

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2019-66756

(P2019-66756A)

(43) 公開日 平成31年4月25日(2019.4.25)

(51) Int.Cl.
G02B 5/18 (2006.01)F1
G02B 5/18テーマコード(参考)
2H249

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2017-194172 (P2017-194172)
(22) 出願日 平成29年10月4日(2017.10.4)(71) 出願人 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
(74) 代理人 100121614
弁理士 平山 倫也
(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
Fターム(参考) 2H249 AA03 AA50 AA51 AA64

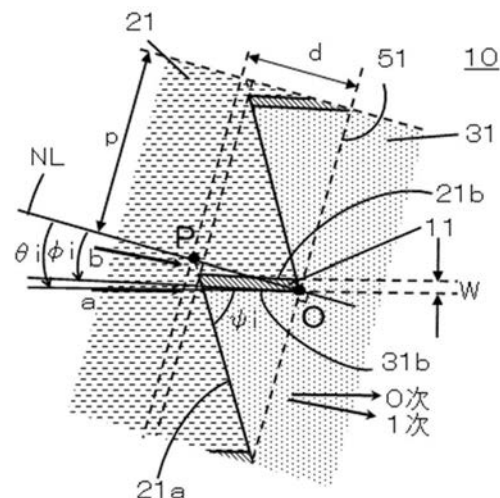
(54) 【発明の名称】 回折光学素子を備えた光学系および光学機器

(57) 【要約】

【課題】結像面の中心部から周辺部の全域にわたって、到達する不要光を低減させることが可能な光学系を提供する。

【解決手段】回折光学素子(1)を有する光学系(100)であって、回折光学素子は、第1の格子面(21a)および第1の格子壁面(21b)をそれぞれ複数備えた第1の回折格子(21)と、第2の格子面(31a)および第2の格子壁面(31b)をそれぞれ複数備えた第2の回折格子(31)と、使用波長帯域の光に対して透明な薄膜(11)とを含み、第1の格子壁面および第2の格子壁面は、薄膜を介して互いに密着しており、第2の格子面と第2の格子壁面との稜線を複数連ねた面の面法線(NL)に対する重心入射光線の入射角と、面法線(NL)に対する第2の格子壁面の角度は、所定の条件を満足する。

【選択図】図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

回折光学素子を有する光学系であって、

前記回折光学素子は、第 1 の格子面および第 1 の格子壁面をそれぞれ複数備えた第 1 の回折格子と、第 2 の格子面および第 2 の格子壁面をそれぞれ複数備えた第 2 の回折格子と、使用波長帯域の光に対して透明な薄膜とを含み、

前記第 1 の格子壁面および前記第 2 の格子壁面は、前記薄膜を介して互いに密着しており、

前記第 2 の格子面と前記第 2 の格子壁面との稜線を複数連ねた面の面法線に対する重心入射光線の入射角を i (deg)、前記面法線に対する前記第 2 の格子壁面の角度を i (deg) とするとき、

$$0.0 < i - i < 7.0$$

なる条件を満足することを特徴とする光学系。

【請求項 2】

前記重心入射光線に対して斜入射角度で入射する光束による不要光の回折効率は、該不要光が像面に到達する回折次数の範囲内で極小になることを特徴とする請求項 1 に記載の光学系。

【請求項 3】

格子ピッチを $100 \mu\text{m}$ に規格化した場合の前記不要光の前記回折効率は、前記不要光が前記像面に到達する前記回折次数の範囲内で 0.010% 以下であることを特徴とする請求項 2 に記載の光学系。

【請求項 4】

前記角度 i は、 0 よりも大きいことを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の光学系。

【請求項 5】

前記第 2 の格子面と前記第 2 の格子壁面とのなす角度 i は、 90 度以上であることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の光学系。

【請求項 6】

前記回折光学素子に光が入射する入射側とは反対の出射側に配置された絞りを更に有することを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の光学系。

【請求項 7】

前記薄膜、前記第 1 の回折格子、および、前記第 2 の回折格子の材料の屈折率をそれぞれ n_1 、 n_2 、 n_3 とするとき、

$$n_1 > n_2 > n_3$$

なる条件を満足することを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の光学系。

【請求項 8】

前記第 1 の回折格子および該第 2 の回折格子の材料のアッペ数をそれぞれ d_2 、 d_3 、設計次数を m 、波長を λ 、格子ピッチを p 、 $i' = \sin^{-1} \{ (n_2 \cos i - m \times \lambda / p) / n_3 \}$ とするとき、

$$d_2 > 3.5$$

$$d_3 < 2.5$$

$0.940 < (n_2 \cos i - n_3 \cos i') \times d / (m \times \lambda) < 1.060$ なる条件を満足することを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の光学系。

【請求項 9】

前記第 1 の回折格子および前記第 2 の回折格子のそれぞれの格子高さは、 $15 \mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか 1 項に記載の光学系。

【請求項 10】

前記回折光学素子の設計次数は、 $+1$ 次または -1 次であることを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項に記載の光学系。

【請求項 11】

10

20

30

40

50

前記薄膜は、前記第 1 の格子壁面と前記第 2 の格子壁面との間から前記第 1 の格子面と前記第 2 の格子面との間まで連続して設けられていることを特徴とする請求項 1 乃至 10 のいずれか 1 項に記載の光学系。

【請求項 12】

請求項 1 乃至 11 のいずれか一項に記載の光学系と、該光学系を保持する保持部材と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、回折光学素子を備えた光学系に関する。

10

【背景技術】

【0002】

光学系に用いられる回折光学素子として、2つの回折格子が密着配置されて構成されたものが知られている。この構成において、各回折格子の材料および格子高さをそれぞれ適切に設定することにより、広い波長帯域で高い回折効率を得ることができる。ところが、このような回折光学素子の格子壁面に光束が入射すると不要光（フレア）が発生してしまう。

【0003】

特許文献 1 には、回折光学素子の格子壁面に薄膜を設けることで、設計入射角度で入射する光束の設計次数の回折効率を向上させつつ、設計入射角度（撮影光入射角度）に対して斜入射角度で入射する光束が結像面に到達する不要光を低減することが開示されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開 2014 - 170109 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、特許文献 1 に開示されている回折光学素子では、結像面の中心部から周辺部の全域にわたって不要光を低減させることは困難である。

30

【0006】

そこで本発明は、結像面の中心部から周辺部の全域にわたって、到達する不要光を低減させることが可能な光学系および光学機器を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の一側面としての光学系は、回折光学素子を有する光学系であって、

前記回折光学素子は、第 1 の格子面および第 1 の格子壁面をそれぞれ複数備えた第 1 の回折格子と、第 2 の格子面および第 2 の格子壁面をそれぞれ複数備えた第 2 の回折格子と、使用波長帯域の光に対して透明な薄膜とを含み、前記第 1 の格子壁面および前記第 2 の格子壁面は、前記薄膜を介して互いに密着しており、前記第 2 の格子面と前記第 2 の格子壁面との稜線を複数連ねた面の面法線に対する重心入射光線の入射角と、前記面法線に対する前記第 2 の格子壁面の角度は、所定の条件を満足する。

40

【0008】

本発明の他の側面としての光学機器は、前記光学系と、該光学系を保持する保持部材とを有する。

【0009】

本発明の他の目的及び特徴は、以下の実施形態において説明される。

【発明の効果】

【0010】

50

本発明によれば、結像面の中心部から周辺部の全域にわたって、到達する不要光を低減させることが可能な光学系および光学機器を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】各実施例における回折光学素子の概略図である。

【図2】各実施例における回折光学素子の拡大断面図である。

【図3】各実施例における回折光学部の拡大断面図である。

【図4】各実施例における回折光学素子を有する光学系の概略図である。

【図5】実施例1における回折光学部の拡大断面図である。

【図6】各実施例における光学系の設計入射角度の説明図である。

10

【図7】実施例1における回折光学素子の設計入射角度の光束に対する+1次回折光の回折効率のグラフである。

【図8】各実施例における光学系の斜入射角度の不要光の影響の説明図である。

【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設計入射角度の光束に対する+1次回折光の回折効率のグラフである。

【図11】実施例2における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。

【図12】実施例3における回折光学素子の設計入射角度の光束に対する+1次回折光の回折効率のグラフである。

20

【図13】実施例3における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。

【図14】各実施例における変形例としての回折光学部の拡大断面図である。

【図15】実施例4における撮像装置の概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下、本発明の実施形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。

【0013】

まず、本実施形態における回折光学素子について説明する。図1は、本実施形態における回折光学素子(DOE)1の概略図(正面図および側面図)である。回折光学素子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(特定次数または設計次数)の回折光の回折効率を高めるように構成されている。回折光学素子1は、透明な一对の基板レンズ2、3、および、基板レンズ2、3の間に配置された回折格子部10を有する。基板レンズ2、3のそれぞれは、平板またはレンズ作用を奏する形状を有する。本実施形態において、基板レンズ2、3のそれぞれの両面は曲面である。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を有し、レンズ作用を有する。

30

【0014】

図2は、図1中の線A-A'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2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は、図2の回折光学部10の拡大断面図である。図2および図3において、入射光束aは、回折光学素子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、設計入射角度(撮影光入射角度)に対する斜入射角度(画面外光入射角度)で下向きに入射する光束である。ここで、回折光学素子1の設計入射角度は、本実施形態の光学系に対して、回折格子部10を通過する全像高、全有効光線の入射角度の分布から求められる平均の入射角を有する光線(重心入射光線)の入射角度であると定義される。

40

【0015】

図2および図3に示されるように、回折格子部10は、回折格子(第1の回折格子)2

50

1、回折格子（第2の回折格子）31、および、薄膜11を有する。回折格子21および回折格子31は、光軸方向（光軸Oに沿った方向）において互いに密着して形成されている。薄膜11は、回折格子21の格子壁面（第1の格子壁面）21bと回折格子31の格子壁面（第2の格子壁面）31bとの間に設けられ、格子壁面21b、31bの両方に接している。すなわち、格子壁面21bおよび格子壁面31bは、薄膜11を介して互いに密着している。また薄膜11は、使用波長帯域（例えば可視波長帯域）の光に対して透明である。本実施形態において、回折格子21は、基板レンズ2と一体または別体のいずれであってもよい。同様に、回折格子31は、基板レンズ3と一体または別体のいずれであってもよい。なお本実施形態において、回折格子21、31は光軸方向において互いに密着しているが、回折格子21、31の間に介在する薄膜11は、後述するように両者の境界面の全域にわたって設けられている場合もある。このため回折格子21、31は、光軸方向に積層されていればよい。

10

【0016】

回折格子21は、格子面（第1の格子面）21aと格子壁面（第1の格子壁面）21bとをそれぞれ複数備えて構成される同心円状のブレード構造を有する。同様に、回折格子31は、格子面（第2の格子面）31aと格子壁面（第2の格子壁面）31bとをそれぞれ複数備えて構成される同心円状のブレード構造を有する。格子面21a、31aおよび格子壁面21b、31bにより格子部が構成される。回折格子21、31はそれぞれ、光軸Oから離れる（外周部に近づく）に従い、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。格子面21a、31aは、互いに隙間なく接しており、回折格子21、31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21、31をそれぞれブレード構造にすることにより、回折光学素子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2および図3中では+1次）の方向に集中して回折する。

20

【0017】

本実施形態の回折光学素子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、スカラー回折理論に従い、回折格子21、31を構成する材料および格子高さが選択される。すなわち、複数の回折格子（回折格子21、31）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が決定される。このように、回折格子21、31の材料およ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を得られる。

30

【0018】

一般に、回折格子の格子高さd（格子部の高さ）は、図3に示されるように、格子周期方向に垂直な方向（格子部の稜線を連ねた面51の面法線NLの方向）の格子面21aの延長線と面法線NLとの交点Pと、面51と面法線NLとの交点Oとの距離で定義される。なお本実施形態において、回折格子の材料や格子高さdは限定されるものではない。

【0019】

本実施形態において、回折格子21、31は互いに異なる材料により形成される。例えば、回折格子31は低屈折率分散材料から構成され、回折格子21は回折格子31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る。本実施形態において、以下の式（1）～（3）を満足することにより、高い回折効率を得ることができる。

40

【0020】

$$d_2 > 3.5 \quad \dots \quad (1)$$

$$d_3 < 2.5 \quad \dots \quad (2)$$

$$0.940 \quad (n_2 \cos \theta_i - n_3 \cos \theta_i') \times d / (m \times \lambda) \quad 1.060 \quad \dots \quad (3)$$

式（1）～（3）において、 n_2 、 n_3 はそれぞれ、波長 λ における回折格子21、31を構成する材料の屈折率であり、 d_2 、 d_3 は回折格子21、31を構成する材料のアップベ数である。dは、回折格子21、31のそれぞれの格子高さ、mは設計次数であ

50

る。 i は、設計入射角度であり、光学系における回折格子部 10 を通過する全像高、全有効光線の入射角度の分布から求められる平均の入射角を有する光線の入射角度に相当する。 i' は、設計射出角度である。設計射出角度 i' は、以下の式 (4) により定義される。式 (4) において、 λ は波長、 p は格子ピッチである。

【0021】

$$i' = \sin^{-1} \{ (n_2 \cos i - m \lambda / p) / n_3 \} \dots (4)$$

なお、本実施形態における可視波長域は、主に、波長 400 nm 以上かつ 700 nm 以下の帯域である。

【0022】

また、可視波長域全域で高い回折効率を得るには、高屈折率低分散材料 (回折格子 21) のアップ数を 35 よりも大きくし、低屈折率高分散材料 (回折格子 31) のアップ数を 25 よりも小さくすることが好ましい。また、部分分散比 g_F が通常の方法よりも小さい値 (リニア異常分散性) を有する材料を用いることが好ましい。このリニア分散特性を得るため、ITO 微粒子を微粒子分散させてベース樹脂材料に混ぜる方法を用いることができる。ITO は、他の無機酸化物と異なり、電子遷移による屈折率の変化に加え、錫によるドーピングや酸素の空孔によりフリーキャリアが発生し屈折率が変化する。この電子遷移とフリーキャリアの影響により非常に強いリニア分散特性を有する。従って、ITO と同様にフリーキャリアの影響がある SnO_2 および ATO (アンチモンをドーピングした SnO_2) などを使用することができる。

【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。格子高さ d は、15 μm 以下に設定されることが好ましい。これにより、斜入射光が入射した際の回折効率の低下を小さくすることができる。

【0024】

本実施形態において、回折格子 31 の格子面 31a と格子壁面 31b との交線 (稜線) を複数連ねた面 51 の面法線を NL とする。このとき、面法線 NL に対する格子壁面 31b の角度 i (deg) と面法線 NL に対する設計入射角度 i (deg) との関係は、以下の式 (5) を満足する。

【0025】

$$0.0 < i - i' < 7.0 \dots (5)$$

式 (5) 式の下限を満足することにより、結像面 (撮像素子) の中心部から周辺部の全域にわたって、到達する不要光を低減させることができる。また、式 (5) の下限においてイコール (=) を含まないことは、格子壁面 31b の角度 i が設計入射角度 i よりも小さく、格子壁面 31b によるケラレが発生するため、設計入射角度 i における回折効率が低減することを意味する。一方、式 (5) の上限を満足しない場合、設計入射角度における回折効率の低下が画像に影響するため、好ましくない。式 (5) を満足することにより、設計入射角度 i における回折効率の低減に影響ない程度に抑制し、結像面の中心部から周辺部の全域にわたって、到達する不要光を低減させることができる。

【0026】

好ましくは、式 (5) は、以下の式 (5a) を満足する。

【0027】

$$0.0 < i - i' < 5.0 \dots (5a)$$

式 (5a) を満足することにより、設計入射角度 i の光の回折効率の低減量をより小さくすることができる。なお、格子面 21a と格子壁面 21b との関係についても、式 (5) を満足することが好ましい。

【0028】

10

20

30

40

50

本実施形態において、斜入射角度で入射する光束による不要光の回折効率が、不要光が像面に到達する回折次数の範囲内で極小にすることにより、結像面の中心部から周辺部の全域に到達する不要光を低減することができる。これにより、格子ピッチを $100\mu\text{m}$ に規格化した場合の不要光の回折効率は、不要光が像面に到達する回折次数の範囲内で 0.010% 以下になる。

【0029】

なお本実施形態において、結像面に到達する次数は光学系に応じて異なるため、格子壁面の角度 i を適宜変更してもよい。また、光学系に応じて基板レンズの曲率半径や格子ピッチは異なるため、格子壁面の角度 i を輪帯ごとに変更してもよい。また、格子壁面の角度 i は 0 よりも大きいことが好ましい。また、図3に示される格子面31aと格子壁面31bとがなす角度 i は、 90 度以上であることが好ましい。同様に、格子面21aと格子壁面21bとがなす角度も 90 度以上であることが好ましい。これらの条件を満足することにより、型の加工、型による格子成形等による製造が容易になる。なお、図3はデフォルメされているため、角度 i は 90 度よりも小さくなっているが、例えば、格子ピッチが $100\mu\text{m}$ 、格子高さが $10.72\mu\text{m}$ 、格子壁面の角度 i が 13 度の場合、角度 i は 96.9 度になる。

【0030】

薄膜11は、格子壁面に沿って略均一な厚さを有し、回折格子21、31の境界面の少なくとも一部に配置されている。本実施形態において、薄膜11は、格子壁面21b、31bに設けられている。薄膜11を設けることにより、格子壁面付近に入射する光束が薄膜11の内部に閉じ込められ、光導波路となる。

【0031】

本実施形態の回折光学素子1において、使用波長帯域の任意の波長 λ に関し、薄膜11、回折格子21、および、回折格子31の材料の屈折率をそれぞれ n_1 、 n_2 、 n_3 とする。このとき、以下の式(6)を満たすことにより、本実施形態の効果を得ることができる。

【0032】

$$n_1 > n_2 > n_3 \quad \dots \quad (6)$$

本実施形態において、薄膜11の製造方法は特に限定されるものではない。例えば、回折格子31を製造し、その後、薄膜11を選択的に形成することができる。具体的には、薄膜11を構成する材料を真空蒸着などの物理蒸着手法やスピンコート法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でパターンニングしてエッチング手法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で形成する方法などを用いることができる。また、薄膜11は、後述するように両者の境界面の全域にわたって設けられてもよい。この場合、薄膜11を格子壁面部のみに選択的に形成する必要はない。その後、回折格子21を形成することにより、回折光学素子1を製造することができる。また、回折光学素子1の輪帯ごとに薄膜11の幅または形状を変更(制御)してもよい。

【0033】

図14は、本実施形態における変形例としての回折光学部10aの拡大断面図である。図14に示されるように、薄膜11を格子壁面のみではなく、回折格子21、31の境界面の全域に設けてもよい。すなわち薄膜11は、格子壁面21bと格子壁面31bとの間から格子面21aと格子面31aとの間まで連続して設けられている。この場合、格子壁面部は前述の関係を満たし、かつ格子面部は反射防止機能を有していればよい。また、格子面の薄膜の屈折率、膜幅が格子壁面と異なってもよい。境界面の全域に薄膜を形成するため、容易かつ安価に回折光学素子を製造することができる。例えば、回折格子21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などの物理蒸着手法やスピンコート法により形成し、その後、回折格子31を形成すればよい。ただし本実施形態は、これに限定されるものではない。更に、境界面の全域に薄膜を設けることにより、回折格子21、31の互いの密着性を向上させることもできる。格子面と格子壁面の屈折率、膜厚

が異なってもよい。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ができる。

【0034】

図4は、本実施形態における回折光学素子1を有する光学系100の概略図である。図4の光学系100は、カメラなどの撮像装置に適用可能な、回折光学素子1を備えた望遠タイプの撮影光学系であり、第2面に回折面が設けられている。図4の光学系100は、その内部に絞り40および回折光学素子1を有する。絞り40は、回折光学素子1に光が入射する入射側とは反対の出射側、すなわち回折光学素子1よりも後側（像面側）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などの光電変換素子（撮像素子）である。

10

【0035】

このような光学系100に本実施形態の回折光学素子1を適用すれば、撮影光の不要光が低減され、かつ画面外から光束が入射した場合の、結像面に到達する不要光が低減されているため、フレアが少ない撮影レンズが得られる。図4では、前玉のレンズの貼り合せ面に回折光学素子1を設けているが、本実施形態はこれに限定されるものではない。回折光学素子1は、光学系の内部に配置してもよく、または、レンズ表面に設けてもよい。また、撮影レンズ内に複数の回折光学素子1を設けてもよい。なお、回折光学素子1が適用可能な光学系は、図4に示される撮影光学系に限定されるものではない。本実施形態の光学系は、ビデオカメラの撮影レンズ、イメージスキャナや複写機のリーダーレンズなどの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、または、光学式ファインダにも適用可能である。また、回折光学素子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るものではなく、広く光学機器に適用可能である。以下、本実施形態の回折光学素子1の具体例について、実施例1～3において説明する。

20

【実施例1】

【0036】

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。本実施例において、本実施例において、回折格子21は、ITO微粒子を混合させたアクリル系紫外線硬化樹脂（ $n_d = 1.5660$ 、 $d = 19.0$ 、 $g_F = 0.418$ 、 $n_{550} = 1.5724$ ）から構成されている。回折格子31は、 ZrO_2 微粒子を混合させたアクリル系紫外線硬化樹脂（ $n_d = 1.6199$ 、 $d = 43.2$ 、 $g_F = 0.564$ 、 $n_{550} = 1.6230$ ）から構成されている。なお、回折格子21、31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、 g_F 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。図3において、入射光束aは、面法線に対して設計入射角度 i である15度で入射する光束であり、格子高さdは10.72 μm 、設計次数は+1次である。薄膜11は、 Al_2O_3 の薄膜から構成され、格子壁面21b、31bに垂直な方向の厚さまたは幅Wは350nmである。格子壁面21b、31bの面法線に対する角度 i は13度である。

30

【0037】

図5は、本実施例における回折光学部の拡大断面図である。図6は、本実施例において、図4の光学系に関する設計入射角度（撮影光入射角度）の不要光の影響の説明図である。図5および図6において、光軸Oに対して入射する撮影光束A、A'は、基板レンズ2を通過した後、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'格子にそれぞれ入射する。撮影光束A、A'のm格子、m'格子に対しての入射角度は、重心入射光線（設計入射光線）方向である。図6において、撮影光束Aのm格子により射出する+1次回折光はAm1、撮影光束A'のm'格子により射出する+1次回折光はA'm1として示されている。設計次数である+1次回折光Am1、A'm1は結像面41に結像される。

40

【0038】

図7は、図2に示される設計入射角度（撮影光入射角度）である入射光束aと図5および図6の入射光束Aを想定して、設計入射角度 i が15度、格子ピッチpが100 μm

50

におけるRCWA計算を行った結果の+1次回折光の回折効率を示すグラフである。ここで、RCWA計算とは、厳密結合波解析(RCWA: Rigorous Coupled Wave Analysis)を行うための計算である。設計入射角度 i は、面法線に対して図3の下向きを正の方向、射出角度である回折角は面法線に対して下向きを正の方向としている。薄膜11を有しない回折光学素子1を用いた場合、および、薄膜11を有しているが格子壁面の面法線に対する角度 θ_1 が設計入射角度光線と同じ15度の場合について、図7に相当する比較例としてのグラフである。本実施例は格子壁面の角度が入射光線の角度より小さくなっている分回折効率が低下しているが、薄膜を設けていない場合より高いため、回折効率の低下による影響は少ない。

【0039】

図8は、斜入射角度(画面外光入射角度)の不要光の影響の説明図である。図5において、画面外光束B、B'のm格子、m'格子に対しての入射角度はそれぞれ、重心光線方向に対して角度 i 、 i' である。図9は、図5および図8に示される入射光束Bを想定し、画面外光入射角度 i が+10度、図3に示される画面外光入射光束bとして面法線に対する入射角度が+5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。入射角度は、図3の下向きを正の方向としている。図9は、薄膜11を有しない回折光学素子を使用した場合、および薄膜11を有するが格子壁面の面法線に対する角度 i が入射角度 i と同じ15度の場合をそれぞれ比較して示すグラフである。図9は、回折効率の低い部分を拡大して表示している。図9において、横軸は次数(m)、縦軸は回折効率(%)をそれぞれ示している。

【0040】

図9において、次数+1付近の数値が表示範囲を超えているのは、設計次数である+1次回折光付近での回折効率であり、回折効率の数値が高いためである。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、+1次回折光は結像面に到達しないため、その影響は小さい。図9より、不要光は特定次数(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。この不要光の伝播方向は格子壁面に入射する画面外入射角度である+5度光束の成分は、全反射し、伝播する射出方向と略等しい。

【0041】

画面外光+10度(面法線に対して+5度)入射の不要光のうち、設計入射角度の+1次回折光の回折角+15.2度付近に射出する不要光は像面に到達する(図8のBm)。また、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や回折角度が異なるが、設計入射角度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次数よりもプラス次数の回折光が結像面に到達する(図8ではBm~Bm+)。この不要光により、像性能の低下を招くことになる。本実施例において、結像面に到達する次数として、図8のBmに相当する次数は-50(回折角+15.3度)、図8のBm+に相当する次数は-15(回折角+8.2度)である。

【0042】

図9に示される不要光ピークの次数は、薄膜ありの場合とない場合で略同一である。しかし、不要光の広がり互いに異なり、回折角+15.3度付近(回折次数-50次)の回折効率、薄膜なしの場合よりも薄膜ありのほうが低下している。しかしながら、不要光が最も低くなる次数が存在し、その次数から離れるほど不要光の回折効率が上がっていく。薄膜ありの場合、最も効率が低い次数が-45次付近にあるため、結像面の周辺部に相当する-15次の回折効率は薄膜ありと比較して低減量がわずかである。

【0043】

図9より、本実施例のように格子壁面の角度を変化させることにより、不要光(回折効率)が最も低くなる次数をシフトさせていることがわかる。特に、入射角度 i よりも格子壁面の角度 θ_1 を小さくすることにより、不要光が最も低減する次数をプラス側にシフトさせることができる。好ましくは、斜入射角度で入射する光束による不要光の回折効率は、この不要光が像面に到達する回折次数の範囲内(-50次~-15次)で極小になる。また好ましくは、本実施例において、不要光の回折効率は、不要光が像面に到達する回

10

20

30

40

50

折次数の範囲内（-50次～-15次）で0.010%以下である。より好ましくは、不要光の回折効率、この範囲内で0.005%以下である。

【0044】

また、不要光は、次数の絶対値が設計値から離れるほど結像面においてはボケていくため、同じ回折効率であっても結像面上の不要光強度は小さくなる。このため、結像面到達次数が小さい側の回折効率を小さくしたほうが、結像面に到達する不要光強度は小さくなる。図9において-40次から-50次の範囲は、本実施例より従来の薄膜ありの構成の場合のほうが小さくなっている。しかし、-15次から-40次の次数の絶対値が小さく、かつ広い次数範囲においては本実施例の構成のほうが小さい。このため、結像面の全域を考慮すると、本実施形態のほうがより不要光が低くなる。

10

【0045】

また、図5に示される入射光束B'を想定して入射光については、m格子による影響のほうが大きいため、像性能の低下に対しての影響は小さい。このように、本実施例の回折光学素子を適用した光学系において、設計入射角度 θ_i における回折効率の低減に影響ない程度に抑制し、斜入射角度で入射する光束による不要光のうち、結像面の中心部から周辺部の全域に到達する不要光を低減させることができる。

【0046】

また、ここでは画面外光束B, B'の入射角度は、画面外+10度であると想定される。この入射角度よりも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、この入射角度よりも大きい角度では、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度に想定する。

20

【実施例2】

【0047】

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。本実施例において、格子壁面の面法線に対する角度は12度である。

【0048】

図10は、図2に示される設計入射角度（撮影光入射角度）である入射光束aと図5および図6の入射光束Aを想定して、設計入射角度 θ_i が15度、格子ピッチpが100 μm におけるRCWA計算を行った結果の+1次回折光の回折効率を示すグラフである。図10は、薄膜11を有しない回折光学素子1を用いた場合、および、薄膜11を有しているが格子壁面の面法線に対する角度 θ_1 が設計入射角度 θ_i と同じ15度の場合における比較例としてのグラフを示している。本実施例は、格子壁面の角度が入射光線の角度より小さくなっている分回折効率が低下しているが、薄膜を設けていない場合より高いため、回折効率の低下による影響は少ない。

30

【0049】

図11は、図5および図8に示される入射光束Bを想定して、画面外入射角度 θ_i が+10度、図3に示す画面外入射光束bとして面法線に対する入射角度が+5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。図11は、薄膜11を有しないDOEを使用した場合、および薄膜11を有しているが格子壁面の面法線に対する角度が入射光線と同じ15度の場合を比較して示すグラフである。図11において、横軸は次数（m）、縦軸は回折効率（%）をそれぞれ示している。画面外光+10度（面法線に対して+5度）入射の不要光のうち、結像面に到達する次数は図8のBmに相当する次数は-50次（回折角+15.3度）、図8のBm+に相当する次数は-15次（回折角+8.2度）である。

40

【0050】

本実施形態では、実施例1よりも格子壁面の角度 θ_1 と設計入射角度 θ_i との差が大きいため、不要光が最も低減する次数のプラス側へのシフト量大きい。不要光は、次数の

50

絶対値が設計値から離れるほど結像面においてはボケていくため、同じ回折効率であっても結像面上の不要光強度は小さくなる。このため、結像面到達次数が小さい側の回折効率を小さくしたほうが、結像面に到達する不要光強度は小さくなる。図 11 において、-35 次から -50 次の範囲は、本実施例よりも従来の薄膜ありの場合のほうが小さくなっている。しかし、-15 次から -35 次の次数の絶対値が小さく、かつ広い次数範囲においては本発明のほうが小さい。このため、結像面の全域と考慮した場合、本発明のほうがより不要光が低くなる。

光学系や、基板レンズの曲率半径、格子ピッチ等により結像面に到達する次数に違いがあるが、格子壁面の角度と適宜変更することにより結像面に到達する不要光強度を制御することが可能になる。

【実施例 3】

【0051】

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。本実施例は、格子ピッチが $200\text{ }\mu\text{m}$ である点で、格子ピッチが $100\text{ }\mu\text{m}$ である実施例 1 と異なる。また本実施例において、格子高さは $10.56\text{ }\mu\text{m}$ であり、それ以外の回折格子、薄膜を構成する材料、薄膜の厚さ（幅 W ）、格子壁面の面法線に対する角度、および、設計次数はそれぞれ、実施例 1 と同じである。

【0052】

図 12 は、図 2 に示される設計入射角度（撮影光入射角度）である入射光束 a と図 5 および図 6 の入射光束 A を想定して、設計入射角度 i が 15 度、格子ピッチ p が $200\text{ }\mu\text{m}$ における $RCWA$ 計算を行った結果の +1 次回折光の回折効率を示すグラフである。図 12 は、薄膜 11 を有しない回折光学素子を用いた場合、および、薄膜 11 を有しているが格子壁面の面法線に対する角度 θ_1 が設計入射角度 i と同じ 15 度の場合における比較例としてのグラフを示している。本実施例は、実施例 1 と比較して壁面の寄与が小さくなるため、設計次数の回折効率の絶対値が高くなっている。なお本実施例は、格子壁面の角度が入射光線の角度より小さくなっている分、回折効率が低下しているが、薄膜を設けていない場合より高いため、回折効率の低下による影響は少ない。

【0053】

図 13 は、図 5 および図 8 に示される入射光束 B を想定して、画面外入射角度 i が $+10$ 度、図 3 に示される画面外入射光束 b として面法線に対する入射角度が $+5$ 度、格子ピッチ $200\text{ }\mu\text{m}$ 、波長 550 nm における $RCWA$ 計算結果を示すグラフである。図 13 は、薄膜 11 を有しない DOE を使用した場合、および薄膜 11 を有しているが格子壁面の面法線に対する角度が入射光線と同じ 15 度の場合について、比較例としてのグラフである。図 13 において、横軸は次数（ m ）、縦軸は回折効率（ $\%$ ）をそれぞれ示している。画面外光 $+10$ 度（面法線に対して $+5$ 度）入射の不要光のうち、結像面に到達する次数は図 8 の B_m に相当する次数は -100 次（回折角 $+15.4$ 度）、図 8 の $B_m +$ に相当する次数は -30 次（回折角 $+8.2$ 度）である。図 11 において、 -80 次から -100 次の範囲は、従来の薄膜を含む回折光学素子の場合のほうが小さいが、 -30 次から -80 次の次数の絶対値が小さく、かつ広い次数範囲においては本実施例の構成のほうが小さい。このため、結像面の全域を考慮した場合、本実施例のほうがより不要光を低減させることができる。

【0054】

また、図 13 は実施例 1 と比較して格子ピッチが大きくなり、壁面の寄与が小さくなるため、高次回折効率の絶対値が低くなっている。この割合は同じ射出角度の回折光の格子ピッチの二乗分の一であることを確認している。例えば、格子ピッチ $100\text{ }\mu\text{m}$ の実施例 1 の図 9 の比較例（薄膜なし）における -100 次、 -50 次の回折効率はそれぞれ 0.0310% 、 0.0159% である。これに対して、格子ピッチ $200\text{ }\mu\text{m}$ の実施例 3 の図 12 の比較例（薄膜なし）における -200 次、 -100 次（格子ピッチが 2 倍のため、比較する次数も 2 倍）の回折効率はそれぞれ 0.00774% 、 0.00397% である。すなわち、実施例 1 に対して $(100/200)^2 = 1/4$ になっている。この関係

10

20

30

40

50

は、壁面に膜が設けられた場合でも同じ関係である。逆に、実施例 3 の格子ピッチを格子ピッチ $100\text{ }\mu\text{m}$ に規格化した場合、高次回折効率は $(200/100)^2 = 4$ 倍にすればよいことになる。

【実施例 4】

【0055】

次に、図 15 を参照して、本発明の実施例 4 における光学機器としての撮像装置について説明する。図 15 は、本実施例における撮像装置（デジタルカメラ）300 の断面図である。

【0056】

撮像装置 300 は、レンズ鏡筒 301 とカメラ本体 302 とを備えて構成される。レンズ鏡筒 301 は、例えば実施例 1～3 のいずれかの光学系 100 を有する。またレンズ鏡筒 301 は、光学系 100 を保持する保持部材 101 を有する。カメラ本体 302 は、CCD センサや CMOS センサを備えた撮像素子 303 を有する。撮像素子 303 は、光学系 100 の結像面 103 に配置されており、レンズ鏡筒 301（光学系 100）を介して形成された光学像を光電変換して画像信号を出力する。

10

【0057】

なお本実施例において、撮像装置 300 は、レンズ鏡筒 301 とカメラ本体 302 とが一体的に構成されたデジタルカメラであるが、本発明はこれに限定されるものではない。例えば、撮像装置は、カメラ本体と、カメラ本体に対して着脱可能に取り付けられるレンズ鏡筒（交換レンズ）とを備えて構成されたカメラシステム（一眼レフカメラシステム）であってもよい。

20

【0058】

各実施例によれば、結像面の中心部から周辺部の全域にわたって、到達する不要光を低減させることが可能な光学系および光学機器を提供することができる。

【0059】

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。

【符号の説明】

【0060】

1 回折光学素子

30

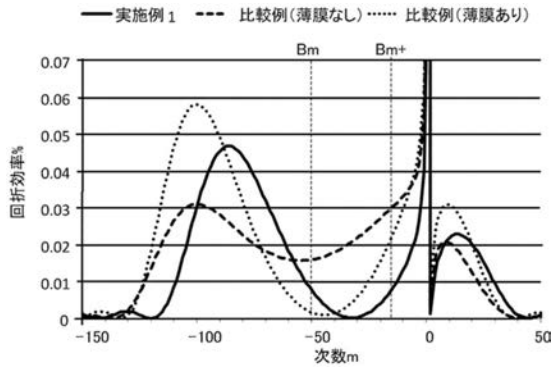
11 薄膜

21 回折格子（第 1 の回折格子）

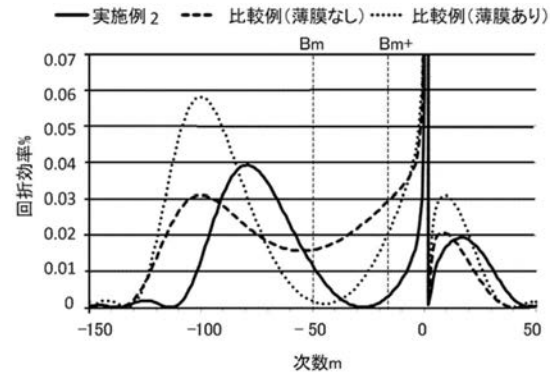
31 回折格子（第 2 の回折格子）

100 光学系

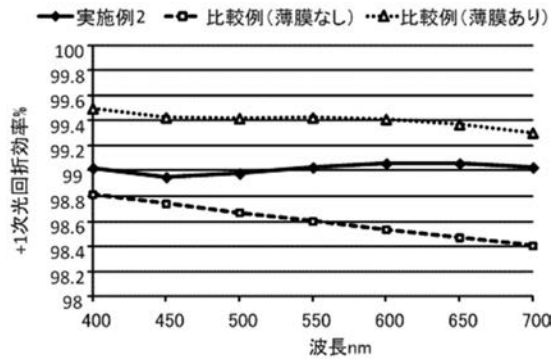
【図 9】



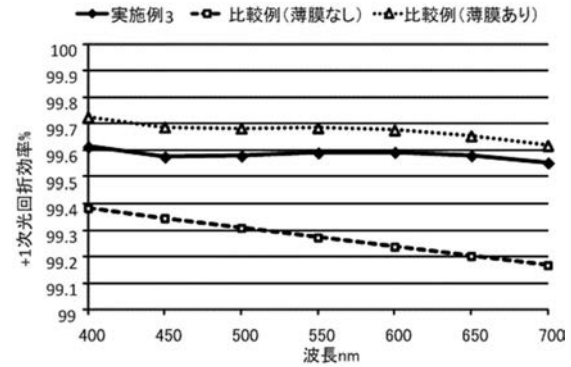
【図 1 1】



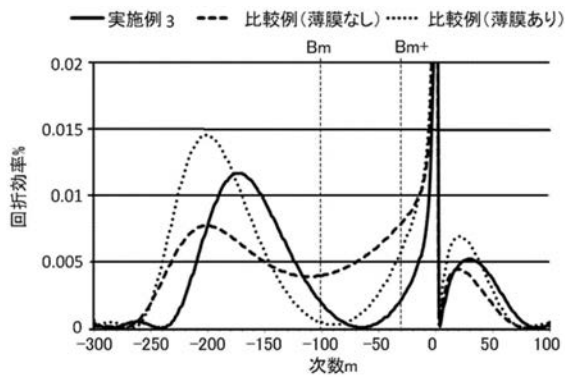
【図 1 0】



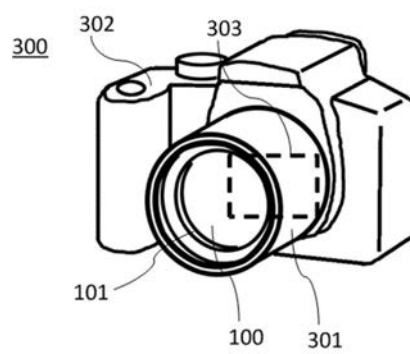
【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 5】



【図 1 4】

