\text{m}$ の回折効率 0.15% 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。同時に、不要光の影響も小さい。

【0111】

次に、図 24 は、図 4 に示す入射光束 c を想定して入射角度 -10 度、格子ピッチ $100\ \mu\text{m}$ 、波長 $550\ \text{nm}$ における RCWA 計算を行った結果を示すグラフである。

【0112】

図 24 から設計次数である $+1$ 次回折光の回折効率が集まっているが、この $+1$ 次回折光は像面に到達することはないため影響は小さい。残りの不要光は実施例 1 と同様に特定角度方向にピークをもつ不要光となって伝播していることがわかる。図 2、図 5、図 6 に示すように、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 24 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 $+49$ 次の回折効率が 0.011% 、回折次数 $+48$ 次の回折効率が 0.011% である。薄膜を設けていない回折格子の場合と比較して増加しているが、回折効率の数値が極めて小さいため、像性能の低下に対しての影響は小さい。

【0113】

このように、本発明の回折光学素子を適用した光学系において、薄膜を設けることにより、不要光の影響が小さい m' 格子の不要光の増加に影響ない程度に抑制し、不要光の影響が大きい m 格子の不要光を大幅に減少させることができる。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ない程度に抑制することができる。

【0114】

また、本実施例の薄膜 21 の膜構成は 5 層となっているが、層数、膜厚、膜材料については限定されず、実施例 1 ~ 3 に示したような単層薄膜でもよい。膜構成は回折格子 11 および 12 の材料選択によって格子面の反射防止特性や格子壁面の不要光抑制効果を任意に設計することができる。また、多層膜の薄膜においては、高屈折率材料の薄膜が最も光学的に厚くし、光導波路構造とすることが好ましい。

【0115】

また、逆に実施例 1 ~ 3 では格子壁面に単層膜を設けているが、格子壁面に多層膜の薄膜を設けてもよい。この場合についても、多層膜の薄膜においては、高屈折率材料の薄膜が最も光学的に厚くし、光導波路構造とすることが好ましい。

【0116】

本実施例は境界面全域に薄膜を形成するため、実施例 1 ~ 3 よりも容易かつ安価に回折光学素子を製造することができる。回折光学素子の製造においては、例えば、回折格子 12 を製造した後、格子面から格子壁面全域に薄膜を真空蒸着等により形成し、その後、回折格子 11 を形成すればよいが、この方法に限定されない。さらに、界面全域に薄膜を設けることにより回折格子 11 と回折格子 12 の密着性を上げることもできる。

【実施例 5】

【0117】

実施例 5 は実施例 4 と同様であるが、薄膜の格子面の上にある全体の厚さと格子壁面の上にある全体の厚さが異なっている（境界面の位置によって薄膜の全体の厚さが異なる）点の実施例 4 と相違する。図 25 は実施例 4 の回折格子の拡大断面図である。図 25 はわかりやすいように格子周期方向にかなりデフォルメされた図となっている。

【0118】

薄膜 21 は回折格子 11 から回折格子 12 に向かう方向に順に、 20H 、 19L 、 229H 、 22L 、 19H を有する多層膜で構成されている。ここで、 H は高屈折率層（ Ti

10

20

30

40

50

O_2 層)、Lは低屈折率層(SiO_2 層)、数値は物理膜厚(nm)を表す。5層の薄膜のうちで1つの高屈折率薄膜が他の薄膜よりも厚くなるように設計されている。また、格子壁面上の薄膜21の膜厚は物理膜厚の半分に設定され、具体的には、回折格子11から回折格子12に向かう方向に順に、10H、10L、115H、11L、10Hを有する。5層の薄膜のうちで1つの高屈折率薄膜が他の薄膜よりも物理的に厚くなるように設計されている。この回折光学素子の格子面における設計入射角度である入射角度0度(入射光束a)に対して、可視域全域(430nm~670nm)の透過率が99.0%以上になるように設計されている。

【0119】

図26は、図25に示す入射光束bと図6に示す入射光束Bに対して入射角度+10度、格子ピッチ100μm、波長550nmにおけるRCWA計算結果を示すグラフである。

10

【0120】

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、この+1次回折光は像面に到達しないため影響は小さい。残りの不要光は実施例1と同様に特定角度方向にピークを有する不要光となって伝播する。

【0121】

この-10度方向の不要光ピーク角度は図8(b)とほぼ同じだが、不要光の広がり図26と図8(b)では異なり、図26のほうが低回折角度の回折効率が低い。つまり、本実施例は低回折角度の不要光(図9の光束b1)が少なくなる。

20

【0122】

図5及び図6に示す光学系においては、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26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次の回折効率が0.010%、回折次数-47次の回折効率が0.010%であるため、図7(b)と同様に、回折効率が大幅に減少していることになる。

【0123】

図27は、図4に示す入射光束aを想定して入射角度0度、格子ピッチ100μm、波長550nmにおけるRCWA計算を行った結果を示すグラフである。

【0124】

30

設計次数である+1次回折光の回折効率は97.90%であり、薄膜を設けていない回折格子の場合の+1次回折光の回折効率より低くなっている。残りの光は不要光となり実施例1と同様に伝播していることがわかる。この薄膜によって、位相の不整合が生じた結果、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がっている。

【0125】

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0.86%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。同時に、不要光の影響も小さい。

40

【0126】

次に、図28は、図4に示す入射光束cを想定して入射角度-10度、格子ピッチ100μm、波長550nmにおけるRCWA計算を行った結果を示すグラフである。

【0127】

図28から設計次数である+1次回折光の回折効率が集中しているが、この+1次回折光は像面に到達することはないため影響は小さい。残りの不要光は実施例1と同様に特定角度方向にピークをもつ不要光となって伝播していることがわかる。図2、図5、図6に示すように、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28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次の回折効率が0.01

50

3 %、回折次数 + 4 8 次の回折効率が 0 . 0 1 3 % である。薄膜を設けていない回折格子の場合と比較して増加しているが、回折効率の数値が極めて小さいため、像性能の低下に対しての影響は小さい。

【 0 1 2 8 】

このように、本発明の回折光学素子を適用した光学系において、薄膜を設けることにより、不要光の影響が小さい m' 格子の不要光の増加を影響ない程度に抑制し、不要光の影響が大きい m 格子の不要光を大幅に減少させることができる。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ない程度に抑制することができる。

【 0 1 2 9 】

本実施例のように格子面と格子壁面の膜厚が異なってもよい場合、本実施例はより容易かつ安価に回折光学素子を製造することができる。一例として真空蒸着により薄膜を形成する場合に、鋸形状であるブレード格子の格子面と格子壁面の膜厚は一般的に異なり、さらに図 3 に示すように回折格子がレンズ面上に作製されている場合にも膜厚は異なる。このため、製造方法に応じて格子面の反射防止機能と格子壁面のフレア低減機能を任意に設計することで設計次数の回折効率の低減と画面外光束による不要光の低減を両立させることができる。製造方法の一例は実施例 4 と同様である。

【 0 1 3 0 】

表 1 は、実施例 1 ~ 5 の結果をまとめている。 $nd1$ は回折格子 1 1 の d 線の屈折率、 $nd2$ は回折格子 1 2 の d 線の屈折率、 $vd1$ は回折格子 1 1 のアッペ数、 $vd2$ は回折格子 1 2 のアッペ数、 $gF1$ は回折格子 1 1 の部分分散比、 $gF2$ は回折格子 1 2 の部分分散比である。 $n1_550$ は回折格子 1 1 の波長 550 nm の屈折率、 $n2_550$ は回折格子 1 2 の波長 550 nm の屈折率、 d は回折光学素子の格子高さ、 W は薄膜を構成する材料、膜厚、薄膜の全体の幅である。ひとつの材料で構成される薄膜のうちの最大膜厚の幅 w である。表における回折効率 (%) は入射光束 B に対応する入射角度 + 10 度、格子ピッチ 100 μm における、回折次数 - 4 6 次、 - 4 7 次の RCWA の計算結果である。なお、実施例 5 については格子面上の膜厚を示している。

【 0 1 3 1 】

【表 1】

	実施例 1	実施例 2	実施例 3	実施例 4	実施例 5
nd1	1.504	1.504	1.504	1.504	1.504
nd2	1.567	1.567	1.567	1.567	1.567
nd3	2.323	2.323	2.154	2.323/1.482	2.323/1.482
nd3-nd1	0.819	0.819	0.650	0.819	0.819
nd3-nd2	0.756	0.756	0.587	0.756	0.756
nd2-nd1	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063
回折効率(%)					
回折次数-46 次	0.0084	0.0065	0.0067	0.010	0.010
回折次数-47 次	0.0083	0.0074	0.0067	0.010	0.010
誘電体薄膜の全体の厚さ $W(\mu m)$	0.1	1.0	0.1	0.205	0.309
最大膜厚 $w(\mu m)$	0.1	1.0	0.1	0.120	0.229

【 0 1 3 2 】

実施例 1 ~ 5 に示したように、薄膜を介して密着される回折格子 1 1、1 2 の屈折率 $nd1$ 、 $nd2$ および薄膜の少なくとも 1 つの材料の d 線に対する屈折率 $nd3$ は数式 1 を満足することによって結像面に到達する不要光を低減することができる。また、像性能の

低下を防止するために薄膜の厚さは数式 2 を満足すればよい。また、フレア低減効果が減少することを防止するために数式 3 を満足すればよい。

【 0 1 3 3 】

また、実施例 1 ~ 5 では、回折格子 1 1 と回折格子 1 2 の屈折率関係が次式を満足する。この屈折率差では透過率が 99 % 以上であるため、通常、界面に反射防止膜を設ける必要はないが、実施例 1 ~ 5 ではあえて反射防止膜を設けることによって不要光を低減している。

【 0 1 3 4 】

【数 4】

$$0 < n_{d2} - n_{d1} < 0.223$$

10

【 0 1 3 5 】

本実施例では、 $n_{d2} - n_{d1} = 0.063$ であり、回折格子 1 1 と 1 2 の間の反射率が 1 % 以下となる場合に対応している。

【 0 1 3 6 】

本実施例では、回折格子 1 1 を構成する材料の d 線に対する屈折率 n_{d1} よりも n_{d2} の方が大きい例について説明している。しかし、一般には、数式 4 は、前記第 1 の回折格子の材料の d 線に対する屈折率と前記第 2 の回折格子の材料の d 線に対する屈折率のうち大きい方から小さい方を引いた値が 0 よりも大きく 0.223 よりも小さいことを意味している。

20

【 0 1 3 7 】

また、必ずしも全ての輪帯に薄膜を設ける必要はなく、輪帯の一部に設けても良い。この際、最小格子ピッチを含む一部に薄膜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いため、回折光学素子全体で発生する不要光の寄与が大きいためである。

【 0 1 3 8 】

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

【産業上の利用可能性】

【 0 1 3 9 】

回折光学素子は回折作用を必要とする用途に適用することができる。

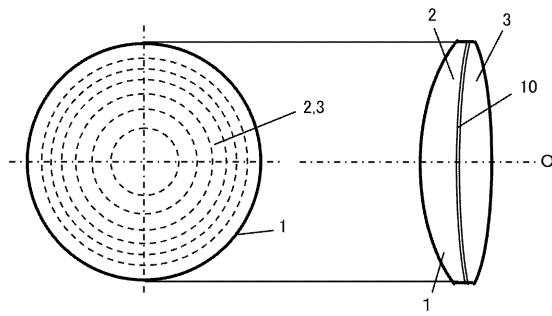
30

【符号の説明】

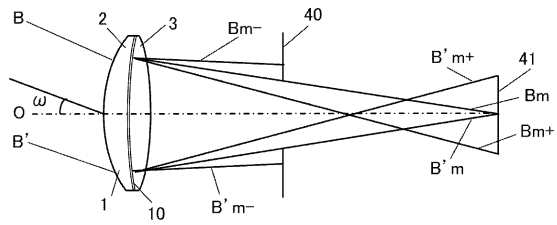
【 0 1 4 0 】

1	回折光学素子
1 1、1 2	回折格子
2 0、2 1	薄膜

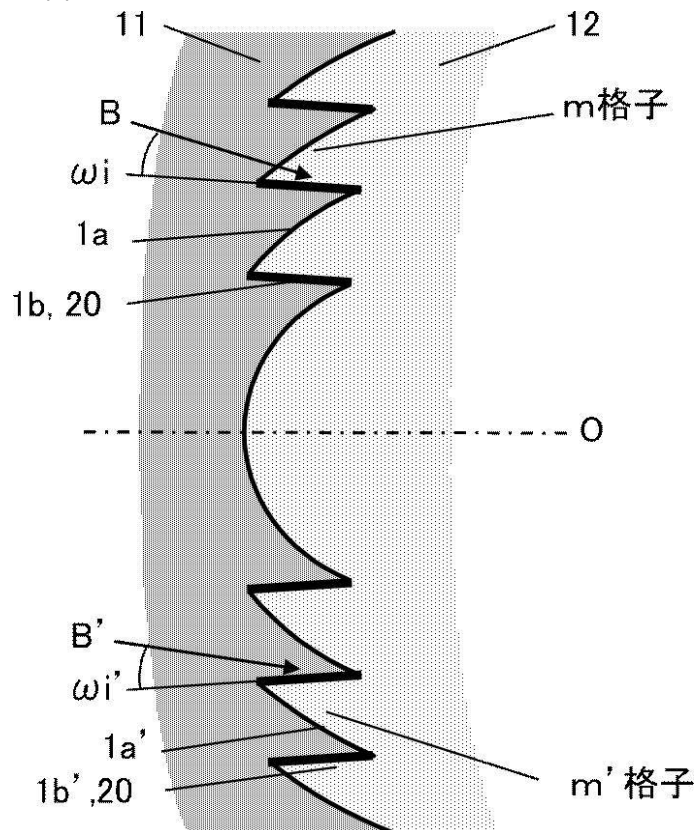
【図 1】



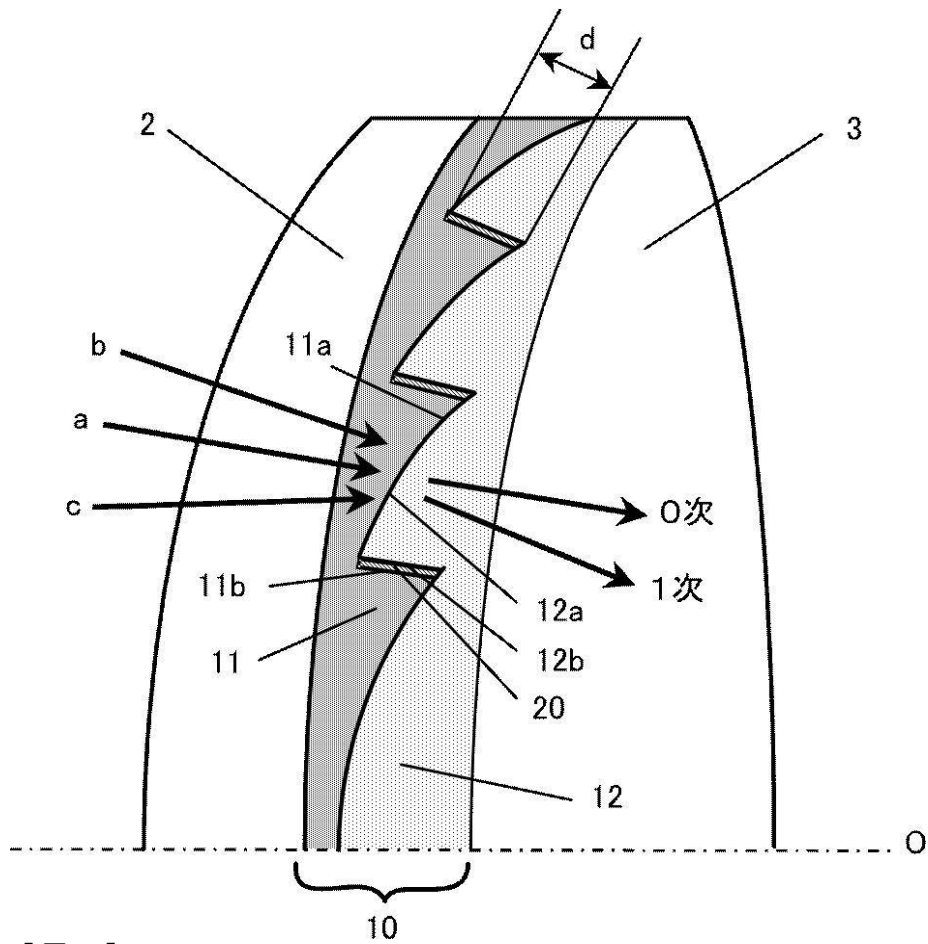
【図 6】



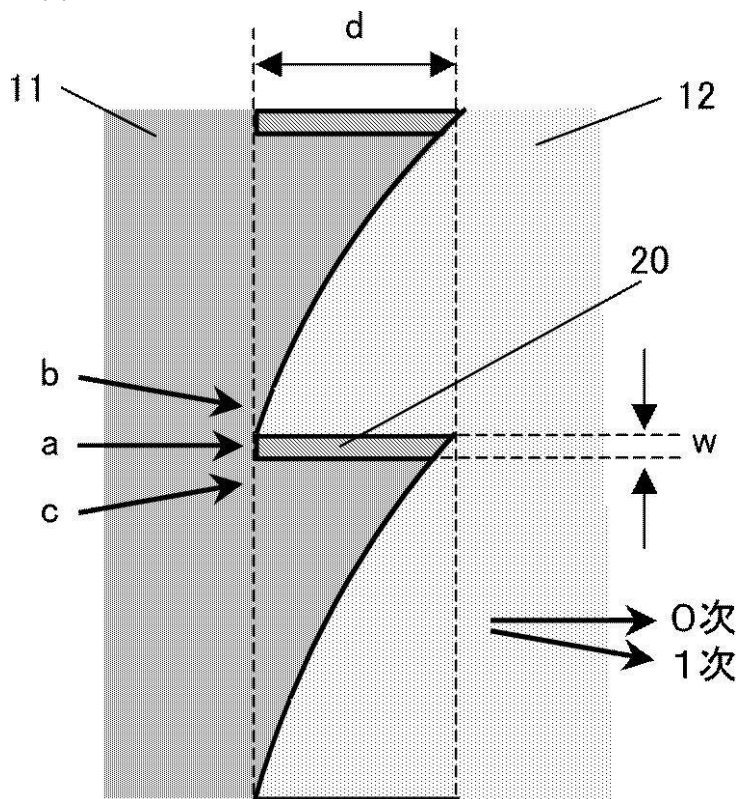
【図 2】

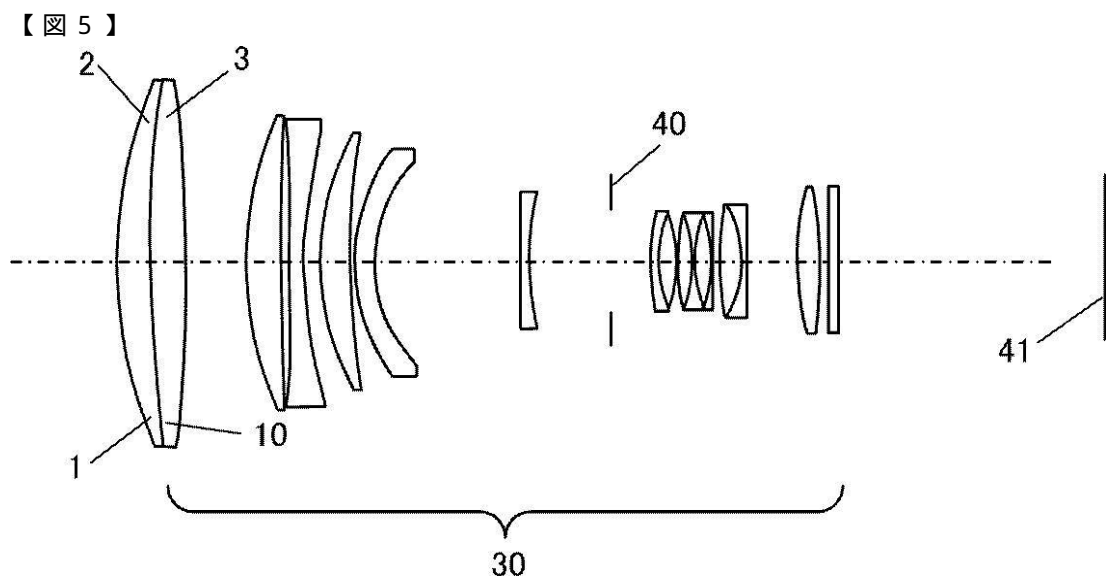


【図3】

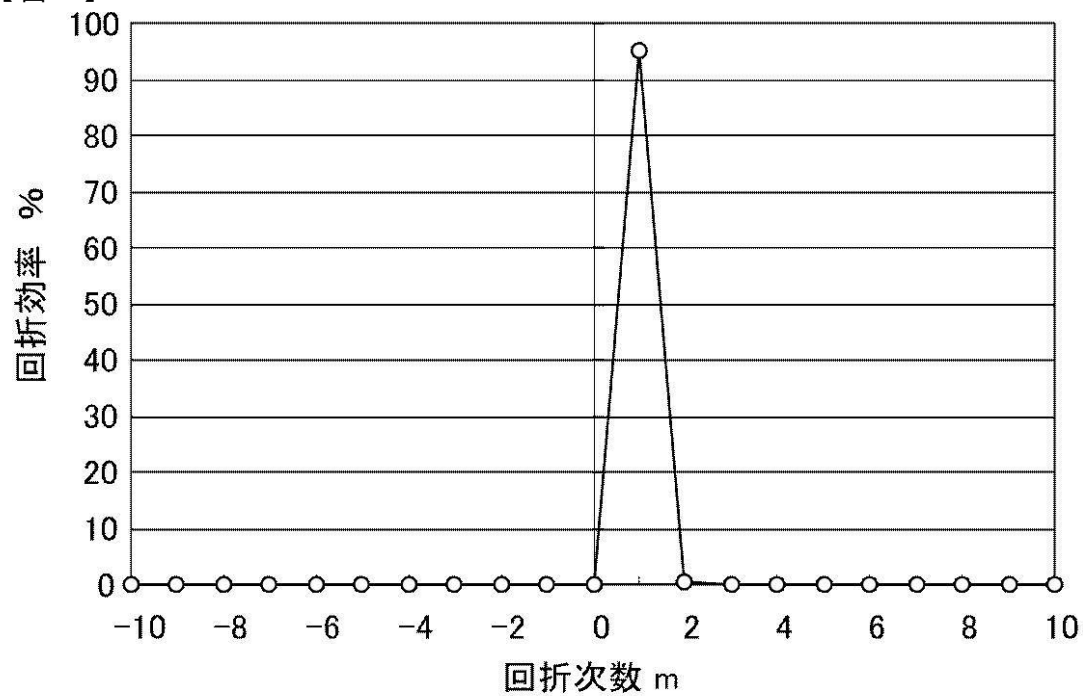


【図4】

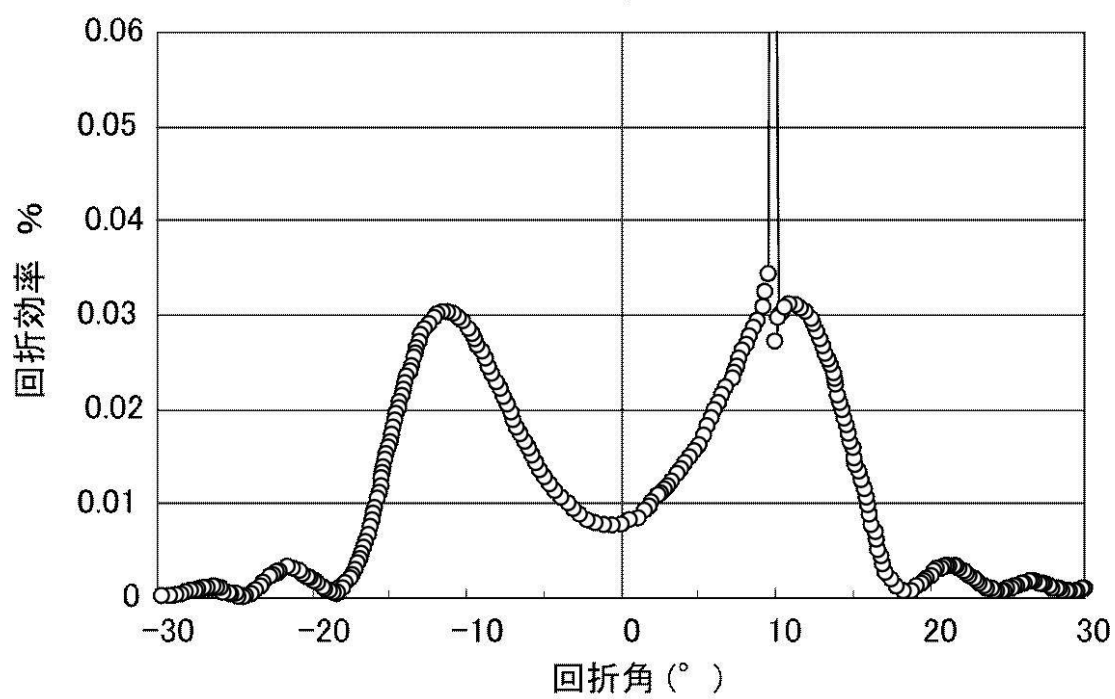




【図7】

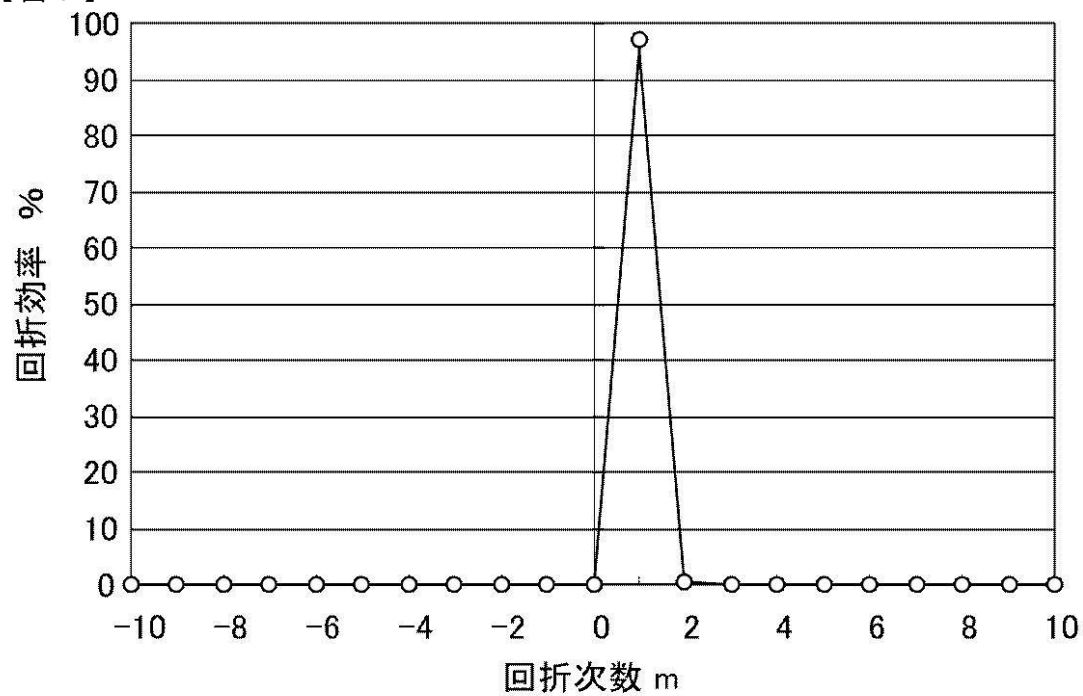


(a)

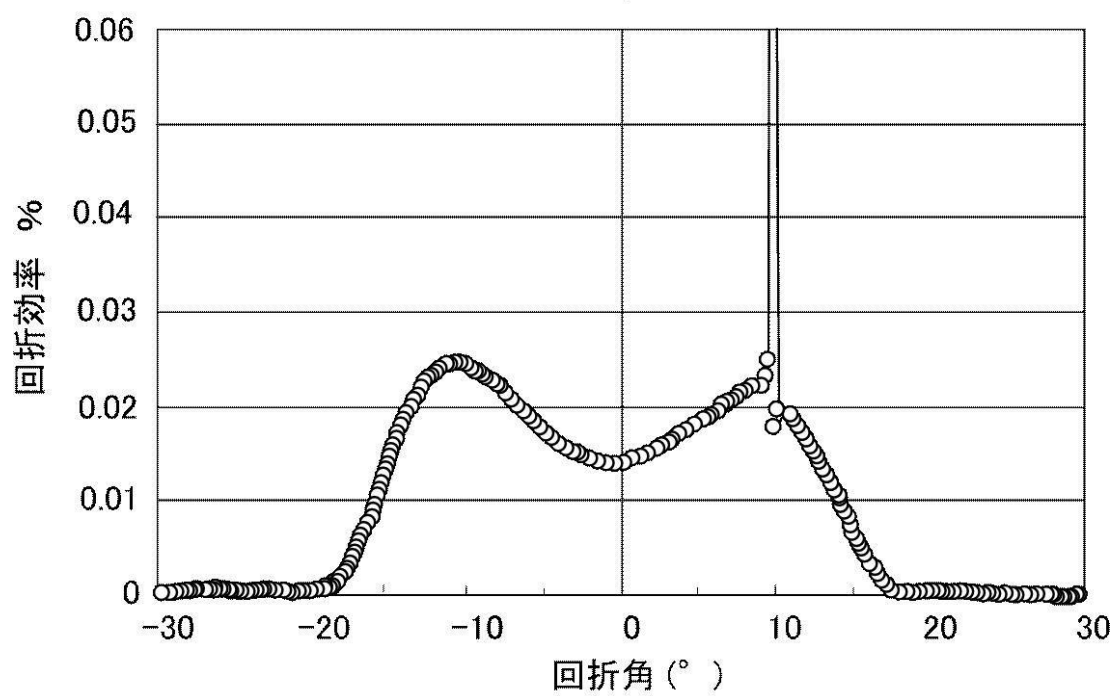


(b)

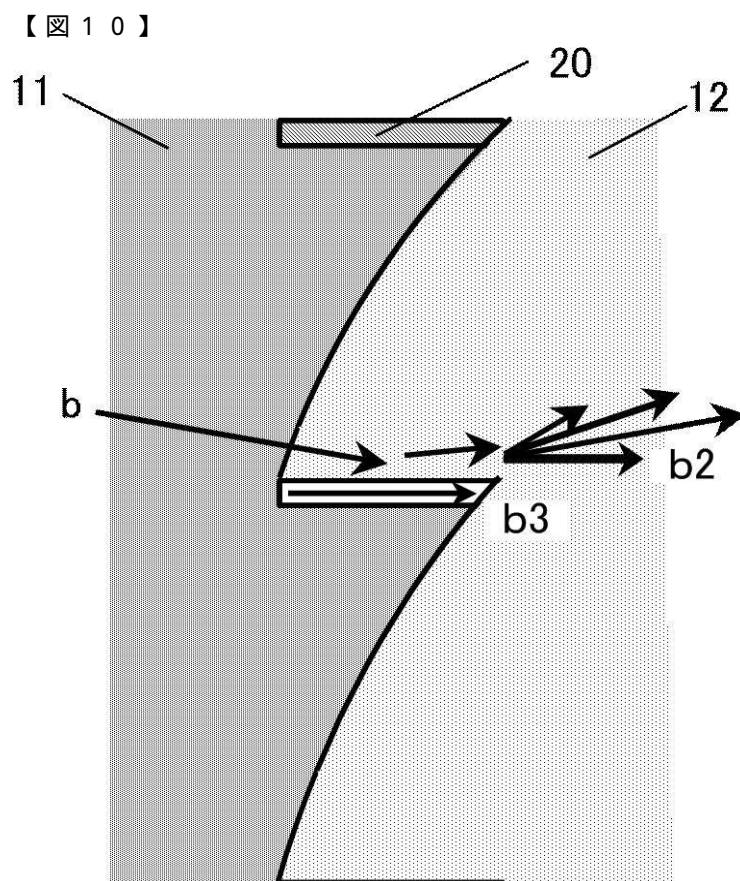
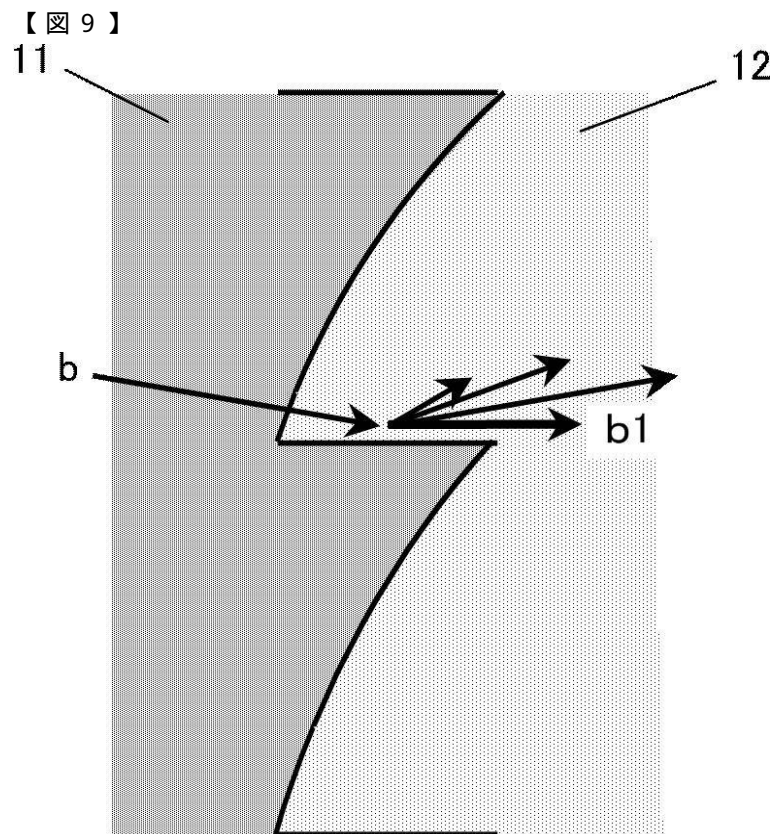
【図 8】



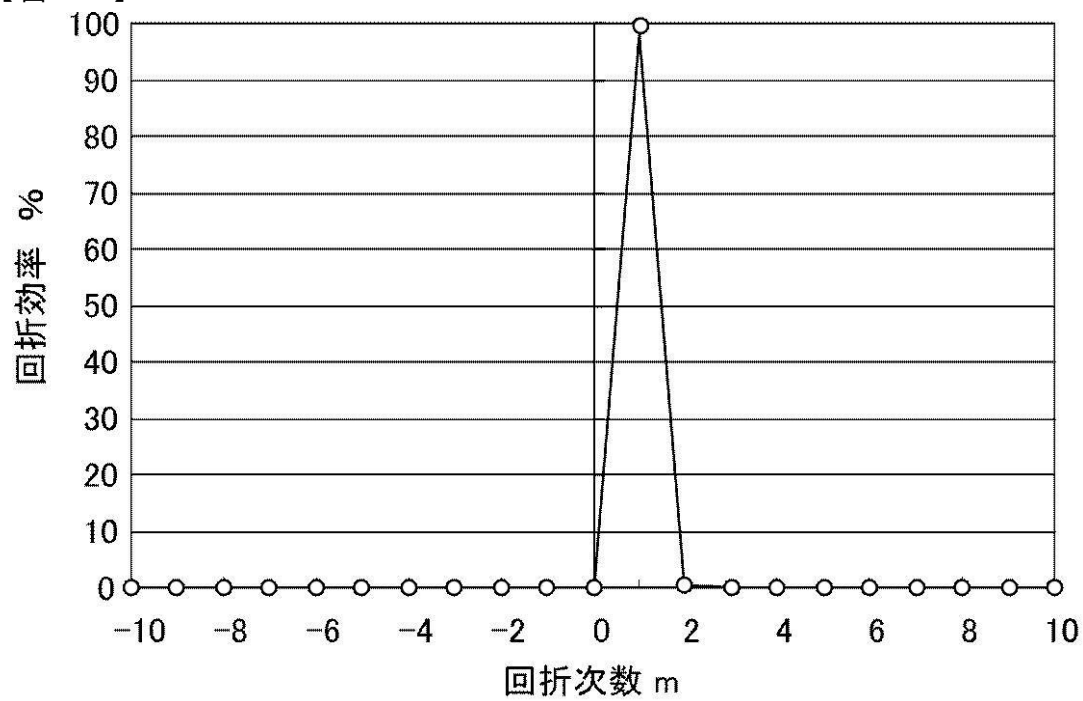
(a)



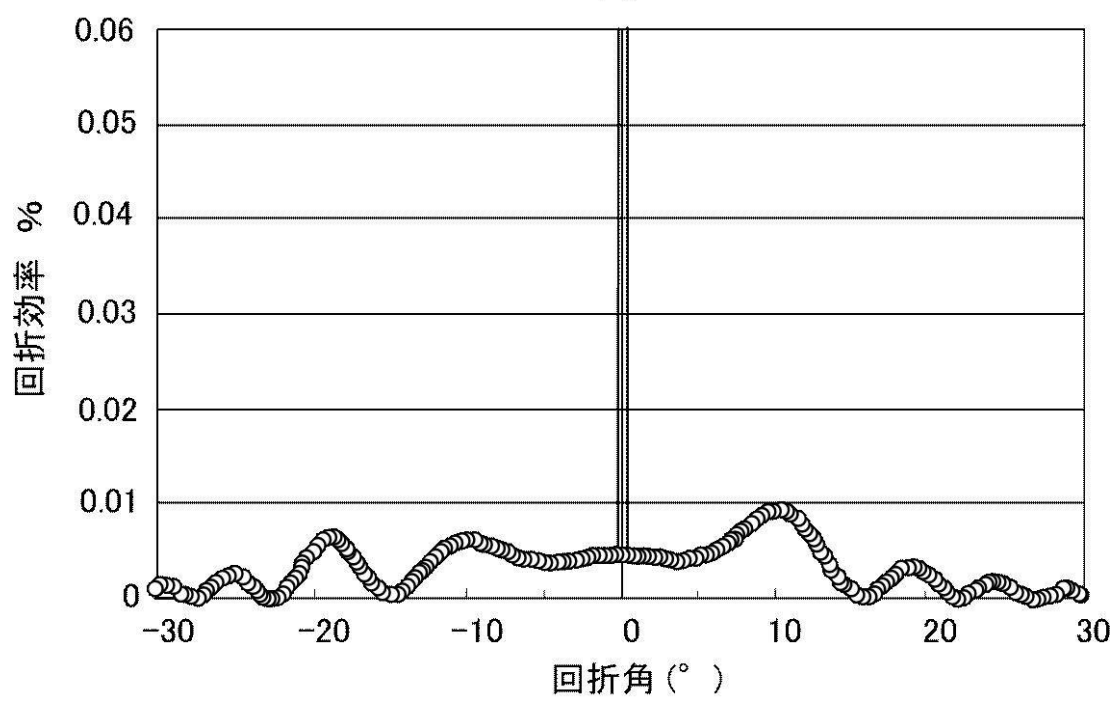
(b)



【図 11】

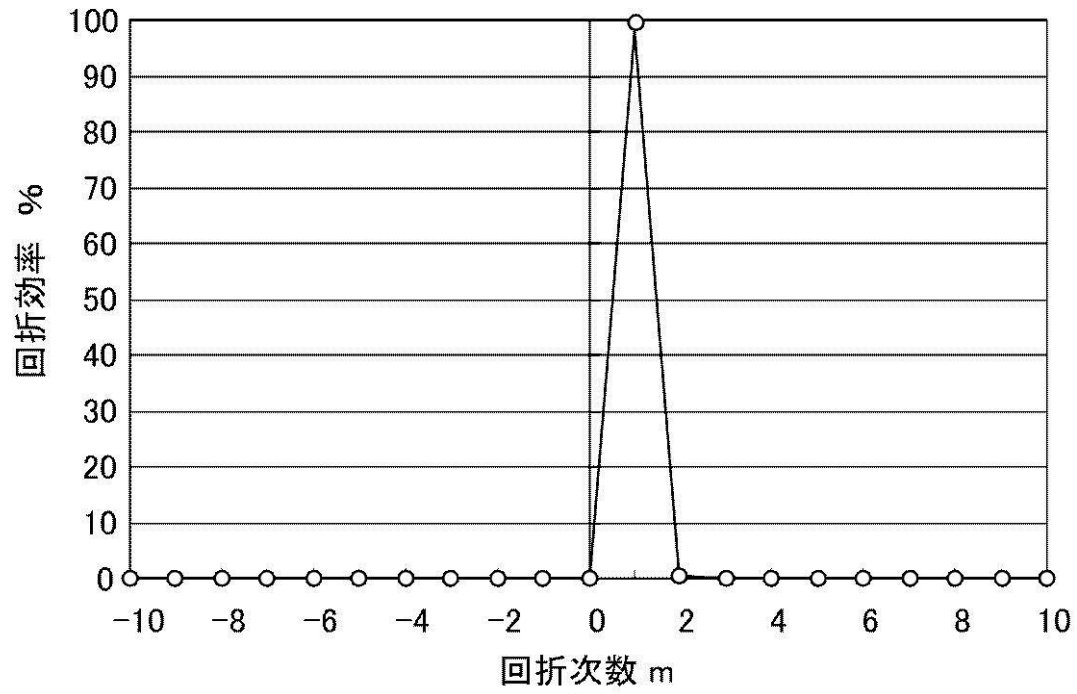


(a)

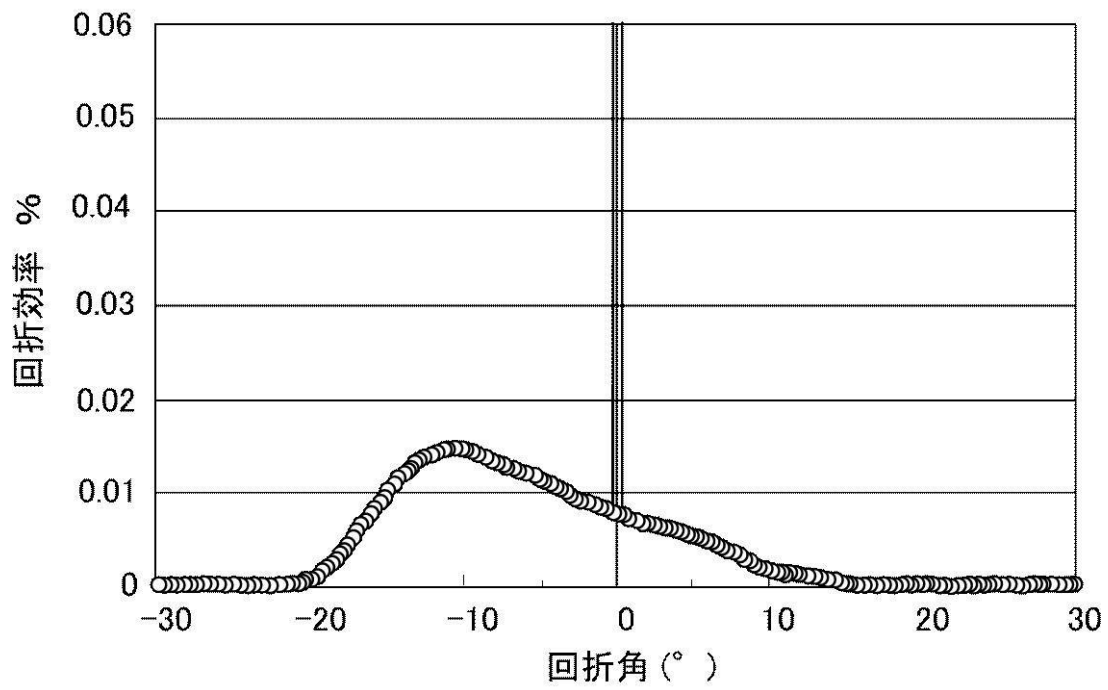


(b)

【図 12】

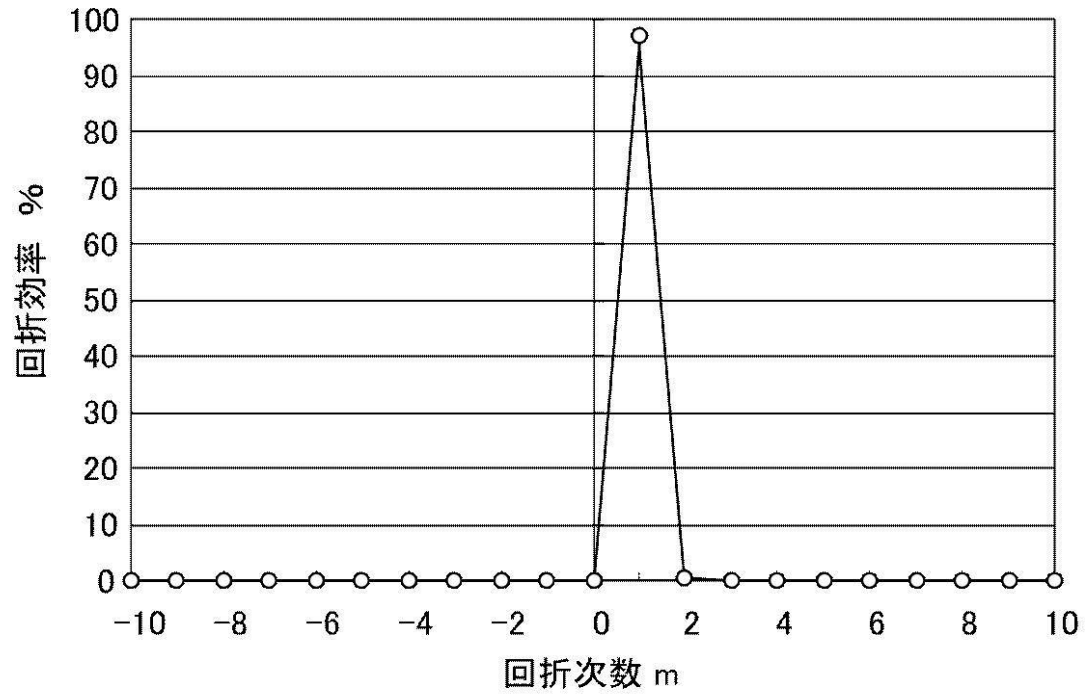


(a)

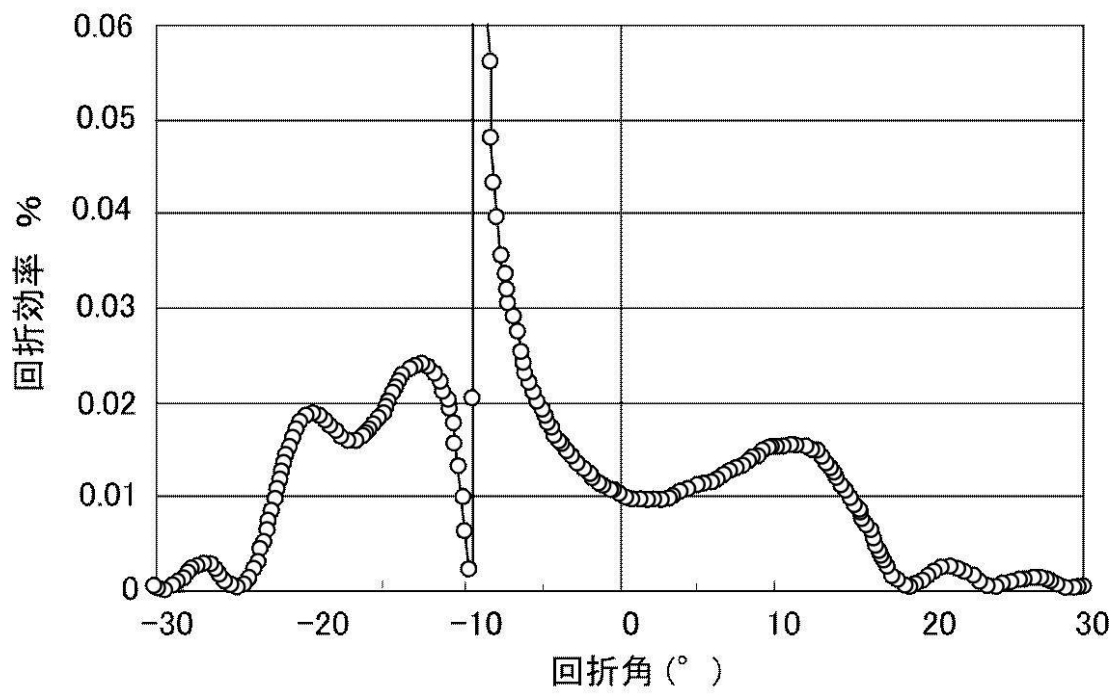


(b)

【図 13】

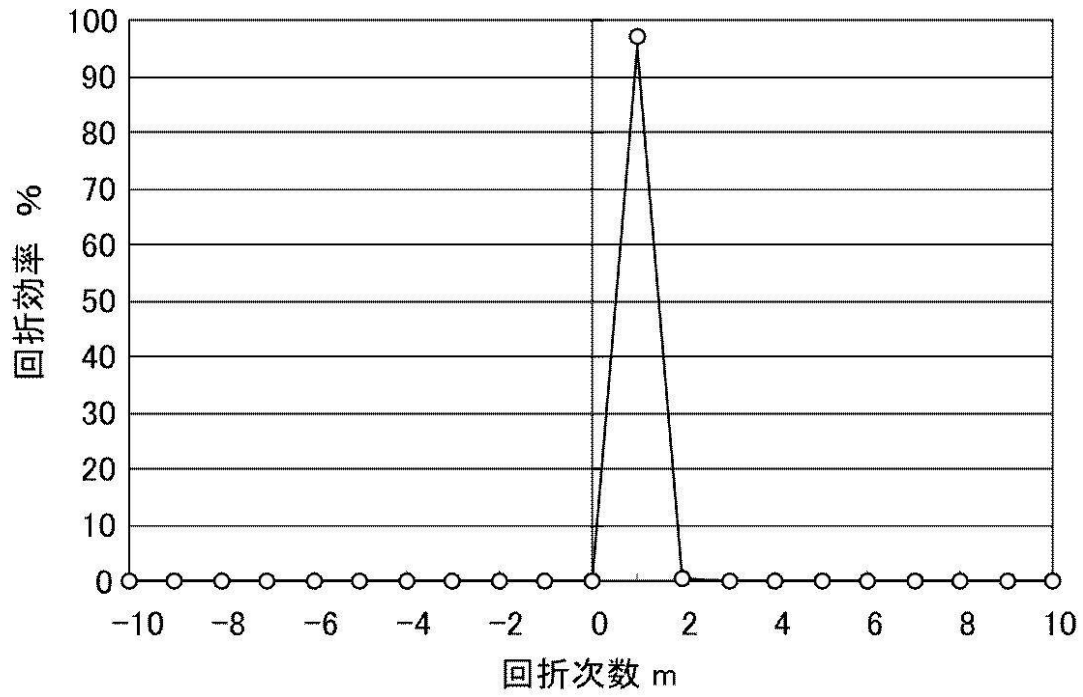


(a)

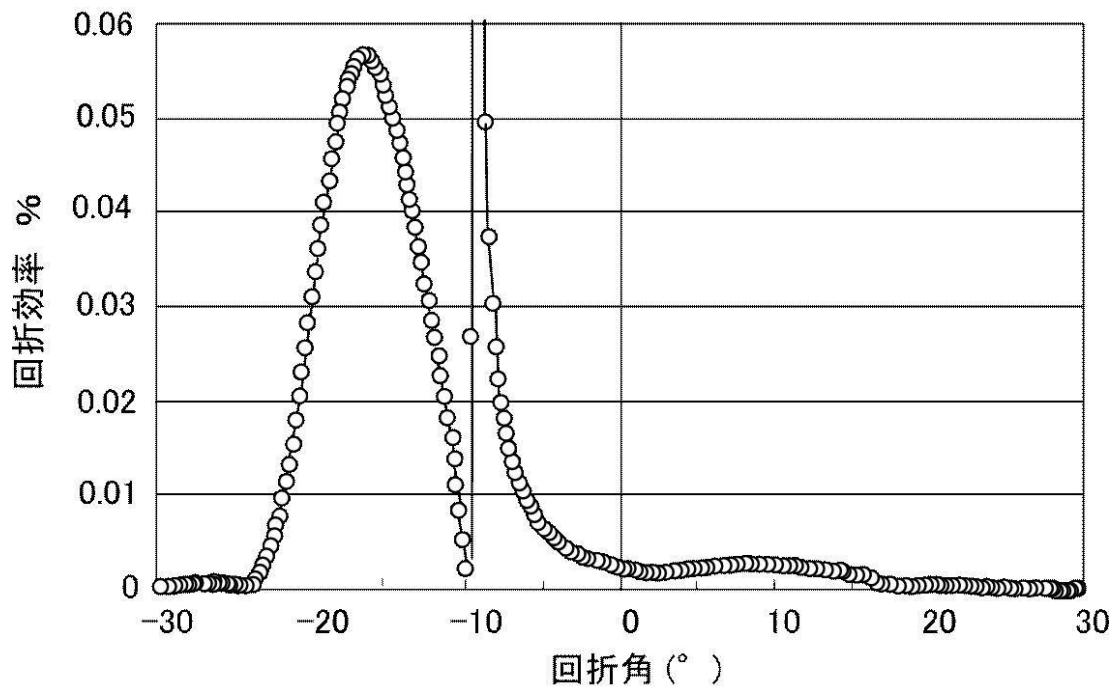


(b)

【図 14】

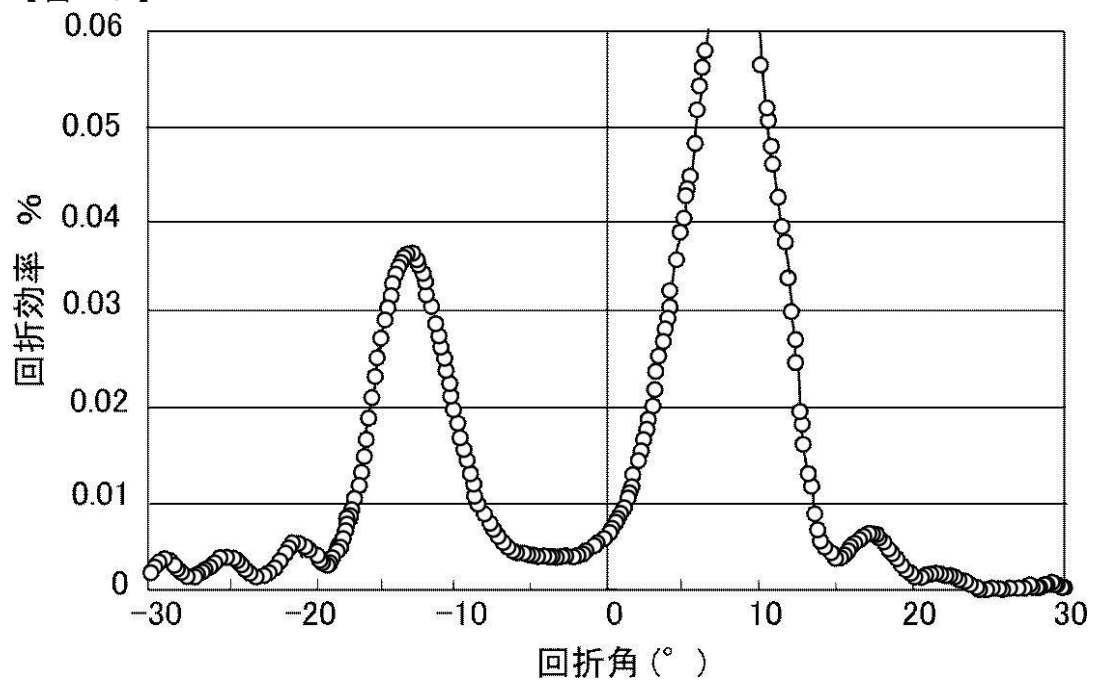


(a)

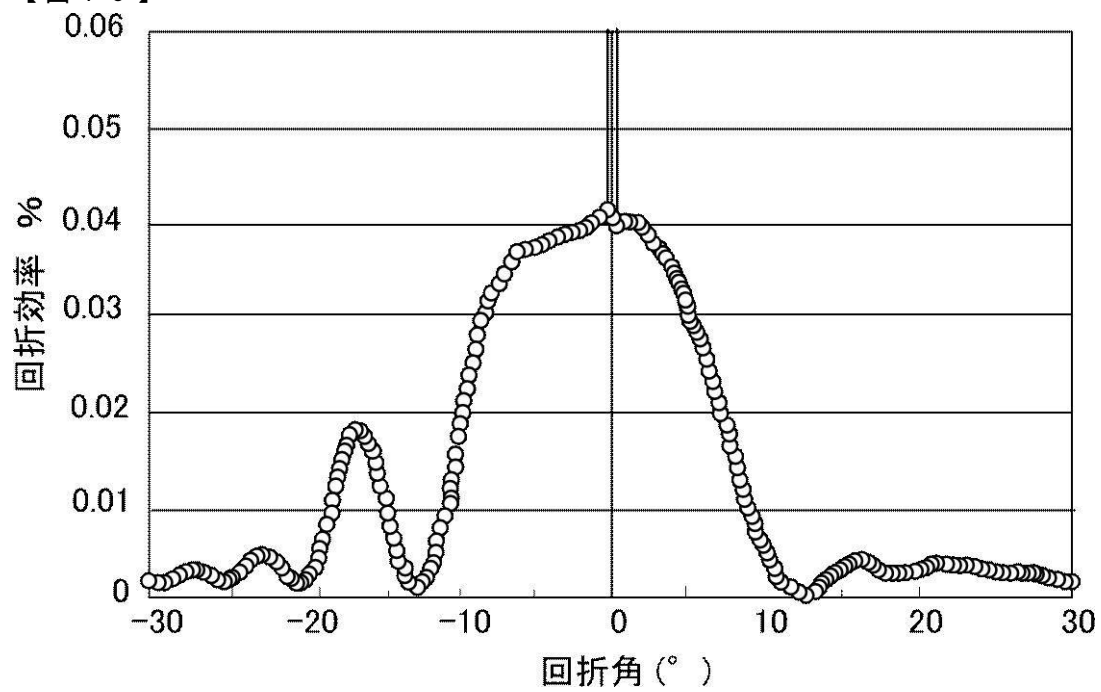


(b)

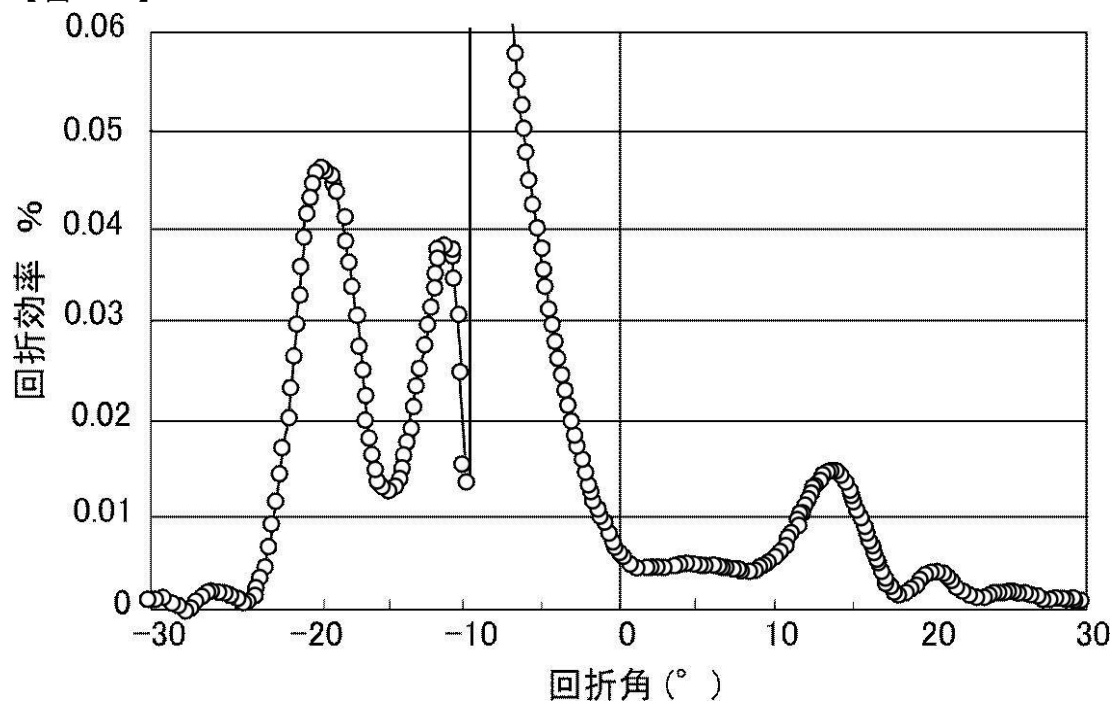
【図 15】



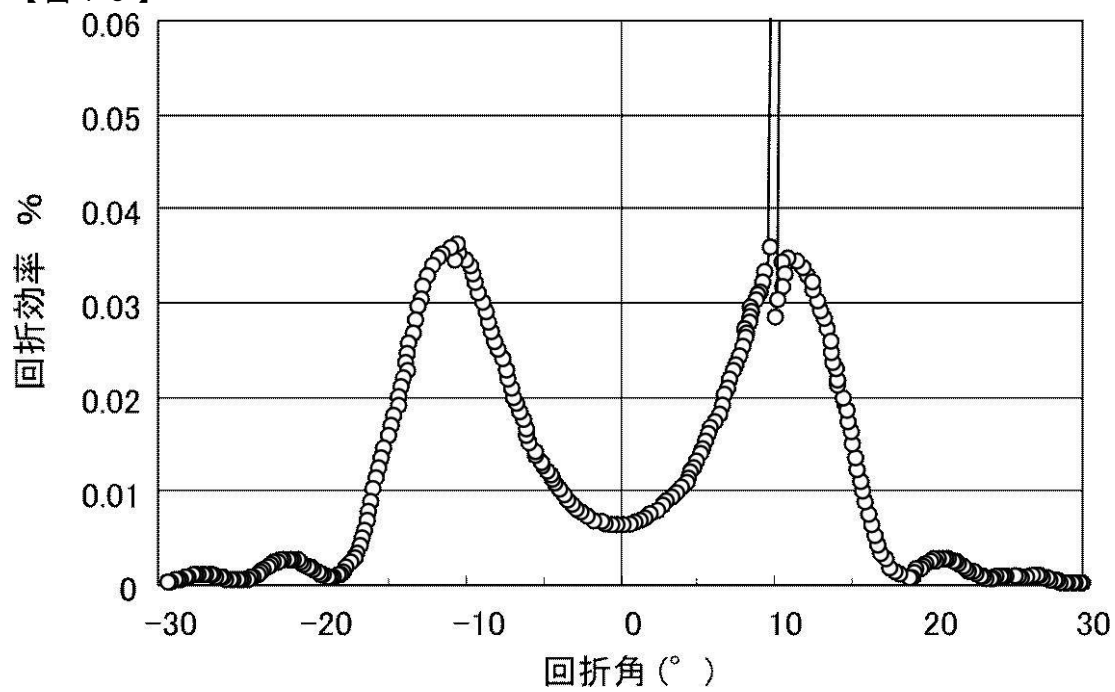
【図 16】

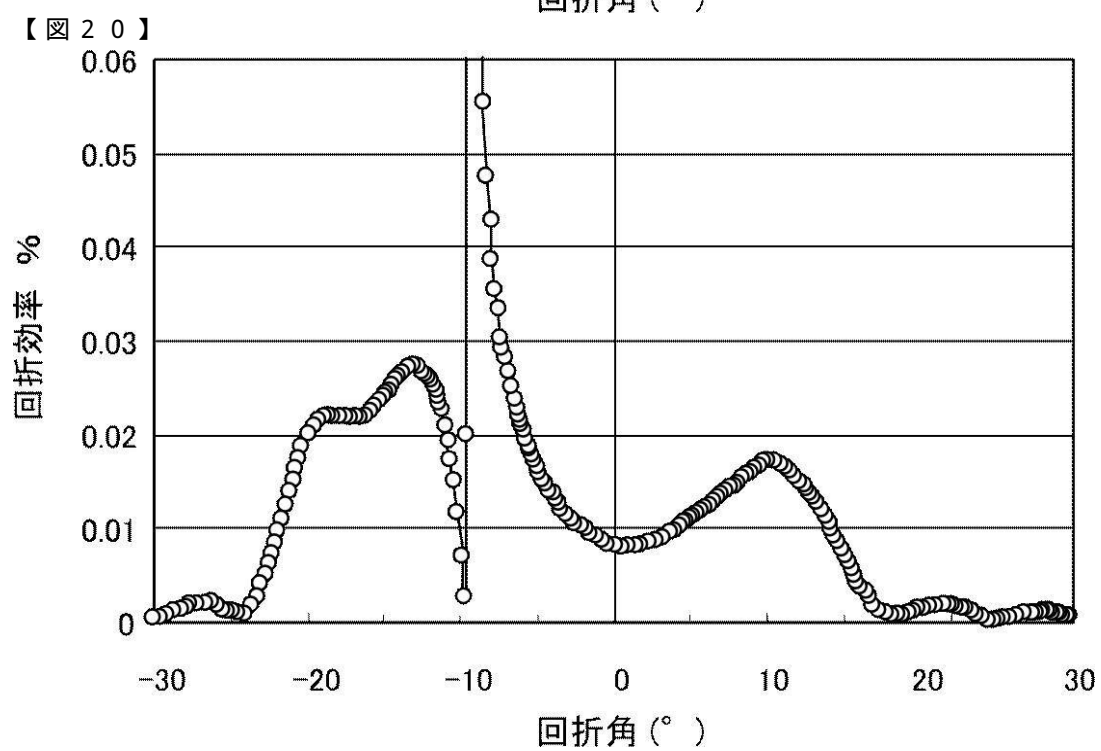
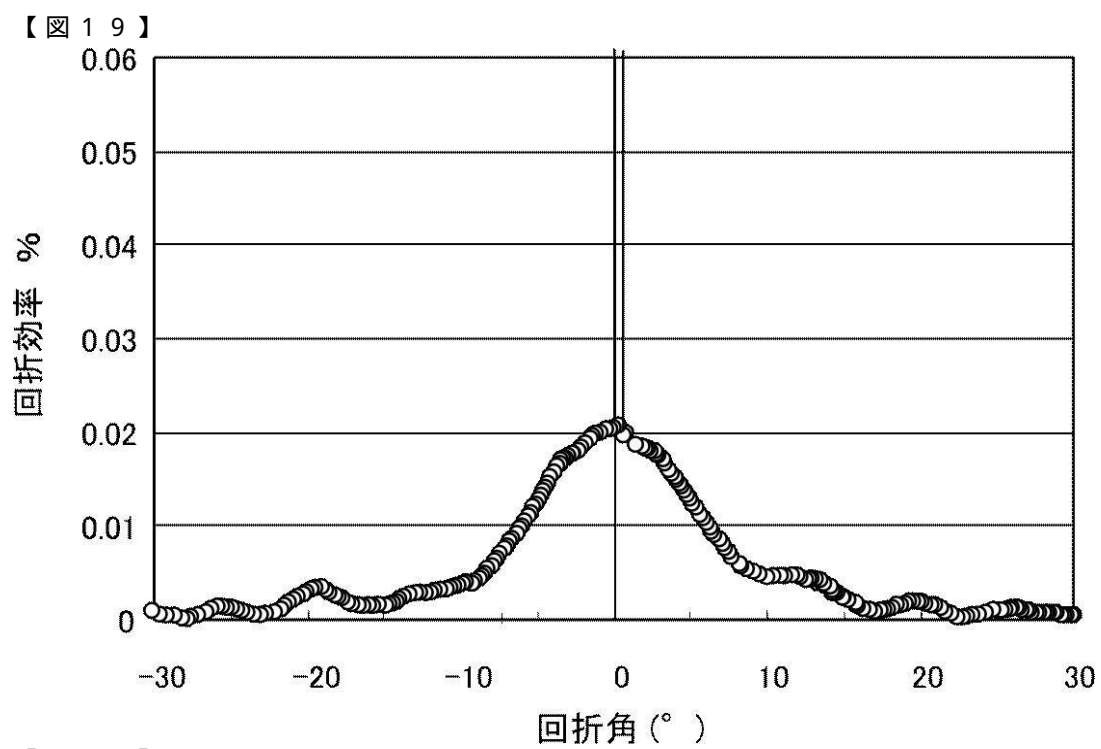


【図 17】

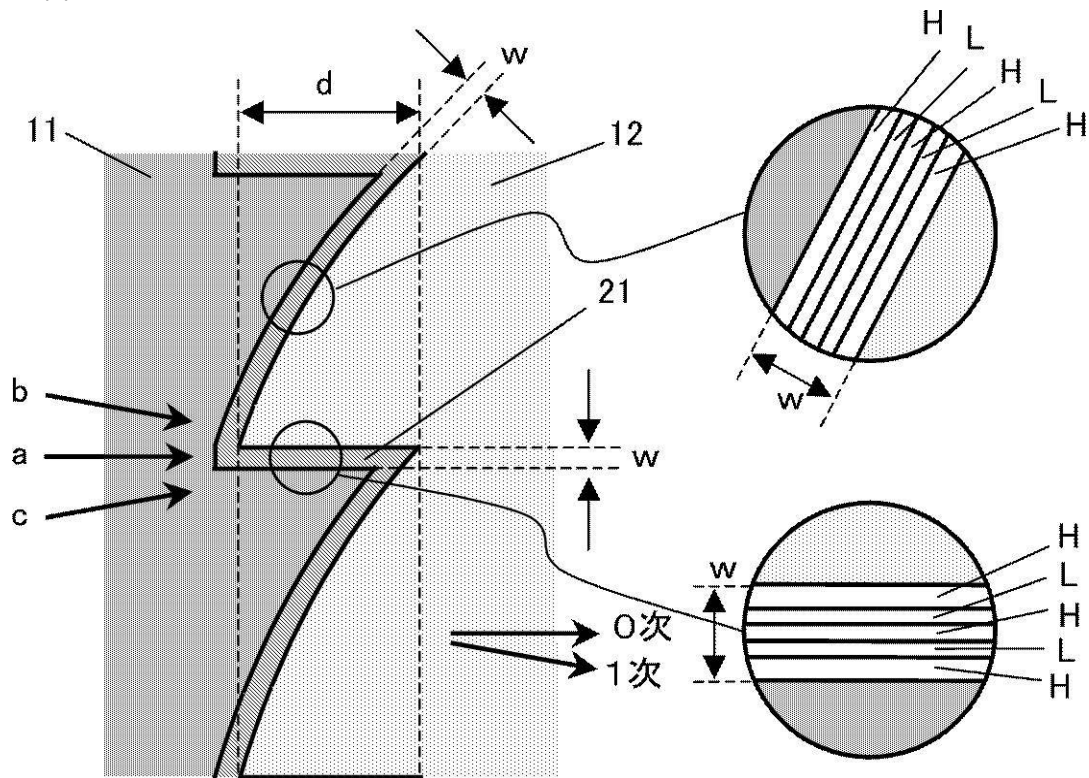


【図 18】

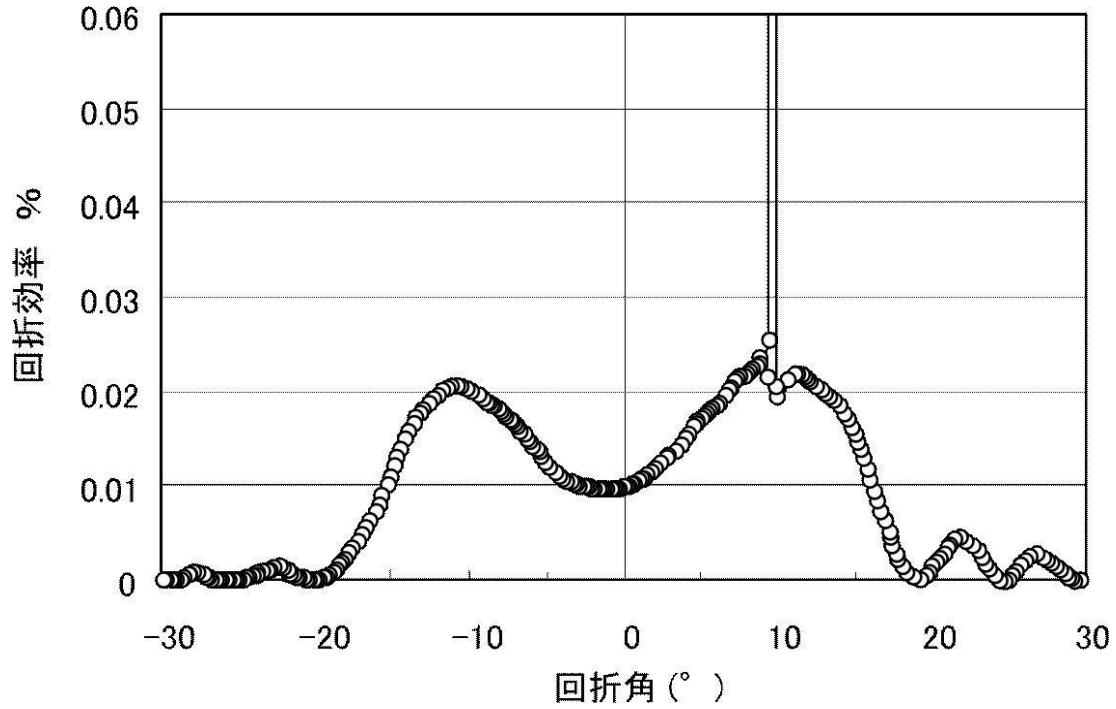


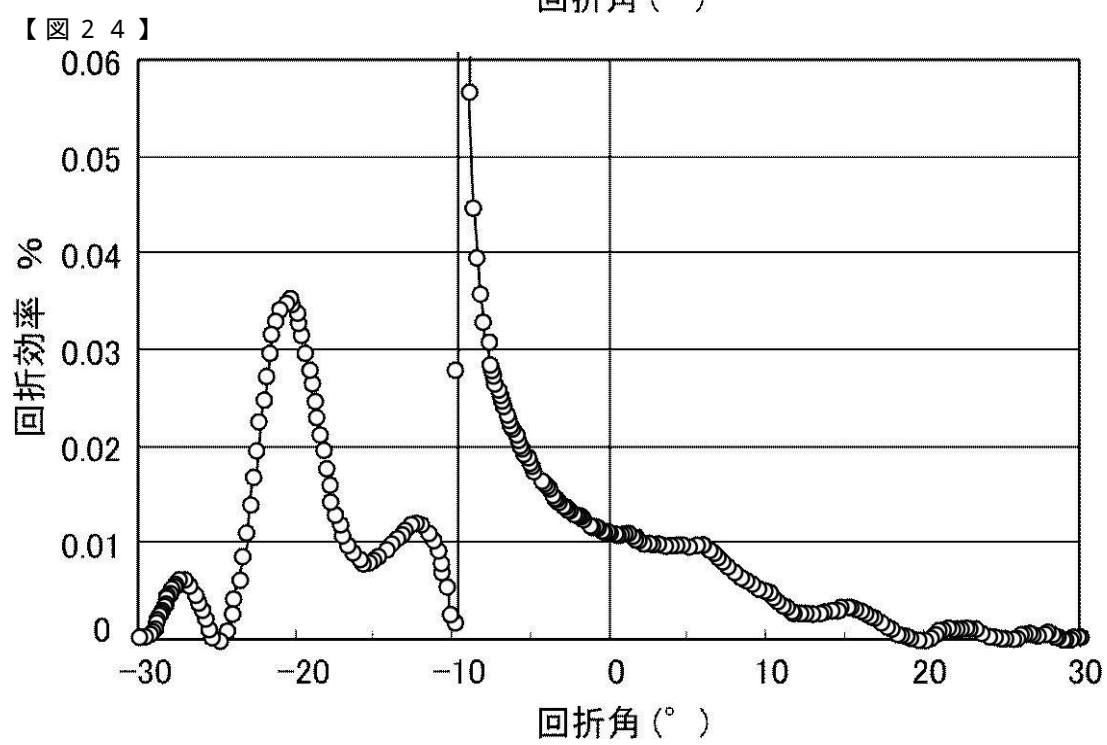
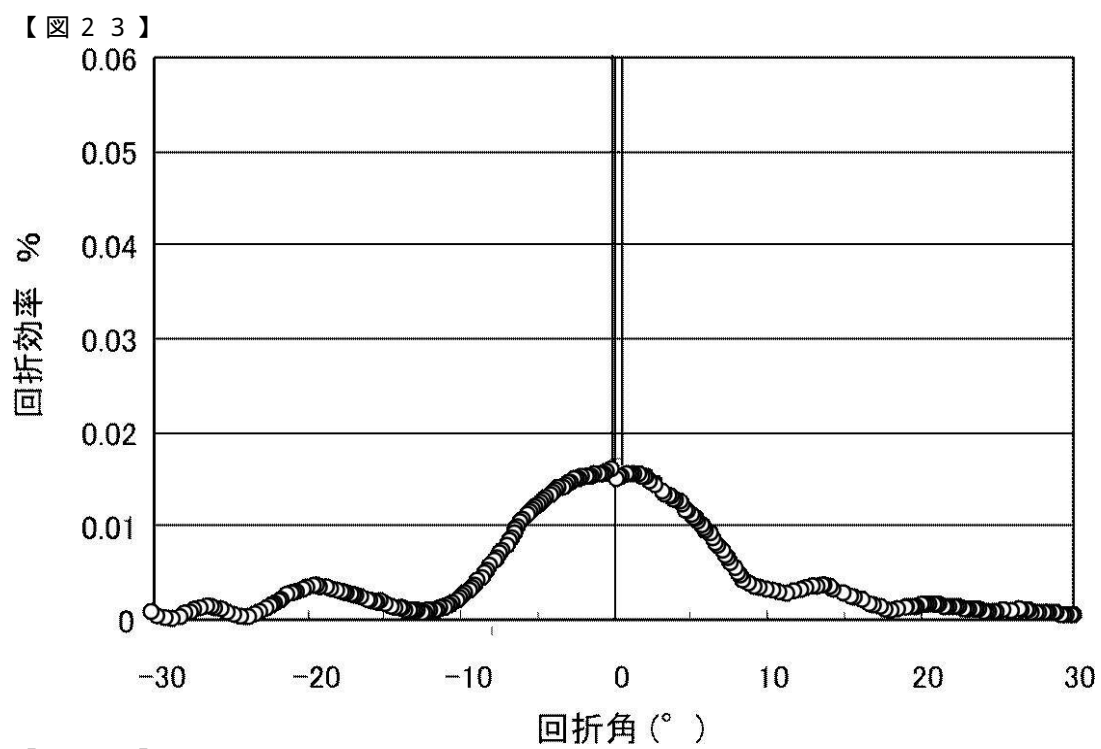


【図 2 1】

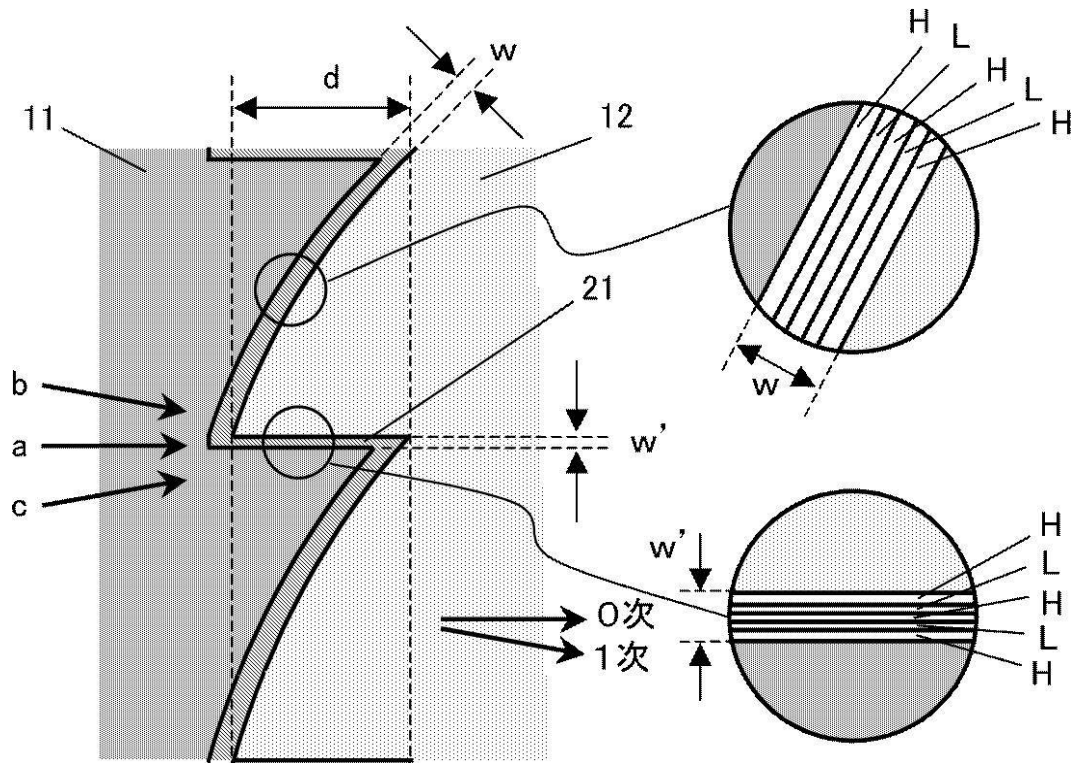


【図 2 2】

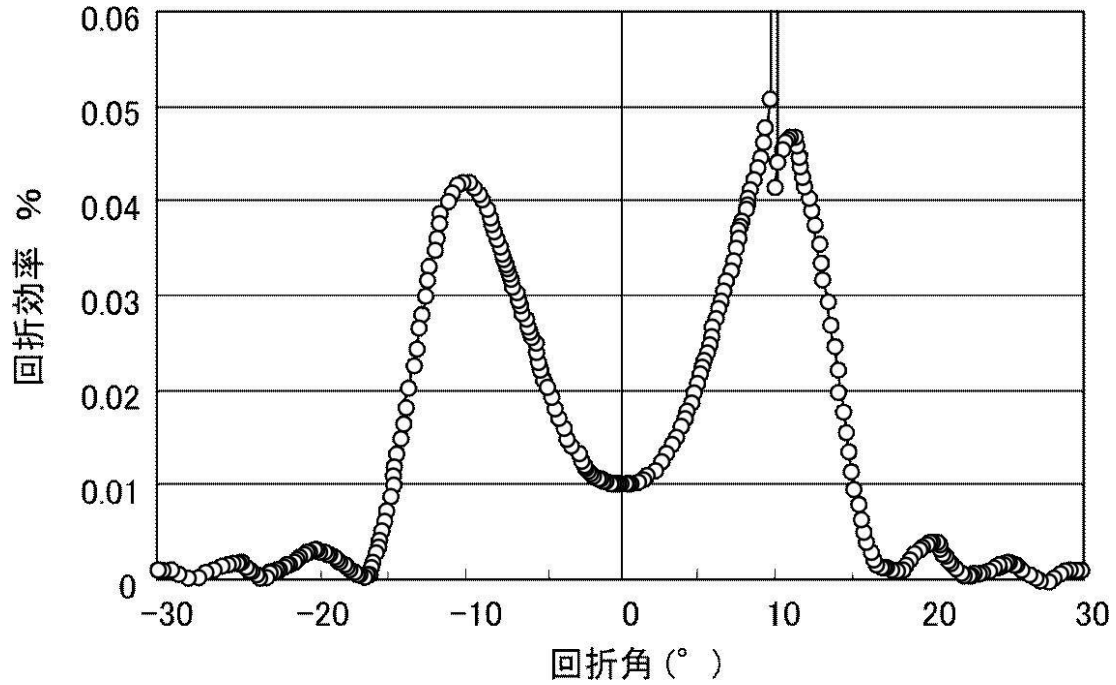




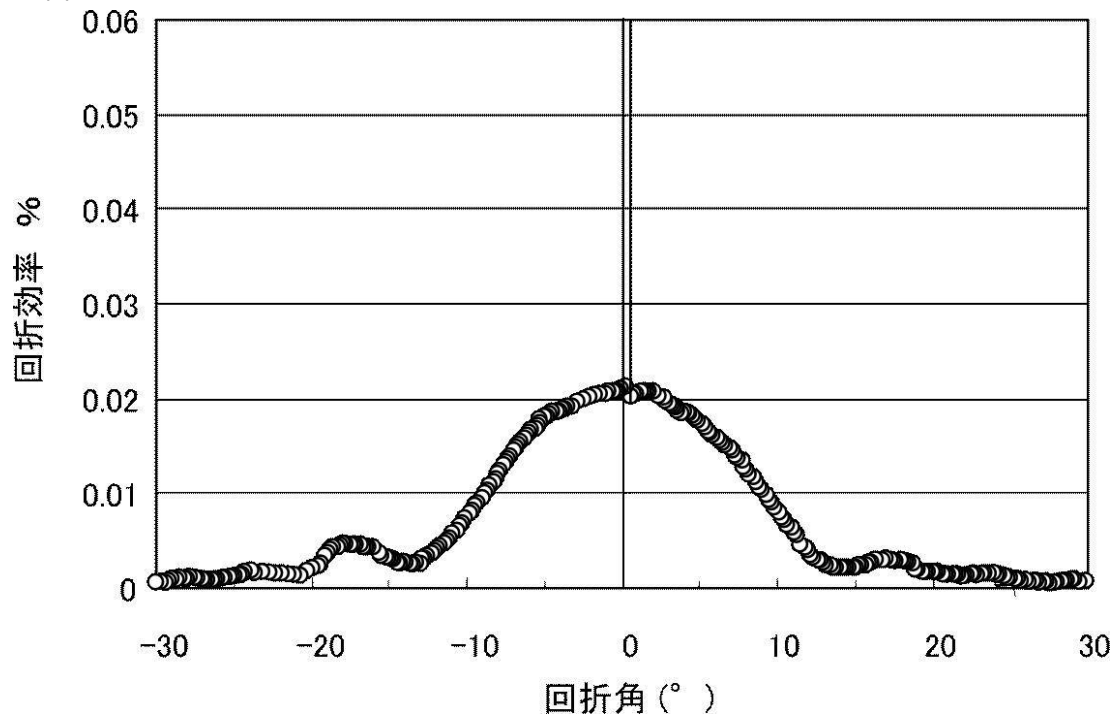
【図 25】



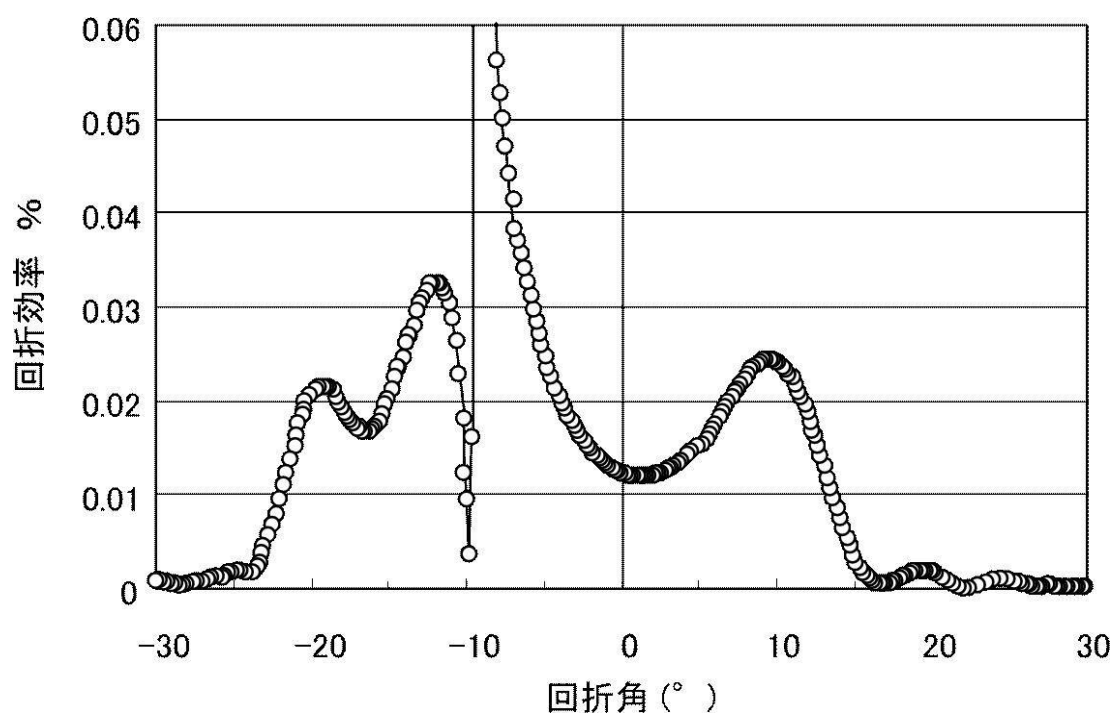
【図 26】



【図 27】



【図 28】



フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第2011/099550(WO,A1)

特開2002-014213(JP,A)

特開2008-241734(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl.,DB名)

G02B 5/18

G02B 13/02