(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7207883号
(P7207883)

(45)発行日　令和5年1月18日(2023.1.18)

(24)登録日　令和5年1月10日(2023.1.10)

(51)国際特許分類		FI		
G02B	*5/30 (2006.01)*	G02B	5/30	
G02B	*5/20 (2006.01)*	G02B	5/20	
G03B	*11/00 (2021.01)*	G03B	11/00	
H04N	*23/55 (2023.01)*	H04N	5/225	400

請求項の数　14　（全22頁）

(21)出願番号　特願2018-132675(P2018-132675)
(22)出願日　平成30年7月12日(2018.7.12)
(65)公開番号　特開2019-35946(P2019-35946A)
(43)公開日　平成31年3月7日(2019.3.7)
審査請求日　令和3年6月30日(2021.6.30)
(31)優先権主張番号　特願2017-155673(P2017-155673)
(32)優先日　平成29年8月10日(2017.8.10)
(33)優先権主張国・地域又は機関
日本国(JP)

(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
(74)代理人　100121614
弁理士　平山 倫也
(72)発明者　山口 裕
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　中村 説志

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　光学ローパスフィルタおよび撮像装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

それぞれが入射光線を複数の光線に分離する複数の光学異方性層を有する光学ローパスフィルタであって、

前記複数の光学異方性層のそれぞれを光入射側から順に第１層乃至第Ｎ層（４≦Ｎ≦５）とし、該第１層乃至第（Ｎ－１）層による光線分離幅の合計値をＤａ［μｍ］、該第１層乃至第（Ｎ－１）層により分離された光線のうち前記入射光線に対して最大位相差を有する光線と最小位相差を有する光線との間の距離をＤｓ［μｍ］とするとき、

Ｄｓ≦０．５０Ｄａ

なる条件を満足し、

前記第１層乃至第Ｎ層のうち全ての互いに隣接する二つの光学異方性層の光線分離方向が互いになす角度が１２０°以上１５０°以下であることを特徴とする光学ローパスフィルタ。

【請求項２】

使用波長域における最短波長および最長波長をそれぞれλｍｉｎおよびλｍａｘ、前記第１層乃至第（Ｎ－１）層のうち少なくとも一つにおいて、前記最短波長λｍｉｎおよび前記最長波長λｍａｘに対して生じる位相差をそれぞれδｍｉｎおよびδｍａｘとするとき、

０．５≦δｍｉｎ／λｍｉｎ－δｍａｘ／λｍａｘ

なる条件を満足することを特徴とする請求項１に記載の光学ローパスフィルタ。

【請求項３】
使用波長域における最短波長及び最長波長をそれぞれλｍｉｎおよびλｍａｘ、前記第１層乃至第Ｎ層のうち少なくとも一つで生じる位相差をδｓとするとき、
０．５≦δｓ／λｍｉｎ－δｓ／λｍａｘ
なる条件を満足することを特徴とする請求項１又は２に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項４】
前記第１層乃至第Ｎ層の光線分離幅が全て等しいことを特徴とする請求項１から３のいずれか一項に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項５】
第２層から前記第（Ｎ－１）層のうち少なくとも一つにおいて、使用波長域における最短波長λｍｉｎよりも長く最長波長よりも短い波長λａ［ｎｍ］に対して生じる位相差をΔｎｄ［ｎｍ］、自然数をｍとするとき、
Δｎｄ＝ｍ×λａ
なる条件を満足することを特徴とする請求項４に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項６】
前記第１層乃至第Ｎ層は、第１および第２の光学異方性層を含み、該第１の光学異方性層は第１の方向または該第１の方向に直交する第２の方向に前記入射光線を分離し、前記２の光学異方性層は前記第１または第２の方向に対して４５°または１３５°の方向に前記入射光線を分離することを特徴とする請求項１から３のいずれか一項に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項７】
前記第１の光学異方性層の光線分離幅は、前記第２の光学異方性層の光線分離幅よりも小さいこと特徴とする請求項６に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項８】
前記第１層乃至第Ｎ層において、互いに光線分離幅が異なる前記第１および第２の光学異方性層が交互に積層され、
前記第１層および前記第Ｎ層を除く少なくとも一つの層において、使用波長域における最短波長λｍｉｎよりも長く最長波長よりも短い波長λａ［ｎｍ］に対して生じる位相差をΔｎｄ［ｎｍ］、自然数をｍとするとき、
Δｎｄ＝（ｍ＋０．５）／２×λａ
なる条件を満足することを特徴とする請求項６または７に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項９】
前記第１層乃至第Ｎ層のそれぞれは、水晶で形成された光学異方性層およびニオブ酸リチウムで形成された光学異方性層のうち少なくとも一方により構成されていることを特徴とする請求項１から８のいずれか一項に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項１０】
Ｄｓ≦４．２
なる条件を満足することを特徴とする請求項１から９のいずれか一項に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項１１】
Ｄｓ≦０．４Ｄａ
なる条件を満足することを特徴とする請求項１から１０のいずれか一項に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項１２】
使用波長域における最短波長および最長波長をそれぞれλｍｉｎおよびλｍａｘ、前記第１層乃至第（Ｎ－１）層のうち少なくとも一つにおいて、前記最短波長λｍｉｎおよび前記最長波長λｍａｘに対して生じる位相差をそれぞれδｍｉｎおよびδｍａｘとするとき、
０．５≦δｍｉｎ／λｍｉｎ－δｍａｘ／λｍａｘ≦３．０
なる条件を満足することを特徴とする請求項１から１１のいずれか一項に記載の光学ロー

パスフィルタ。
【請求項１３】
使用波長域における最短波長および最長波長をそれぞれλｍｉｎおよびλｍａｘ、前記第１層乃至第Ｎ層のうち少なくとも一つで生じる位相差をδｓとするとき、
０．５≦δｓ／λｍｉｎ－δｓ／λｍａｘ≦１０．０
なる条件を満足することを特徴とする請求項１から１２のいずれか一項に記載の光学ローパスフィルタ。
【請求項１４】
請求項１から１３のいずれか一項に記載の光学ローパスフィルタと、
該光学ローパスフィルタを通過した光により形成された光学像を光電変換する撮像素子とを有することを特徴とする撮像装置。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、光学ローパスフィルタに関し、特に撮像装置に用いられる多点分離型光学ローパスフィルタに関する。
【背景技術】
【０００２】
ＣＣＤセンサやＣ－ＭＯＳセンサ等の２次元撮像素子を用いる撮像装置では、撮像により取得される画像における偽色やモアレ縞の発生を防ぐために、光学ローパスフィルタ（以下、光学素子ともいう）が用いられる。光学ローパスフィルタは結像する光の点像分布を制御することでナイキスト周波数以上の高周波の画像情報を制限する。
【０００３】
特許文献１には、複屈折光学素子（複屈折層）を６層から８層積層して点像分布をガウス形状とすることで、高周波の解像度を高め斜め方向の偽色やモアレの発生を抑制する光学ローパスフィルタが開示されている。また特許文献２には、撮影レンズの収差や回折限界の影響を考慮して、光学ローパスフィルタによる４点分離または２点分離の光線分離幅を設定することが開示されている。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００４】
【文献】特開２０１５－２１３３０６号公報
特許第５２１２０４４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、撮像素子の画素ピッチの縮小化や分布する点像の多点化によって、複数に分離した点像間の距離（光線分離幅）が回折限界程度に近接すると、点像同士が干渉し合うことによって点像分布の形状が変化する。特許文献１では、点像分布を形成する際の条件を開示しているが、各複屈折素子で生ずる位相差や各複屈折素子の分離軸方位の影響については言及していない。特許文献２では、回折限界による点像の拡がりの影響については言及しているものの、点像間の干渉により点像分布が非対称化することについては言及していない。
【０００６】
本発明は、対称性の高い光線分離作用を有する光学ローパスフィルタを提供する。
【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ローパスフィルタは、それぞれが入射光線を複数の光線に分離する複数の光学異方性層を有する。該光学ローパスフィルタは、複数の光学異方性層のそれぞれを光入射側から順に第１層乃至第Ｎ層（４≦Ｎ≦５）とし、該第１層乃至第（

Ｎ－１）層による光線分離幅の合計値をＤａ［μｍ］とし、第１層乃至第（Ｎ－１）層により分離された光線のうち入射光線に対して最大位相差を有する光線と最小位相差を有する光線との間の距離をＤｓ［μｍ］とするとき、

Ｄｓ≦０．５０Ｄａ

なる条件を満足し、第１層乃至第Ｎ層のうち全ての互いに隣接する二つの光学異方性層の光線分離方向が互いになす角度が１２０°以上１５０°以下であることを特徴とする。

【０００８】

なお、上記光学ローパスフィルタと、該光学ローパスフィルタを通過した光により形成された光学像を光電変換する撮像素子とを有する撮像装置も、本発明の他の一側面を構成する。

【発明の効果】

【０００９】

本発明によれば、対称性の高い光線分離作用を有する光学ローパスフィルタを実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１０】

【図１】本発明の代表的な実施例である光学ローパスフィルタの構成を示す図。

【図２】複屈折光学素子による点像分離を説明する図。

【図３】点像間の干渉効果を説明する図。

【図４】実施例の光学ローパスフィルタの点像分布と位相差分布を説明する図。

【図５】代表的な比較例である光学ローパスフィルタの点像分布と位相差分布を説明する図。

【図６】本発明の実施例１である光学ローパスフィルタの点像分布図。

【図７】比較例１である光学ローパスフィルタの点像分布図。

【図８】実施例１の空間周波数特性を示す図。

【図９】比較例１の空間周波数特性を示す図

【図１０】本発明の実施例２である光学ローパスフィルタの点像分布図。

【図１１】実施例２の空間周波数特性を示す図。

【図１２】本発明の実施例３である光学ローパスフィルタの点像分布図。

【図１３】実施例３の空間周波数特性を示す図。

【図１４】本発明の実施例４である光学ローパスフィルタの構成を示す図。

【図１５】実施例４の光学ローパスフィルタの点像分布図。

【図１６】実施例４の空間周波数特性を示す図。

【図１７】本発明の実施例５である光学ローパスフィルタの構成を示す図。

【図１８】実施例５の光学ローパスフィルタの点像分布図。

【図１９】実施例５の空間周波数特性を示す図。

【図２０】本発明の実施例６である撮像装置を示す図。

【発明を実施するための形態】

【００１１】

以下、本発明の実施例について図面を参照しながら説明する。

【００１２】

図１は、本発明の代表的な実施例である多層（多点分離型）光学ローパスフィルタ１０の構成を示している。光学ローパスフィルタ１０は、光学異方性素子（光学異方性層）としての４層の複屈折光学素子（複屈折板）１～４が積層された構造を有する。ただし、光学異方性層の層数は４層に限られるものではなく、５層であっても本発明の効果を得ることができる。

【００１３】

以下の説明において、光学ローパスフィルタ１０の長辺方向（水平方向）に延びる軸をｘ軸とし、その方向をｘ方向とする。また、光学ローパスフィルタ１０の短辺方向（垂直方向）に延びる軸をｙ軸とし、その方向をｙ方向とする。さらに、ｘ軸とｙ軸に沿った面

、すなわちｘｙ面を光学ローパスフィルタ１０の素子面という。この素子面に直交する軸を光軸といい、該光軸が延びる方向を光軸方向（ｚ方向）とする。４層の複屈折光学素子１～４は光軸方向に積層されている。

【００１４】

光軸方向は、光が光学ローパスフィルタ１０に入射して透過する方向である。なお、各複屈折光学素子の光軸方向での厚さは、図では説明のために実際よりも厚く示しているが、実際の厚さは数１００μｍ程度である。

【００１５】

複屈折光学素子１～４はそれぞれ、水晶またはニオブ酸リチウム等の一軸性結晶（異方性材料）により形成されている。図２（ａ）に示すように、光軸方向から各複屈折光学素子を見ると、その光学軸はｙ方向に対して９０°の方向を向いている。また、図２（ｂ）に示すように、各複屈折光学素子をｙ方向から見ると、その光学軸は、光軸方向に対して角度θ（素子面に対して９０°－θ）だけ傾いている。以下の説明では、θを傾斜角という。θは一般的には４５°付近の角度に設定されるが、材質や設定したい位相差に応じて１０°以上８０°以下の範囲で設定される。

【００１６】

また、一般に、斜めの光学軸を有する平行平板形状の複屈折光学素子に入射した光線は常光線と異常光線の２つの光線に分離されることが知られている。すなわち、図２（ｃ）に示すように、光軸方向から複屈折光学素子に入射した光線６は、まっすぐに透過する常光線７と、常光線７に対して図中に示す方向に透過する異常光線８とに分離される。以下の説明において、常光線７と異常光線８とが分離する方向を光線分離方向という。

【００１７】

常光線７は光線分離方向に対して直交する方向に電場が振動する偏光となり、異常光線８は光線分離方向と平行な方向に電場が振動する偏光となる。すなわち、常光線７と異常光線８の偏光方向は直交する。

【００１８】

複屈折光学素子から常光線７および異常光線８が出射するときのこれら光線７，８間の距離である光線分離幅ｗは、複屈折光学素子の材質固有の屈折率異方性の大きさｎΔと光学軸の傾斜角θと複屈折光学素子の厚みｄとで一意に決まる。材質と傾斜角θが決まれば、光線分離幅ｗは厚みｄに比例する。

【００１９】

このような複屈折光学素子を、光線分離方向が４５°または１３５°となるように光軸方向（積層方向）に積層することにより、層数Ｎ（４≦Ｎ≦５）に対して２のＮ乗個に分かれた点像分布（光線分布）が形成される。複屈折光学素子１～４の光線分離方向、光線分離幅および積層数を考慮して点像分布の拡がりを幾何光学的に設計することで、光学ローパスフィルタ１０として機能させることができる。

【００２０】

しかし、複数ある点像（光線）間の距離が、点像分布自体の拡がりに対して近接している場合には、波動光学的な干渉が生じ、幾何光学的に求めたような点像分布が得られない場合がある。

【００２１】

最も簡単な例として、図３（ａ），（ｂ）に示すように、複数に分離した点像のうち距離Ｄだけ離れ、偏光方向が平行な２点の点像を考える。図中の点線曲線はそれぞれの点像の本来の強度分布（点像分布）を示し、実線曲線は２つの点像の合成として得られる点像分布を示す。点像の白と黒は位相の違いを表し、図３（ａ）では２つの点像の位相差が（ｍ＋１）λ／２だけずれていることを点線の上下でも示している。図３（ｂ）では２つの点像の位相差はゼロまたは波長の整数倍である。幾何光学的には、２つの点像にどのような位相差が付与されていたとしても点像分布は一様である。しかし、実際には点像は回折や収差により有限の拡がりを持ち、互いの点像分布の位相差に応じた干渉が生じる。

【００２２】

具体的には、図３（ａ）では、打ち消し合いにより点像間に落ち込みが発生するのに対して、図３（ｂ）の例では強め合いにより滑らかな点像分布が得られる。この結果、図３（ａ）と図３（ｂ）とで、２つの点像の合成として得られる点像分布関数に差が生じる。この場合、干渉を考慮した見かけの光線分離幅は図３（ａ）よりも図３（ｂ）の方が小さくなる。

【００２３】

一般に、複屈折光学素子により分離された直後の点像間の偏光関係は、図２（ｄ）において各点像の偏光方向を両矢印で示したように直交関係にあるため、点像分布は位相を考慮しない強度分布の足し合わせでよい。点像の回折や収差による拡がりよりも各点像の分離幅が十分に大きければ、干渉の影響は軽微であると考えられる。

【００２４】

しかし、多層、すなわち多点分離型光学ローパスフィルタでは、点像分離の過程で点像間の距離が近接するため、干渉の影響が表れやすくなる。特に８点以上、より顕著には１６点以上に点像を分離する多点分離型光学ローパスフィルタでは、それら点像間の影響が複雑化するため、点像間の位相差による干渉を考慮した上で適切な点像分布となるように光学ローパスフィルタの構成を選択する必要がある。

【００２５】

多点分離型光学ローパスフィルタでの干渉の影響の説明のために、図１と同じく４層構成の１６点分離を行う光学ローパスフィルタを考える。図４は、４層の複屈折光学素子を光軸方向に積層したときの点像の分離過程を示している。以下、複屈折光学素子をＬＰＦと記す。また、図４では、光入射側から順に配置された第１層から第４層のＬＰＦをそれぞれ、ＬＰＦ１、ＬＰＦ２、ＬＰＦ３、ＬＰＦ４と記す。

【００２６】

図４（ａ）～（ｄ）では、ＬＰＦ１、ＬＰＦ２、ＬＰＦ３、ＬＰＦ４をこの順に光線が透過した際の点像分離の様子を示している。実線丸は常光線の点像を、点線丸は異常光線の点像を表す。また、点像から点像へ向かう矢印は、光線分離方向を示す。図４に示すように、光学ローパスフィルタに入射した光線（入射光線）は、ＬＰＦ１～ＬＰＦ４のそれぞれにおいて、ｘ軸となす角度が２２５°、０°、１３５°、２７０°である各光線分離方向に分離される。これにより、入射光線は合計４回分離され、図４（ｄ）に示すように最終的に１６点の点像が形成される。

【００２７】

なお、図４（ａ）～（ｄ）における各ＬＰＦの横には、図４（ｅ）～（ｈ）として各点像の位相差を濃淡で示している。ここでは、各ＬＰＦで生じる常光線と異常光線との間の位相差Δは互いに同じとする。

【００２８】

図４（ｅ）に示すように、入射光線がＬＰＦ１を透過することで、異常光線の点像に常光線に対する位相差Δが付与される。そして、各光線がＬＰＦ２を透過した時点で図４（ｆ）に示す位相差の分布（０～２Δ）が得られ、さらに各光線がＬＰＦ３を透過した時点で図４（ｇ）に示す位相差の分布（０～３Δ）が得られる。最後に各光線がＬＰＦ４を透過することで、図４（ｈ）に示すように常光線と異常光線の点像分布が形成されるが、常光線及び異常光線は直交偏光であるため互いに干渉しない。したがって、ＬＰＦ３を透過した時点での８点の点像分布において位相差分布に応じた点像間の干渉が生じ、それが重ね合わされて１６点分離に相当する点像が形成される。

【００２９】

干渉の影響を考慮すべきＬＰＦ３での位相差分布に着目すると、中心付近にて位相差が最小（０）の点像と位相差が最大（３Δ）の点像が隣接し、その周囲に位相差Δおよび位相差２Δの３つの点像が対称的に配置される。なお、図４（ｈ）に示したＬＰＦ４における常光線の８つの点像と異常光線の８つの点像の位相差分布は相対的に同じであるが、実際には光線分離方向に起因する位相飛びが加わるため、２つは同一の干渉分布とはならない。

【００３０】
次に、図４と同様に４層構成であるが、これとは異なる構成で１６点分離を行う光学ローパスフィルタの例（比較例）を図５に示す。図５では、第１層から第４層のＬＰＦをそれぞれ、ＬＰＦ１′、ＬＰＦ２′、ＬＰＦ３′、ＬＰＦ４′と記す。図５に示すＬＰＦ１′～ＬＰＦ４′での光線分離方向は、図４に示したＬＰＦ１～ＬＰＦ４での光線分離方向と異なる。図５（ａ）～（ｄ）に示すように、光学ローパスフィルタに入射した入射光線は、ＬＰＦ１′～ＬＰＦ４′のそれぞれにおいて、ｘ軸となす角度が４５°、０°、３１５°、９０°である各光線分離方向に分離される。これにより、入射光線は合計４回分離され、図５（ｄ）に示すように最終的に１６点の点像が形成される。

【００３１】
幾何光学的には重心位置の違いを除いて、図５のＬＰＦ４′で得られる点像分布は図４のＬＰＦ４で得られる点像分布と同様である。図４と同様に、図５の各ＬＰＦの横に図５（ｅ）～（ｈ）として各点像の位相差を示す。図５のＬＰＦ３′で得られる位相差分布は図４のＬＰＦ３で得られる位相差分布とは異なっている。最も左の点像の位相差が０で最小である。他に位相差Δの点像が３点、位相差２Δの点像が３点形成され、最も右の点像の位相差が３Δで最大となる。このように、図中の左から右に向かって位相差が増えるような位相差分布が得られる。図４（ｇ）と図５（ｇ）を比較するとわかるように、図５のＬＰＦ３′で得られる位相差分布は、図４のＬＰＦ３で得られる位相差分布に比べて対称性が低い（非対称性が高い）。

【００３２】
点像の位相差分布の対称性を説明するために、図４のＬＰＦ１～ＬＰＦ４の構成と図５のＬＰＦ１′～ＬＰＦ４′の構成をベクトルで表記する。ベクトルの方向を光線分離方向とし、ベクトルの長さを光線分離幅として、ＬＰＦ１～ＬＰＦ４を重ねたものを図４（ｉ）に示し、ＬＰＦ１′～ＬＰＦ４′を重ねたものを図５（ｉ）に示す。

【００３３】
また、位相差を考慮すべき層であるＬＰＦ１～ＬＰＦ３およびＬＰＦ１′～ＬＰＦ３′においてベクトルを足し合わせた合成ベクトルを二重線矢印で示す。合成ベクトルの方向は、点像全体の位相差分布の勾配方向として、長さは位相差分布の偏り量として考えることができる。図４（ｉ）ではベクトルの方向に偏りは少なく、その結果として合成ベクトルは打ち消し合って短くなる。これは、図４（ｈ）に示したＬＰＦ４で形成されるほぼ均一な位相差分布と対応していると考えることができる。

【００３４】
一方、図５（ｉ）に示す比較例においては位相差分布に偏りがあるため、ベクトルはｘ方向への偏りが大きく、この結果、合成ベクトルはｘ方向に長く伸びる。図５（ｉ）に示した合成ベクトルを図５（ｈ）に示したＬＰＦ４′で得られる位相差分布と比較すると、合成ベクトルがｘ方向に長いことは、位相差分布がｘ方向に偏っていることと対応していることがわかる。したがって、図４の構成は図５の構成に比べて位相差分布の対称性が高い。位相差分布の対称性が高いことは、後述する波長平均化により点像分布を均一化しやすいと考えることができる。

【００３５】
また、合成ベクトルの長さは、図４（ｈ）と図５（ｈ）に示したように、ＬＰＦ３又はＬＰＦ３′で得られる各点像における、位相差が最小の点像の位置と位相差が最大の点像の位置との間の距離（光線分離幅ともいう）Ｄｓと等しくなる。これは最小位相差を有する点像を出発点として、最大位相差を有する点像の到達位置が合成ベクトルの終点と一致するためである。このため、点像分布における位相差の対称性を評価する評価値として距離Ｄｓを用いることができる。均一な点像分布を得るには、距離Ｄｓが十分に小さくなるようにＬＰＦ１～ＬＰＦ４の光学軸の方位や光線分離幅を設計することが望ましい。

【００３６】
具体的には、Ｎ層（Ｎ≧３）のＬＰＦにより構成された光学ローパスフィルタにおいて、光入射側から順に配置された第１層から第（Ｎ－１）層までのＬＰＦの光線分離幅の合

計値をＤａとする。また、第１層から第（Ｎ－１）層までのＬＰＦにより分離された光線のうち最大位相差を有する光線と最小位相差を有する光線との間の距離をＤｓ［μｍ］とする。このとき、光線分離幅ＤｓはＤａに対して以下の条件式（１）を満足することが望ましい。

【００３７】

Ｄｓ≦０．５Ｄａ　（１）

この条件を満足することにより、点像間の干渉効果を考慮したとしても方位対称性が高く、幾何光学的な設計値により近い光学ローパスフィルタを得ることができる。

【００３８】

さらに、この光学ローパスフィルタを撮像装置の光学系に用いる場合の現実的目安として、Ｄｓが、Ｆ５．６でのｄ線（５８７ｎｍ）の回折拡がりである幅４μｍ（１．２２λｄＦ＝４．０１０μｍ）より小さい場合は点像間の干渉の影響が顕著であると考えられる。製造誤差等を考慮した上で、Ｄｓが４．２μｍ以下である場合（Ｄｓ≦４．２μｍなる条件を満たす場合）には、特に条件式（１）を満足することが望ましい。実際には、撮像素子の画素ピッチの縮小化が進み、より小さい光線分離幅で、かつより明るいＦナンバでローパスフィルタ効果を得ようとする場合には、Ｄｓが２μｍ程度であっても点像間の干渉による点像分布の変形への影響が増大すると考えられる。

【００３９】

光学ローパスフィルタが用いられる撮像装置は、一般に、可視光帯域等のブロードな波長帯域で動作する。各ＬＰＦの位相差は波長分散を持つため、波長によって位相差Δが変化し、それに応じて点像の分布も変化する。しかし、撮像装置で取得される実際の撮像画像では、撮像素子の感度やカラーフィルタの帯域幅で点像の分布は平均化され、対称性の高い点像分布となる。

【００４０】

図６には、一例として、表１に示す構成において波長４６０ｎｍから６４０ｎｍで波長を平均化したときの点像分布を示す。点像の拡がりによって互いの強度分布が干渉し合った結果、波長の平均化を考慮しても点像分布は対称な分布となる。図７には、比較例として、表２に示す構成における点像分布を示す。この比較例では、波長の平均化を考慮しても点像分布の非対称性が残存する。

【００４１】

図６と図７の点像分布の違いは、点像間の位相差分布に起因する。図７の点像の位相差分布は偏りが大きく、波長分散による変化を考慮しても非対称性が残存する。これに対して図６の点像分布では点像の位相差分布の対称性が高く、波長の平均化により均一な点像が得られる。条件式（１）を満足することにより、各ＬＰＦでの光線分離方向を偏らないように分布させることができ、これにより均一な点像分布が得られる。

さらに、以下の条件式（１ａ）を満足することがより好ましい。

【００４２】

Ｄｓ≦０．４Ｄａ　（１ａ）

本実施例の光学ローパスフィルタが使用される波長域（使用波長域）において波長が十分に平均化されるためには、各ＬＰＦの位相差の波長分散がある程度大きいことが望ましい。波長分散が小さいと、単一波長の光線が入射したときの点像分布に偏りが生じた際に十分に波長が平均化されない場合がある。

【００４３】

具体的には光学ローパスフィルタの使用波長域における最短波長をλｍｉｎ、最長波長をλｍａｘとする。そして、第１層から第（Ｎ－１）層までのＬＰＦのうち少なくとも一つのＬＰＦにおいて、最短波長λｍｉｎと最長波長λｍａｘに対して生じる位相差をそれぞれδｍｉｎおよびδｍａｘとするとき、以下の条件式（２）を満足することが望ましい。

【００４４】

０．５≦δｍｉｎ／λｍｉｎ－δｍａｘ／λｍａｘ　（２）

また、Ｎ層のＬＰＦのうち少なくとも一つのＬＰＦで生じる位相差をδｓとするとき、以

下の条件式（３）を満足することが望ましい。
【００４５】
　　０．５≦δｓ／λｍｉｎ－δｓ／λｍａｘ　　（３）
条件式（２）または（３）を満足することにより、十分な波長平均化の効果を得ることができる。
【００４６】
　なお、使用波長域とは、光学ローパスフィルタが用いられる撮像装置の仕様によって決まり、例えば光学ローパスフィルタを撮像素子に対して用いる場合は、該撮像素子の感度、カラーフィルタやカットフィルタの透過率等を考慮して設定される。可視光波長域であれば概ね４００ｎｍから７００ｎｍの範囲、またはその中の１００ｎｍ程度の特定の色域に対応する任意の波長幅の波長域が選択される。撮像装置により設定される波長域であれば、可視光波長以外の赤外波長域や紫外波長域であってもよい。
【００４７】
　光学ローパスフィルタを機能させる際に考慮すべき波長域を使用波長域と考えるとき、本実施例の効果を得るために条件式（２）を満足することが望ましい。さらには、第１層から第（Ｎ－１）層までのＬＰＦのうち一つのＬＰＦだけでなく、他のＬＰＦにおいても条件式（２）を満足することがより望ましい。
【００４８】
　さらに、以下の条件式（２ａ）および（２ｂ）を順に満足することがより好ましい。
【００４９】
　　０．５≦δｍｉｎ／λｍｉｎ－δｍａｘ／λｍａｘ≦３．０　　（２ａ）
　　０．６≦δｍｉｎ／λｍｉｎ－δｍａｘ／λｍａｘ≦２．０　　（２ｂ）
　また、以下の条件式（３ａ）及び（３ｂ）を順に満足することがより好ましい。
【００５０】
　　０．５≦δｓ／λｍｉｎ－δｓ／λｍａｘ≦１０．０　　（３ａ）
　　０．５５≦δｓ／λｍｉｎ－δｓ／λｍａｘ≦８．５　　（３ｂ）
また、これまでの説明では、波長板を用いずに点像分離を行う構成を示したが、隣接する２層のＬＰＦ間に波長板（λ／４板）を配置して、これらＬＰＦにより互いに直交する方向に点像分離を行うように構成してもよい。この場合、波長板は点像分離の作用はなく偏光状態の変換に用いられ、実質的に合成ベクトルには寄与しないが、上記２つのＬＰＦの光学軸の方位が互いに９０°をなす場合にも合成ベクトルと同様の考えを適用できる。
【００５１】
　ただし、点像間の干渉が生じ易い多点分離型光学ローパスフィルタにおいて点像分離に寄与しない層を増やすことは、材料コストと厚みの増大につながる。このため、ｘ方向（第１の方向）またはｙ方向（第２の方向）に点像分離を行う第１のＬＰＦ（第１の光学異方性層、第１の異方性光学素子）と、ｘまたはｙ方向に対して４５°または１３５°の方向に点像分離を行う第２のＬＰＦ（第２の光学異方性層、第２の異方性光学素子）とを交互に積層するとよい。この場合には、対角成分で発生しやすい偽色を効果的に抑制するため、第１のＬＰＦの光線分離幅が、第２のＬＰＦの光線分離幅より小さいことが望ましい。
【００５２】
　また、図４に示した構成例では、光線分離幅が互いに同一である４つのＬＰＦ１～ＬＰＦ４を用いたが、各ＬＰＦの光線分離幅は互いに異なっていてもよい。条件式（１）に示したように光線分離幅Ｄｓが十分小さいことは、光線分離方向の合成ベクトルの偏りが方位によらず小さいことを意味する。このため、ＬＰＦ１～ＬＰＦ４の光線分離幅が互いに異なっていたとしても、図４の構成と同様な効果が得られる。
【００５３】
　なお、点像間の干渉を考慮しても、基本的な光学ローパスフィルタの設計値は幾何光学的な条件から算出してもよい。より好ましくは、事前に回折拡がりと干渉の影響を考慮した点像分布を求め、その結果に基づいてＬＰＦの特性の強弱を調整する方法を採用するとよい。このとき、条件式（１）および（２）を満足することと幾何光学的な条件から設計

値を算出することとは背反条件とはならない。幾何光学的な設計値ではＬＰＦの光線分離方向に対して２つの自由度（例えば＋４５°方位の分離と２２５°方位の分離とは幾何光学的に等価である）があるため、幾何光学的な設計値と条件式（１）とは独立に扱うことが可能である。すなわち、幾何光学的な設計を行った上で、上記自由度の中で条件式（１）を満足するように各ＬＰＦの光線分離幅を設定することができる。

【００５４】

また、条件式（２）に関する位相差についても同様である。例えば、ＬＰＦの分離幅の決定方法には傾斜角θと厚みｄの２つのパラメータがある。これらパラメータは互いに独立であるので、同一の光線分離幅で位相差を任意に調整することができる。このため、光線分離幅と位相差とを互いに独立に制御することができる。例えば、通常は傾斜角θが４５°付近とするのが最も分離幅を大きく取れる。しかし厚みｄを十分厚く取れば傾斜角θは４５°よりも大きな値とすることができる。分離幅は同じでも後者の方が位相差を大きくすることができる。

【００５５】

条件式（１）に関して、Ｎ層のＬＰＦが同一の光線分離幅を有するように構成される場合には、より簡易な構成方法として、互いに隣接する２層のＬＰＦの光線分離方向同士がなす角度を１３５°程度に設定してもよい。これにより、条件式（１）を満足する光学ローパスフィルタを実現することができる。ただし、光線分離幅や光線分離方向の設定は設計条件により決まるので、上記角度を厳密に１３５°にする必要はなく、公差や設計許容量を見込んで、上記角度を１２０°以上１５０°以下の範囲で選択すればよい。

【００５６】

これまで、主として点像間の干渉を考慮する際に波長の平均化により均一化された設計値に近い点像分布を得るための条件を説明してきた。これに対して、単一波長において対称性の高い点像分布を得るには、前述した点像間の位相差だけでなく点像分離において発生する位相飛びや第（Ｎ－１）層までで形成される点像分布をどのように重ね合わせるかを含めて考える必要がある。さらに条件式（１）を満足する場合には、ＬＰＦの光学軸の方位の条件はある程度決まっているため、最終層である第Ｎ層のＬＰＦの光線分離方向や各層のＬＰＦで生じさせる位相差Δを用いて点像分布の対称性を調整する必要がある。

【００５７】

Ｎ層のＬＰＦの光線分離幅が全て等しい場合は、使用波長域の最短波長λｍｉｎより長く最長波長λｍａｘより短い波長λａに対して、第２層から第（Ｎ－１）層までの光学異方性層のうち少なくとも一つ（第１層及び第Ｎ層を除く少なくとも一つ）のＬＰＦの位相差Δｎｄが以下の式（４）を満足することが望ましい。ｍは自然数である。

Δｎｄ＝ｍ×λａ　　（４）

一方、上述した第１および第２のＬＰＦが交互に積層され、それらの光線分離幅が互いに異なる場合には、波長λａに対して、第１層と第Ｎ層を除く少なくとも一つの層のＬＰＦの位相差Δｎｄが以下の式（５）を満足することが望ましい。

Δｎｄ＝（ｍ＋０．５）／２×λａ　　（５）

このように、特定波長での点像分布であっても、各層のＬＰＦの位相差や光線分離方向を制御すれば、対称性の高い点像分布を得ることができる。

【００５８】

各層のＬＰＦの材料としては、様々な材料を用いることができる。例えば、水晶、サファイア、ニオブ酸リチウム等の透明な一軸異方性結晶材料を用いることができ、Ｎ層のＬＰＦにおいてこれらの材料を組み合わせて用いてもよい。また、結晶材料以外にも、液晶を用いてＬＰＦを構成したり構造複屈折を用いてＬＰＦを構成したりしてもよい。

【００５９】

以下、上述した光学ローパスフィルタの具体的な実施例（数値例）について説明する。

【実施例１】

【００６０】

本発明の実施例１（数値例１）の光学ローパスフィルタについて説明する。表１に本実

施例の光学ローパスフィルタの構成を示す。本実施例の光学ローパスフィルタ１０は、図１に示すように、水晶により形成されたＬＰＦ１～４をこの順で光軸方向に積層して構成されている。表１に示すように、ＬＰＦ１～４の光線分離方向はそれぞれ、ｘ方向に対して２２５°、０°、１３５°、２７０°である。また、ＬＰＦ１～４の光線分離幅は全て等しい２．１０μｍである。

【００６１】

第３層のＬＰＦ３における点像の位相差分布は図４の３段目に示す通りである。位相差が最大の点像と最小の点像間の距離Ｄｓは０．８７０μｍであり、これは０．１３８Ｄａに相当するため、条件式（１）が満たされている。

【００６２】

また、使用波長域の最短波長４６０ｎｍと最長波長６４０ｎｍにおいて各層のＬＰＦで生じる位相差をこれら４６０ｎｍと６４０ｎｍで除した値の差は１．１１８であるため、条件式（２）が満たされている。

【００６３】

本実施例の光学ローパスフィルタの点像強度分布を図６に示す。この点像強度分布は、Ｆ２．０に相当する光束を光学ローパスフィルタに入射させたときの焦点位置での分布を示す。波長については４６０ｎｍから６４０ｎｍの範囲で平均化した結果である。１６点分離とは異なるものの、各方位に対してむらが少ない点像分布が得られていることが分かる。

【００６４】

また、図６の点像強度分布の空間周波数特性（ＭＴＦ）を図８に示す。図８中の４つの線はそれぞれ、水平方向（ｘ）、垂直方向（ｙ）、＋４５°方向（Ｐ）、－４５°方向（Ｎ）のＭＴＦを示している。本実施例のＭＴＦは、全ての方向に対して対称な分布を示している。

【００６５】

本実施例の光学ローパスフィルタでは、ナイキスト周波数Ｆｎは約１１０／ｍｍとしていることから、対角方向に生じる色モアレを適度に抑制しつつ、水平および垂直方向の解像感を高めることができる。

【００６６】

これに対して比較例１の光学ローパスフィルタの構成を表２に示す。この比較例では、光線分離幅および位相差は実施例１と同じであるが、光線分離方向が異なっている。距離Ｄｓは５．０７０μｍとなり、これは０．８０５Ｄａに相当するため、条件式（１）を満足しない。

【００６７】

比較例１の点像強度分布を図７に、ＭＴＦのグラフを図９にそれぞれ示す。比較例１の点像分布は中心付近の一部に偏りが生じている。これにより水平方向（ｘ）と－４５°方向（Ｎ）のＭＴＦが高めになっている。これは、水平方向（ｘ）と－４５°方向（Ｎ）に射影した点像分布が、設計値に比べて分布形状が中心部に集中しているためである。また全体的に２００ｌｐ／ｍｍ以上の高周波域のＭＴＦの落ちが十分ではない。その結果、特定の方向において色モアレが増大したり、高周波の折り返りモアレが生じたりするおそれがある。

【００６８】

本実施例によれば、多点分離型光学ローパスフィルタの点像分布を均一化させることができ、点像分布の対称性が高く、かつ設計値に近い光学ローパスフィルタを得ることができる。

【実施例２】

【００６９】

本発明の実施例２（数値例２）の光学ローパスフィルタについて説明する。表３に本実施例の光学ローパスフィルタの構成を示す。本実施例は、実施例１に比べてＬＰＦ１～４の光線分離幅が１．５０μｍと小さくなっている。また、ＬＰＦ１～４の光線分離方向は

それぞれ、ｘ方向に対して４５°、１８０°、３１５°、９０°である。ＬＰＦ１～４の光線分離幅は全て等しい１．７５μｍである。

【００７０】

距離Ｄｓは、０．７２５μｍであり、これは０．１３８Ｄａに相当するため、条件式（１）を満足する。また、使用波長域の最短波長４６０ｎｍと最長波長６４０ｎｍにおいて各層のＬＰＦで生じる位相差をこれら４６０ｎｍと６４０ｎｍで除した値の差は０．７９８であるため、条件式（２）が満たされている。

【００７１】

本実施例の光学ローパスフィルタの点像強度分布を図１０に示す。この点像強度分布は、Ｆ２．０に相当する光束を光学ローパスフィルタに入射させたときの焦点位置での分布を示す。実施例１に比べて点像同士が近づいたために、それらの干渉によって点像強度分布は一様なガウス分布に近い形状になっている。

【００７２】

また、図１０の点像の空間周波数特性（ＭＴＦ）を図１１に示す。図１１中の４つの線で示すＭＴＦの意味は実施例１と同じである。本実施例のＭＴＦは全ての方向に対して対称な分布を示している。本実施例の光学ローパスフィルタにおいては、ナイキスト周波数Ｆｎは約１５０／ｍｍとしていることから、対角方向に生じる色モアレを適度に抑制しつつ、水平および垂直方向の解像感を高めることができる。

【実施例３】

【００７３】

本発明の実施例３（数値例３）の光学ローパスフィルタについて説明する。表４に本実施例の光学ローパスフィルタの構成を示す。本実施例は、実施例１に比べてＬＰＦ１～４の光線分離幅が３．０３μｍと大きくなっている。また、ＬＰＦ１～４の光線分離方向は、ｘ方向に対して１３５°、０°、２２５°、９０°である。また、ＬＰＦ１～４の光線分離幅は全て等しい３．０３μｍである。

【００７４】

距離Ｄｓは、１．２５５μｍであり、これは０．１３８Ｄａに相当するため、条件式（１）を満足する。また、使用波長域の最短波長４６０ｎｍと最長波長６４０ｎｍにおいて各層のＬＰＦで生じる位相差をこれら４６０ｎｍと６４０ｎｍで除した値の差は１．６１３であるため、条件式（２）が満たされている。

【００７５】

本実施例の光学ローパスフィルタの点像強度分布を図１２に示す。この点像強度分布は、Ｆ４．０に相当する光束を光学ローパスフィルタに入射させたときの焦点位置での分布を示す。点像分布に若干の偏りがあるものの、対称性が高く均一な分布が得られている。

【００７６】

また、図１２の点像の空間周波数特性（ＭＴＦ）を図１３に示す。図１３中の４つの線で示すＭＴＦの意味は実施例１と同じである。本実施例のＭＴＦは全ての方向に対して対称な分布を示しており、高周波域まで均一にＭＴＦを抑制している。本実施例の光学ローパスフィルタにおいては、ナイキスト周波数Ｆｎは約８０／ｍｍとしていることから、対角方向に生じる色モアレを適度に抑制しつつ、水平および垂直方向の解像感を高めることができる。

【実施例４】

【００７７】

本発明の実施例４（数値例４）の光学ローパスフィルタについて説明する。図１４および表５に本実施例の光学ローパスフィルタの構成を示す。図１４に示すように、本実施例の光学ローパスフィルタ４０は、それぞれ水晶により形成された５層のＬＰＦ３１～３５が光軸方向にこの順で積層されることにより構成されている。ＬＰＦ３１～３５の光線分離方向はそれぞれ、ｘ方向に対して１８０°、４５°、９０°、３１５°、９０°であり、ＬＰＦ３１とＬＰＦ３５の光線分離方向が同一となっている。また、ＬＰＦ３１とＬＰＦ３５の光線分離幅（１．３２μｍ）が、他のＬＰＦ３２～３４の光線分離幅（２．６４

μｍ）の半分となっている。

【００７８】

本実施例のローパスフィルタ４０は、５層のＬＰＦ３１～３５を有するため、本来は入射光線を３２点に分離する構成である。しかし、そのうち８点が同一位置に重なるため、２４点分離の光学ローパスフィルタとなっている。このため、幾何光学的な点像分布はｘ方向とｙ方向とで正確には同一ではないが、光線分離幅はｘ方向とｙ方向とで同じとなっている。

【００７９】

本実施例において、Ｄｓは１．７１４μｍとなり、これは０．１８６Ｄａに相当するので、条件式（１）を満足する。また。条件式（２）の値は、ＬＰＦ３１，３２，３４で１．４０４、ＬＰＦ３３，３５で０．７０１となり、条件式（２）が満たされている。

【００８０】

本実施例の光学ローパスフィルタ４０の点像強度分布を図１５に示す。この点像強度分布は、Ｆ２．０に相当する光束を光学ローパスフィルタに入射させたときの焦点位置での分布を示す。点像分布に若干の偏りがあるものの、対称性が高く均一な分布が得られている。

【００８１】

図１５の点像の空間周波数特性（ＭＴＦ）を図１６に示す。図中の４つの線で示すＭＴＦの意味は実施例１と同じである。前述したように、本実施例における点像分布は、ｘ方向とｙ方向とで光線分離回数が異なるために２方向に対して幾何光学的に等しい点像分布とはならない。しかし、点像間の干渉が強く影響する領域では４方向のＭＴＦは比較的対称な分布を示す。このため、本実施例によれば、点像分布の対称性が高く均一な光学ローパスフィルタが得られる。

【実施例５】

【００８２】

本発明の実施例５（数値例５）の光学ローパスフィルタについて説明する。図１７および表６に本実施例の光学ローパスフィルタ５０の構成を示す。本実施例の光学ローパスフィルタ５０は、それぞれｙ方向とｘ方向に光線分離幅Ｄｂで点像分離を行う第２および第４のＬＰＦ４２，４４と、それぞれ対角方向に光線分離幅Ｄｃ（Ｄｃ＞Ｄｂ）で点像分離を行う第１および第３のＬＰＦ４１，４３とを有する。第１から第４のＬＰＦ４１，４２，４３，４４が光軸方向にこの順で交互に積層されている。

【００８３】

第１から第４のＬＰＦ４１，４２，４３，４４の光線分離方向は、順に、ｘ方向に対して４５°、１８０°、３１５°、９０°である。第２および第４のＬＰＦ４２，４４の材料は水晶であり、第１および第３のＬＰＦ４１，４３の材料はニオブ酸リチウム（ＮｂＬｉO_3）である。第２および第４のＬＰＦ４２，４４の光線分離幅は１．７３μｍであり、第１および第３のＬＰＦ４１，４３の光線分離幅は３．４８μｍである。

【００８４】

距離Ｄｓは３．１９１μｍであり、これは０．３６７Ｄａに相当するので、条件式（１）が満たされている。また、使用波長域の最短波長４６０ｎｍと最長波長６４０ｎｍにおいて少なくとも１層のＬＰＦで生じる位相差をこれら４６０ｎｍと６４０ｎｍで除した値の差は、第２および第４のＬＰＦ４２，４４で約１．０３８となり、条件式（２）が満たされている。

【００８５】

本実施例の光学ローパスフィルタ５０の点像強度分布を図１８に示す。この点像強度分布は、Ｆ４．０に相当する光束を光学ローパスフィルタに入射させたときの焦点位置での分布を示す。本実施例の光学ローパスフィルタでは、水平および垂直方向の光線分離幅と対角方向の光線分離幅とを異ならせることで、対角色モアレの抑制と水平および垂直方向の解像感とを両立する構成としている。ＭＴＦは水平および垂直方向、さらに対角２方向のそれぞれで均一な分布が得られている。

【００８６】
図１８の点像の空間周波数特性（ＭＴＦ）を図１９に示す。図中の４つの線で示すＭＴＦのうち、水平垂直成分に対するＭＴＦは高周波に渡ってなだらかに低下する傾向を示している。対角方向のＭＴＦは１４０ｌｐ／ｍｍ付近で落ちており、この付近に発生する偽色を抑制しつつ水平垂直の解像度を高周波まで維持できる構成となっている。なお、対角成分には２２０ｌｐ／ｍｍで折り返りが発生しているが、従来の４点分離等に比べると低く抑えられている。
【実施例６】
【００８７】
図２０には、本発明の実施例６である撮像装置１００の構成を示す。撮像装置１００は、上述した実施例１～５の光学ローパスフィルタ８１を、撮像光学系８３と撮像素子８２との間に配置した構成を有する。撮像光学系８３を通過し、さらに光学ローパスフィルタ８１を通過した光束により光学像が撮像素子８２上に形成される。撮像素子８２は、該光学像を光電変換して画像信号を生成する。
【００８８】
撮像素子８２はＲ、ＧおよびＢ画素からなるベイヤー配列の画素配列を有し、特に対角（斜め）方向の空間高周波領域において色モアレが発生しやすい。また、高周波領域における折り返りの輝度モアレ等も懸念される。これらの課題に対して、実施例１～５の光学ローパスフィルタ８１を用いることにより、対角方向、水平方向および垂直方向のそれぞれに対して良好な色モアレや輝度モアレの抑制効果を付与することができる。光学ローパスフィルタ８１の構成は、撮像素子８２の画素ピッチや撮像装置１００の構成に応じて適切に選択すればよい。
【００８９】
以上説明した各実施例は代表的な例にすぎず、本発明の実施に際しては、各実施例に対して種々の変形や変更が可能である。
【００９０】
例えば、各層のＬＰＦに対して異なる材料、例えば水晶とニオブ酸リチウムを組み合わせてもよい。また、層数についても厚みやコストの許容度に応じて６層以上であってもよい。層数が多い方が点像分布の全体が平滑化するが、干渉の影響も増大するため、上述した各条件式を満足することにより、点像分布の対称性が高く均一な光学ローパスフィルタが得られる。
【００９１】
また、光学ローパスフィルタの強度は光線分離幅に比例するが、光線分離幅全体をスケーリングすることでもカットオフとなる空間周波数を制御することができる。水平および斜め方向を含んだ全体のカットオフ周波数をシフトできる。水平方向と斜め方向を独立に制御したい場合は、点像の斜め方向分離と水平分離とを個別に制御すればよく、抑制したい周波数域と方位に応じて光線分離幅を適切に選択することが望ましい。
【００９２】
【表１】

（実施例１）

実施例1	材質	分離方向 [deg]	分離幅[um]	位相差[nm] @460nm	位相差[nm] @550nm	位相差[nm] @640nm
LPF1	水晶	45	2.10	1670	1631	1608
LPF2	水晶	180	2.10	1670	1631	1608
LPF3	水晶	315	2.10	1670	1631	1608
LPF4	水晶	90	2.10	1670	1631	1608

【００９３】
【表２】
（比較例１）

比較例1	材質	分離方向[deg]	分離幅[um]	位相差[nm]@460nm	位相差[nm]@550nm	位相差[nm]@640nm
LPF1’	水晶	45	2.10	1670	1631	1608
LPF2’	水晶	0	2.10	1670	1631	1608
LPF3’	水晶	315	2.10	1670	1631	1608
LPF4’	水晶	270	2.10	1670	1631	1608

【００９４】
【表３】
（実施例２）

実施例2	材質	分離方向[deg]	分離幅[um]	位相差[nm]@460nm	位相差[nm]@550nm	位相差[nm]@640nm
LPF1	水晶	45	1.75	1193	1165	1149
LPF2	水晶	180	1.75	1193	1165	1149
LPF3	水晶	315	1.75	1193	1165	1149
LPF4	水晶	90	1.75	1193	1165	1149

【００９５】
【表４】
（実施例３）

実施例3	材質	分離方向[deg]	分離幅[um]	位相差[nm]@460nm	位相差[nm]@550nm	位相差[nm]@640nm
LPF1	水晶	135	3.03	2410	2354	2321
LPF2	水晶	0	3.03	2410	2354	2321
LPF3	水晶	225	3.03	2410	2354	2321
LPF4	水晶	90	3.03	2410	2354	2321

【００９６】

【表５】

（実施例４）

実施例4	材質	分離方向[deg]	分離幅[um]	位相差[nm]@460nm	位相差[nm]@550nm	位相差[nm]@640nm
LPF31	水晶	180	2.64	2099	2051	2022
LPF32	水晶	45	2.64	2099	2051	2022
LPF33	水晶	90	1.32	1049	1025	1011
LPF34	水晶	315	2.64	2099	2051	2022
LPF35	水晶	90	1.32	1049	1025	1011

【００９７】

【表６】

（実施例５）

実施例5	材質	分離方向[deg]	分離幅[um]	位相差[nm]@460nm	位相差[nm]@550nm	位相差[nm]@640nm
LPF41	LiNbO3	45	3.48	12967	11828	11346
LPF42	水晶	180	1.73	1552	1516	1495
LPF43	LiNbO3	315	3.48	12967	11828	11346
LPF44	水晶	90	1.73	1552	1516	1495

【００９８】

表７に、各実施例における各条件式の値を示す。なお、実施例４，５については、複屈折光学素子の材質ごとに、上下段に分けて数値を記載している。また、条件式（３）については、各波長に対する位相差δｓの夫々に関する値を示している。表７に示す通り、何れの実施例においても条件式（３）が満たされている。

【００９９】

【表７】

	条件式(1)	条件式(2)	条件式(3)		
実施例1	Ds=0.870 (=0.138Da)	1.118	1.021	0.997	0.983
比較例1	Ds=5.070 (=0.805Da)	1.118	1.021	0.997	0.983
実施例2	Ds=0.725 (=0.138Da)	0.798	0.729	0.712	0.703
実施例3	Ds=1.255 (=0.138Da)	1.613	1.474	1.439	1.419
実施例4	Ds=1.714 (=0.186Da)	1.404	1.283	1.254	1.236
		0.701	0.641	0.627	0.618
実施例5	Ds=3.191 (=0.367Da)	10.461	7.928	7.232	6.937
		1.038	0.949	0.927	0.914

【符号の説明】

【０１００】

１，２，３，４　光学異方性層

６　入射光線

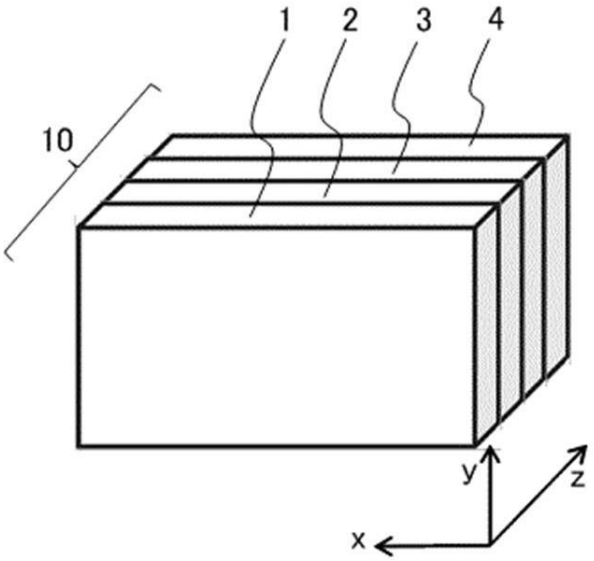
７　常光線

８　異常光線

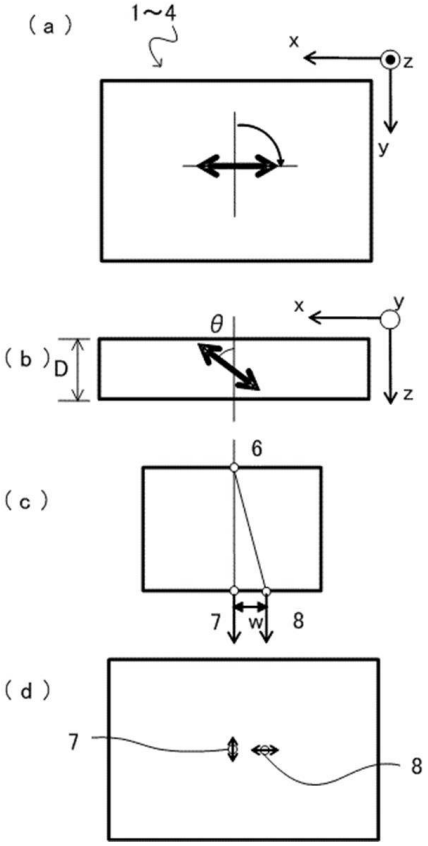
１０，４０，５０　光学ローパスフィルタ

【図面】

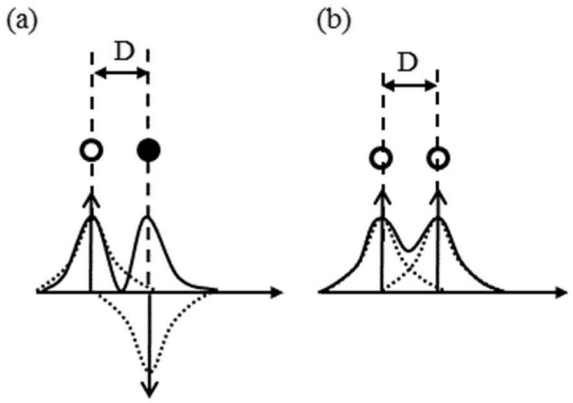
【図１】



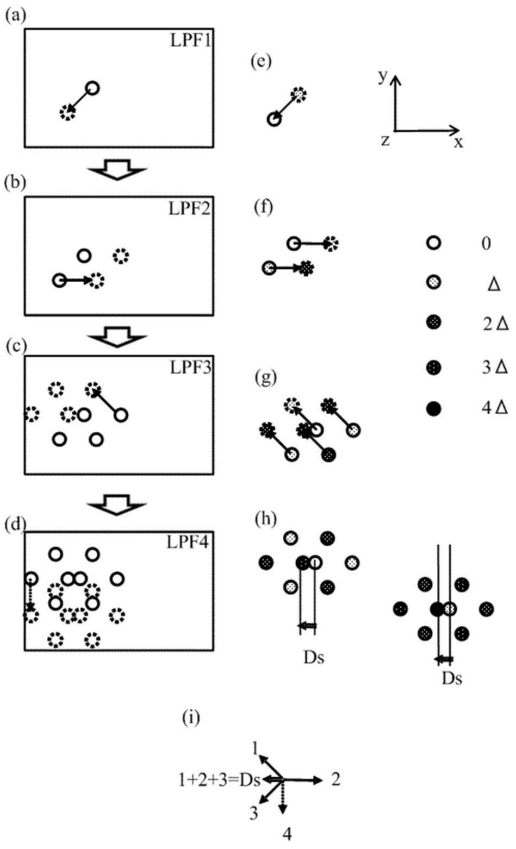
【図２】



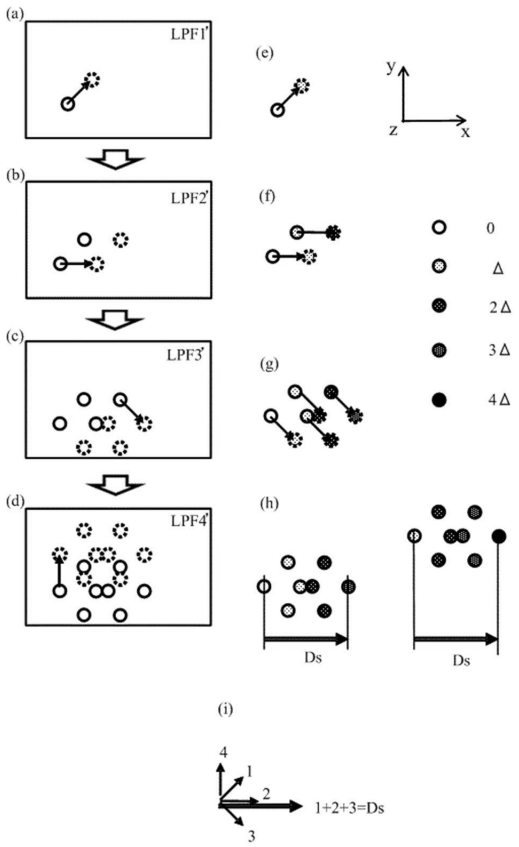
【図３】



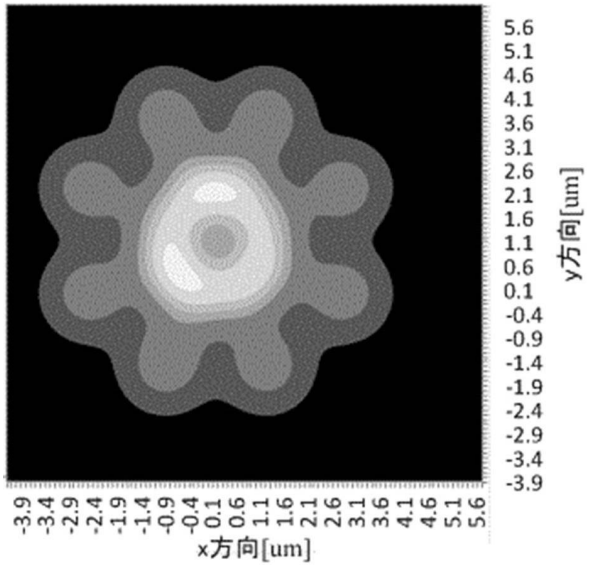
【図４】



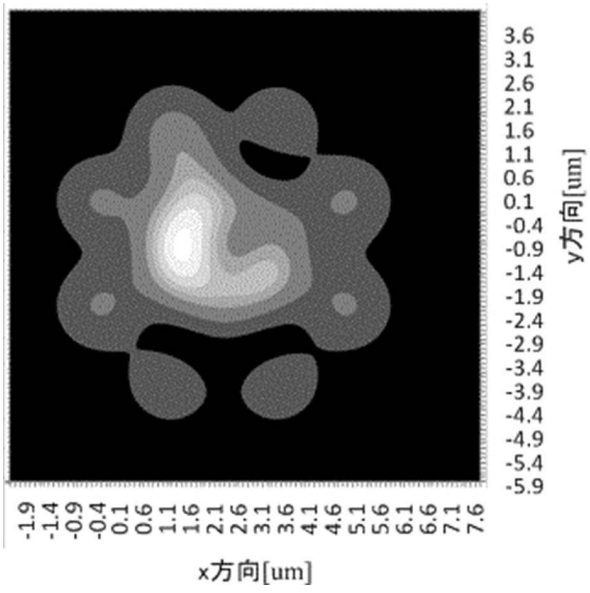
【図５】


(a)
LPF1'
(b)
LPF2'
(c)
LPF3'
(d)
LPF4'
(e)
y
z
x
(f)
0
Δ
2Δ
3Δ
4Δ
(g)
(h)
Ds
Ds
(i)
4
1
2
3
1+2+3=Ds

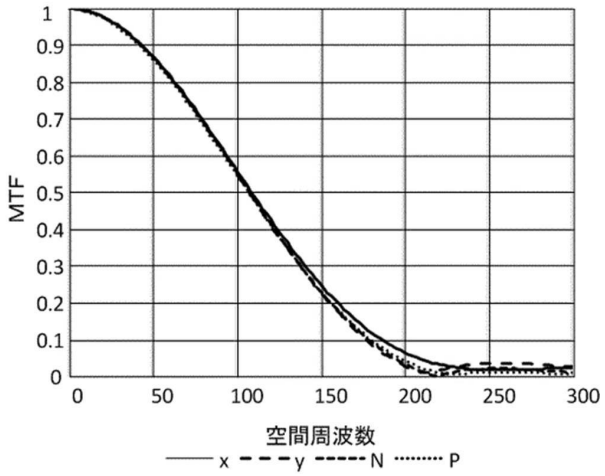
【図６】


5.6
5.1
4.6
4.1
3.6
3.1
2.6
2.1
1.6
1.1
0.6
0.1
-0.4
-0.9
-1.4
-1.9
-2.4
-2.9
-3.4
-3.9
y方向[um]
-3.9 -3.4 -2.9 -2.4 -1.9 -1.4 -0.9 -0.4 0.1 0.6 1.1 1.6 2.1 2.6 3.1 3.6 4.1 4.6 5.1 5.6
x方向[um]

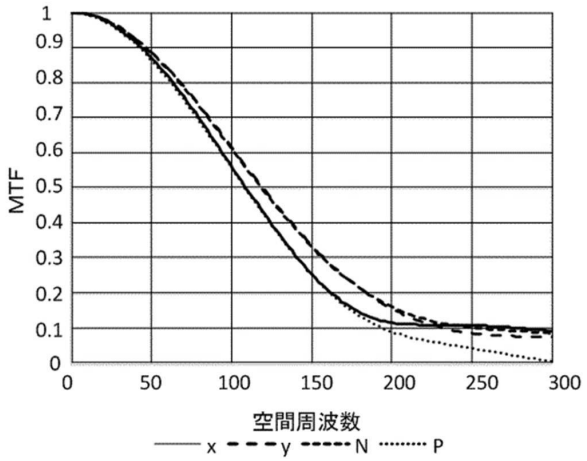
【図７】


3.6
3.1
2.6
2.1
1.6
1.1
0.6
0.1
-0.4
-0.9
-1.4
-1.9
-2.4
-2.9
-3.4
-3.9
-4.4
-4.9
-5.4
-5.9
y方向[um]
-1.9 -1.4 -0.9 -0.4 0.1 0.6 1.1 1.6 2.1 2.6 3.1 3.6 4.1 4.6 5.1 5.6 6.1 6.6 7.1 7.6
x方向[um]

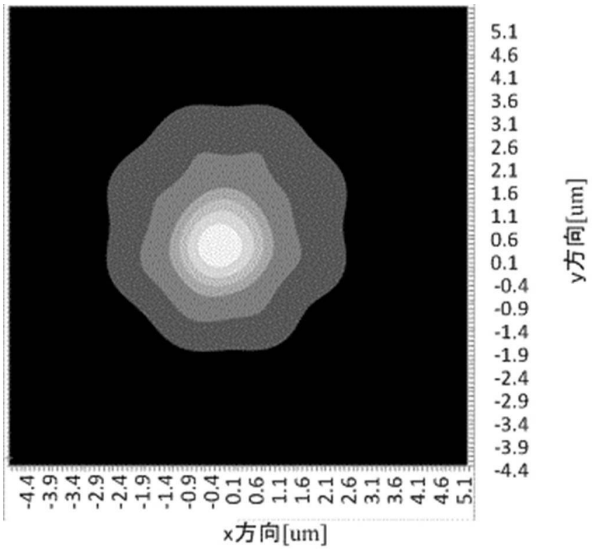
【図８】


1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
MTF
0 50 100 150 200 250 300
空間周波数
x y N P

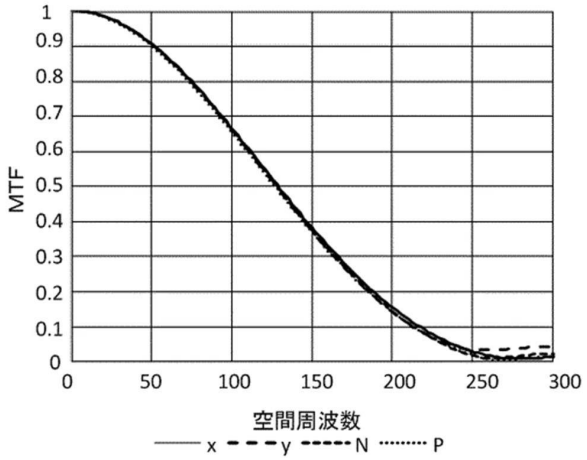
【図９】



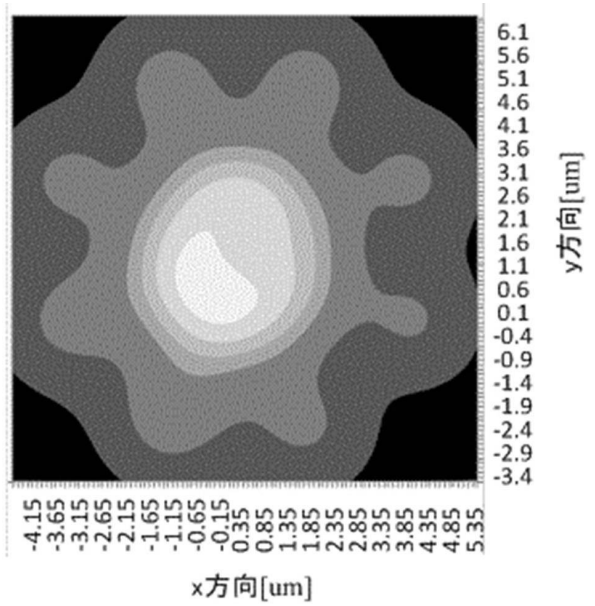
【図１０】



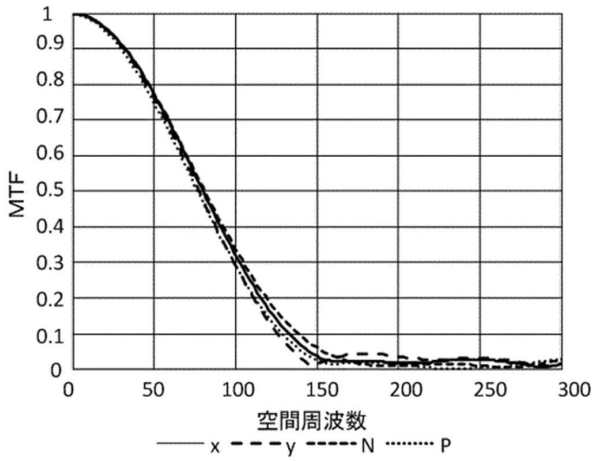
【図１１】



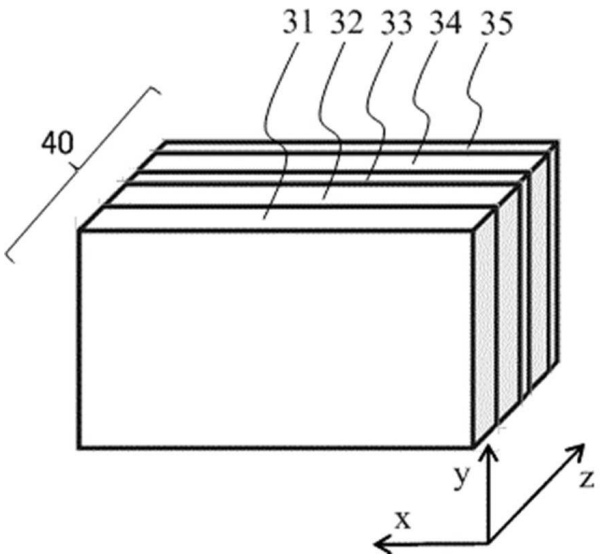
【図１２】



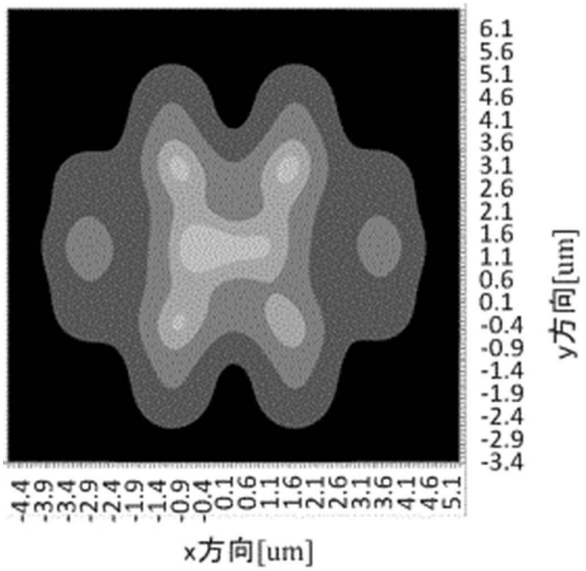
【図１３】



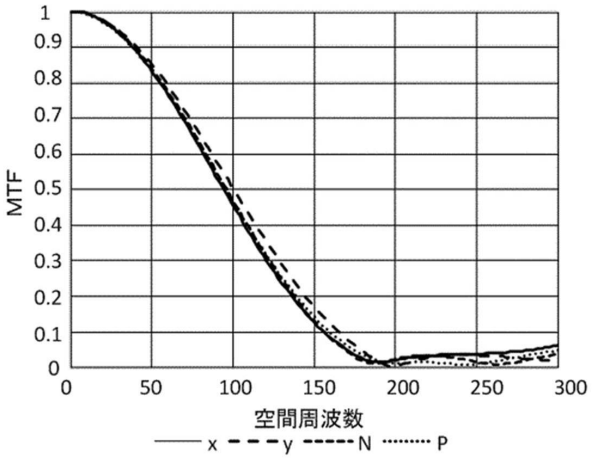
【図１４】



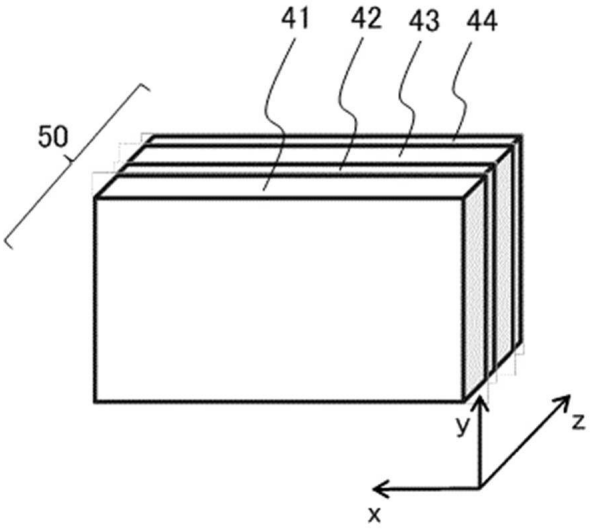
【図１５】



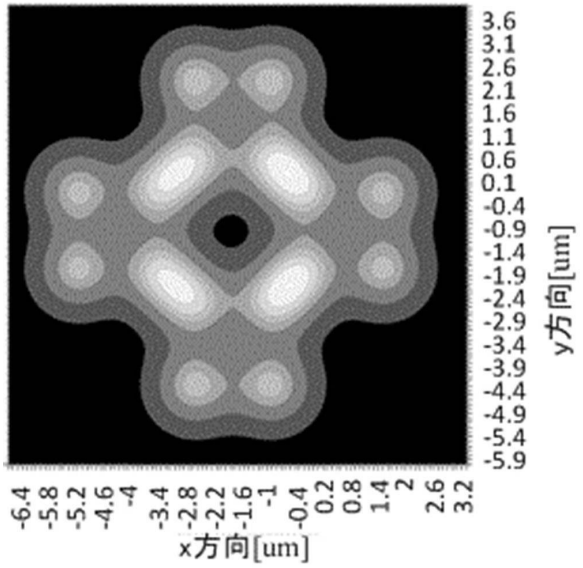
【図１６】



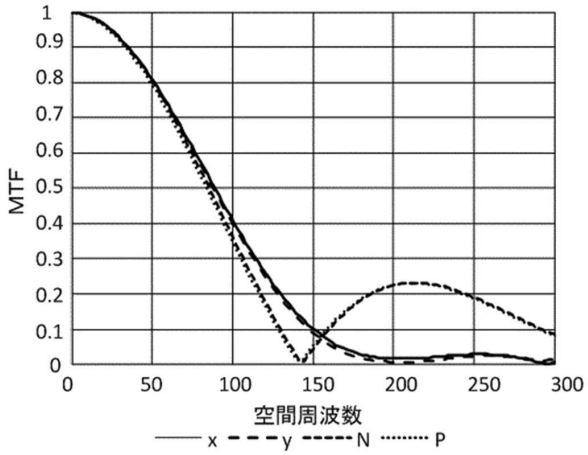
【図１７】



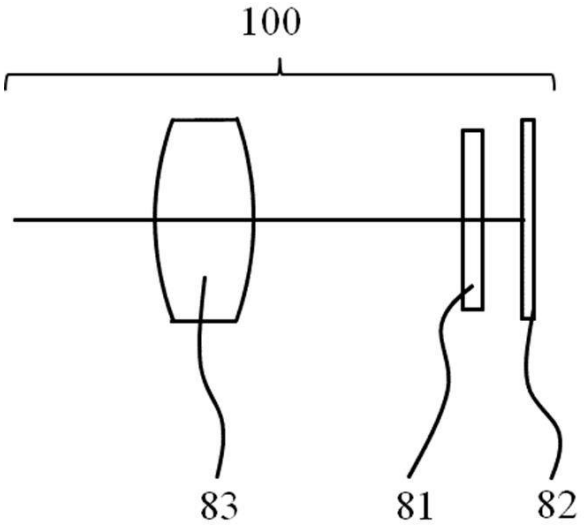
【図１８】



【図１９】



【図２０】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開２００４－１２５８５７（ＪＰ，Ａ）
実開昭６２－０４３３２８（ＪＰ，Ｕ）
特開２０１５－１７９１７４（ＪＰ，Ａ）
国際公開第０１／０６５３０６（ＷＯ，Ａ１）
特開昭６０－２４２４２０（ＪＰ，Ａ）
特開平１０－２２９５２５（ＪＰ，Ａ）
特開２００１－２７２６３２（ＪＰ，Ａ）
特開平０６－１６９４１５（ＪＰ，Ａ）
特開２００６－０９１６２５（ＪＰ，Ａ）
特開２００３－３２９９７９（ＪＰ，Ａ）
米国特許出願公開第２００９／００９６９１５（ＵＳ，Ａ１）
中国実用新案第２０１１８１３６２（ＣＮ，Ｙ）
特開昭６０－２３０１１６（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野 (Int.Cl.，ＤＢ名)

Ｇ０２Ｂ ５／３０
Ｇ０２Ｂ２７／４６
Ｈ０４Ｎ ５／２２５
Ｈ０４Ｎ ５／３３５