

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5836686号
(P5836686)

(45) 発行日 平成27年12月24日(2015.12.24)

(24) 登録日 平成27年11月13日(2015.11.13)

(51) Int.Cl.	F 1
GO 2 B 17/08 (2006.01)	GO 2 B 17/08 A
GO 2 B 21/00 (2006.01)	GO 2 B 21/00

請求項の数 9 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2011-165389 (P2011-165389)	(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
(22) 出願日	平成23年7月28日(2011.7.28)	(74) 代理人	100086818 弁理士 高梨 幸雄
(65) 公開番号	特開2013-29654 (P2013-29654A)	(72) 発明者	前澤 功児 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
(43) 公開日	平成25年2月7日(2013.2.7)		
審査請求日	平成26年7月25日(2014.7.25)	審査官	井 亀 諭

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 反射屈折光学系及びそれを有する撮像装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

物体からの光束を集光する反射屈折部を含む第1結像光学系と、前記第1結像光学系からの光束を用いて前記物体の像を形成する屈折部を含む第2結像光学系と、を有する反射屈折光学系であって、

前記第1結像光学系を通過した光束により前記物体の中間像が形成され、前記第2結像光学系により前記中間像が再結像されており、

前記第1結像光学系は、光軸周辺に設けられた第1の透過部と物体側の面に設けられた第1の反射部とを含む第1の光学素子と、光軸周辺に設けられた第2の透過部と像側の面に設けられた第2の反射部とを含む第2の光学素子と、前記第1の光学素子と前記第2の光学素子との間に配置された開口絞りと、を備え、

前記物体からの光束は、前記第1の透過部、前記開口絞り、前記第2の反射部、前記開口絞り、前記第1の反射部、前記開口絞り、前記第2の透過部、を順に介して前記第2結像光学系に入射しており、

前記第1の光学素子と前記開口絞りとの光軸上における距離を t_1 、前記開口絞りと前記第2の光学素子との光軸上における距離を t_2 、前記第1結像光学系の焦点距離を f_1 、とするとき、

$$0.00 < t_1 / f_1 < 0.25$$

$$2.3 < t_2 / t_1$$

なる条件を満足することを特徴とする反射屈折光学系。

【請求項 2】

前記第 1 の光学素子は両凸形状であり、前記第 2 の光学素子は物体側の面が凹面のメニスカス形状であることを特徴とする請求項 1 に記載の反射屈折光学系。

【請求項 3】

前記第 1 及び第 2 の反射部は非球面形状であることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の反射屈折光学系。

【請求項 4】

前記第 2 の結像光学系は、前記物体からの光束のうち前記第 1 の反射部及び第 2 の反射部を介さずに前記第 1 及び第 2 の透過部を通過する光束を遮光する遮光部を有することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の反射屈折光学系。

10

【請求項 5】

光源手段と、該光源手段からの光束により前記物体を照明する照明光学系と、前記物体の像を形成する請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の反射屈折光学系と、該反射屈折光学系により形成された前記物体の像を光電変換する撮像素子と、を備えることを特徴とする撮像装置。

【請求項 6】

前記反射屈折光学系は収差補正用の少なくとも 1 つのレンズを有し、該少なくとも 1 つのレンズを光軸に沿って移動させる駆動手段を備えることを特徴とする請求項 5 に記載の撮像装置。

【請求項 7】

前記駆動手段は、環境温度に応じて前記少なくとも 1 つのレンズを移動させることにより、前記反射屈折光学系の収差の変動を低減することを特徴とする請求項 6 に記載の撮像装置。

20

【請求項 8】

前記撮像素子からのデータより画像情報を生成する画像処理系を備えることを特徴とする請求項 5 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の撮像装置。

【請求項 9】

前記画像情報を表示する表示手段を備えることを特徴とする請求項 8 に記載の撮像装置。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0001】

本発明は試料（物体）を拡大し、観察する際に好適な反射屈折光学系及びそれを有する撮像装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

現在の病理検査では、光学顕微鏡を用いて病理標本（試料）を直接、人の目で観察している。近年、病理標本を画像データとして取り込み、ディスプレイ上で観察するバーチャル顕微鏡と呼ばれるものが利用されている。バーチャル顕微鏡では病理標本の画像データをディスプレイ上で観察できるため、複数人で同時に観察することができる。またこのバーチャル顕微鏡を用いると画像データを遠方の病理医と共有して診断を仰ぐこともできるなど多くの利点がある。しかし、この方法は病理標本を撮像して画像データとして取り込むためには時間がかかるという問題があった。

40

【0003】

時間がかかる原因の 1 つとして、大きな撮像範囲の病理標本を顕微鏡の狭い撮像領域を用いて画像データとして取り込まねばならないことが挙げられる。顕微鏡の撮像領域が狭い場合、複数回撮像して、もしくはスキャンしながら撮像してそれらを繋げることで一枚の画像とする必要がある。従来より撮像回数を少なくして画像データを取り込む時間を短縮するために、広い撮像領域を持った光学系（撮像光学系）が求められている。

【0004】

50

この他、病理標本を観察する上で、広い撮像領域が求められていると同時に可視領域（広い波長域）での高い解像力を持った光学系が要望されている。高い解像力を持った光学系は病理診断の用途に限らず様々な分野で要望されている。屈折光学系より成り可視光全域に渡って収差を良好に低減した生体細胞などの観察に好適な顕微鏡対物レンズが知られている（特許文献１）。

【０００５】

また集積回路やフォトマスクに存在する欠陥を検査するため反射屈折光学系を用いて紫外の広波長帯域に渡って高い解像力を有した超広帯域紫外顕微鏡映像システムが知られている（特許文献２）。また、広い領域に微細なパターンを露光して半導体素子を製造するのに好適な反射屈折光学系が知られている（特許文献３）。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００６】

【特許文献１】特公昭６０－０３４７３７号公報

【特許文献２】特表２００７－５１４１７９号公報

【特許文献３】ＷＯ００／０３９６２３

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００７】

可視光全域に渡って収差を良好に低減するのに好適な光学系として反射光学系と屈折光学系を組み合わせた反射屈折光学系（カタディオプトリック光学系）がある。この反射屈折光学系では、面形状に対するペッツバル和の効き方が反射面と屈折面で反対となることを利用し、集光作用を持つ凹反射面と凸レンズを組み合わせることでコンパクトな光学系としながら可視光全域に渡って収差を良好に低減している。

20

【０００８】

この反射屈折光学系には、試料を拡大して観察するための、観察領域が大きく、かつ広い波長範囲にわたり高い光学性能を有することが求められている。多くの反射屈折光学系では光学系の開口数の設定及び入射瞳及び射出瞳の設定のために光学系内の光路内に光束の周縁部を制限する開口絞りを設けている。反射屈折光学系において観察視野が広く、全視野が広く全視野にわたり高い光学性能を得るには、光束を制限する開口絞りの光軸上の位置を適切なる位置に配置することが重要になってくる。

30

【０００９】

開口絞りの位置が不適切であると、画面全体に入射する光束径を適切に制限することが困難となり、フレアーが増大し高い光学性能を得るのが難しくなる。

【００１０】

本発明は、広い観察視野にわたり高い光学性能が容易に得られる反射屈折光学系及びそれを有する撮像装置の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

【００１１】

本発明の反射屈折光学系は、物体からの光束を集光する反射屈折部を含む第１結像光学系と、前記第１結像光学系からの光束を用いて前記物体の像を形成する屈折部を含む第２結像光学系と、を有する反射屈折光学系であって、

40

前記第１結像光学系を通過した光束により前記物体の中間像が形成され、前記第２結像光学系により前記中間像が再結像されており、

前記第１結像光学系は、光軸周辺に設けられた第１の透過部と物体側の面に設けられた第１の反射部とを含む第１の光学素子と、光軸周辺に設けられた第２の透過部と像側の面に設けられた第２の反射部とを含む第２の光学素子と、前記第１の光学素子と前記第２の光学素子との間に配置された開口絞りと、を備え、

前記物体からの光束は、前記第１の透過部、前記開口絞り、前記第２の反射部、前記開口絞り、前記第１の反射部、前記開口絞り、前記第２の透過部、を順に介して前記第２結

50

像光学系に入射しており、

前記第 1 の光学素子と前記開口絞りとの光軸上における距離を t_1 、前記開口絞りと前記第 2 の光学素子との光軸上における距離を t_2 、前記第 1 結像光学系の焦点距離を f_1 、とするとき、

$$\frac{0.00 < t_1 / f_1 < 0.25}{2.3 < t_2 / t_1}$$

なる条件を満足することを特徴としている。

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、広い観察視野にわたり高い光学性能が容易に得られる反射屈折光学系が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図 1】本発明の撮像装置の概略断面図である。

【図 2】本発明の実施例 1 の反射屈折光学系のレンズ概略図である。

【図 3】本発明の実施例 1 の各像高における歪量を表した図である。

【図 4】本発明の実施例 1 の反射屈折光学系の収差図である。

【図 5】本発明の実施例 1 において第 2 結像光学系に開口絞りを配置した場合のレンズ概略図である。

【図 6】図 2 に示す反射屈折光学系における開口絞り位置における光束の形状の説明図である。

【図 7】図 5 に示す反射屈折光学系における開口絞り位置における光束の形状の説明図。

【図 8】本発明の実施例 2 の反射屈折光学系のレンズ概略図である。

【図 9】本発明の実施例 2 の反射屈折光学系の収差図である。

【図 10】図 8 に示す反射屈折光学系における開口絞り位置における光束の形状の説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

以下に、本発明の実施の形態を添付の図面に基づいて詳細に説明する。本発明の撮像装置 1000 は、光源手段 101 と、光源手段 101 からの光束で物体 103 を照明する照明光学系 102 と、物体 103 を結像する反射屈折光学系 104 を有している。更に反射屈折光学系 104 によって結像された物体像を光電変換する撮像素子 105 と、撮像素子 105 からのデータより画像情報を生成する画像処理系 106 と画像処理系 106 で生成した画像データを表示する表示手段 107 とを有する。

【0015】

また少なくとも 3 つのレンズの移動量と収差変動に関するデータを予め記憶する記憶手段 110 と、反射屈折光学系が置かれている環境の温度を測定する温度測定手段 108 を有する。更に、温度測定手段 108 で得られた温度情報と記憶手段 110 に記憶されているデータより、少なくとも 3 つのレンズ成分の環境変化によって生ずる収差変動を補正するための移動量を算出する算出手段 109 を有する。更に算出手段 109 で算出された移動量を用いて少なくとも 3 つのレンズ成分を移動可能とする駆動手段 111 を有する。

【0016】

また本発明の反射屈折光学系 104 は、物体 103 からの光束を集光する反射屈折部を含む第 1 結像光学系 G1 と、第 1 結像光学系 G1 からの光束を用いて物体の像を形成する屈折部を含む第 2 結像光学系 G2 とを有する。

物体 103 は第 1 結像光学系 G1 を通過した光束で中間像 IM が形成され、中間像 IM は像面 105 に再結像されている。

第 1 結像光学系 G1 は、光軸周辺に設けられた第 1 の透過部と物体側の面に設けられた第 1 の反射部とを含む第 1 の光学素子 M1 と、光軸周辺に設けられた第 2 の透過部と像側の面に設けられた第 2 の反射部とを含む第 2 の光学素子 M2 とを有する。第 1 の光学素子

10

20

30

40

50

M 1 と第 2 の光学素子 M 2 との間に開口絞り A S とを備えている。

【 0 0 1 7 】

第 1、第 2 の光学素子 M 1、M 2 は反射面側が向き合っている。

【 0 0 1 8 】

本発明の反射屈折光学系 1 0 4 は直径 3 mm 以上の視野領域を撮像する。図 1 は本発明の撮像装置の要部概略図である。図 2 は本発明の反射屈折光学系の実施例 1 の要部概略図である。図 3 は実施例 1 の第 1 結像光学系 G 1 内に開口絞り A S を配置した際の NA に対する歪量を表した説明図である。

【 0 0 1 9 】

開口絞り A S を配置する場所は瞳付近が一般的であるが、高画角な反射屈折光学系の場合、軸上と軸外の光束の光路が大きく異なることにより、瞳が歪む現象が生じる。ここで、瞳が歪む定義は軸上の NA に対して軸外の NA のずれの割合とする。図 4 は実施例 1 の収差図である。図 5 は実施例 1 の第 2 結像光学系 G 2 内に開口絞り A S を配置した場合の要部概略図である。

【 0 0 2 0 】

以下、図 1 を参照して、本発明の反射屈折光学系 1 0 4 を有する撮像装置 1 0 0 0 の構成について説明する。撮像装置 1 0 0 0 は、光源手段 1 0 1 からの光を照明光学系 1 0 2 によって集光して試料としての物体 1 0 3 を均一に照明する。このとき使用する光は可視光（例えば、波長 4 0 0 nm ~ 波長 7 0 0 nm）が用いられる。結像光学系は物体 1 0 3 の像を撮像素子 1 0 5 上に結像する反射部と反射部を有する反射屈折光学系 1 0 4 より成

【 0 0 2 1 】

撮像素子 1 0 5 で取得したデータ（画像情報）は、画像処理系 1 0 6 によって画像データを生成し、生成した画像データを表示手段 1 0 7 などに表示する。この他、記憶手段 1 1 0 に記憶している。画像処理系 1 0 6 では反射屈折光学系 1 0 4 で補正しきれなかった収差を補正したり、または、撮像位置の異なった画像データを繋げて一枚の画像データに合成したりするなど用途に応じた処理が行われる。

【 0 0 2 2 】

反射屈折光学系 1 0 4 内に配置された収差補正用のレンズ成分 1 1 2、1 1 3、1 1 4 は、各々を光軸に沿って移動させる駆動系（駆動手段）1 1 1 を備えた保持機構（不図示）によって保持されている。レンズ成分は単一レンズ又は複数のレンズより成っている。使用環境の温度の変化などにより反射光学系 1 0 4 の温度が変化した場合、温度変化による収差変化は光軸を中心とした回転対称である。このため、レンズ成分 1 1 2 ~ 1 1 4 を光軸に沿って移動することで補正している。

【 0 0 2 3 】

ここで、その温度に応じて少なくとも 3 つのレンズ成分を光軸に沿って移動させることにより、球面収差、コマ収差、非点収差などの諸収差の変動を低減している。これにより広い視野領域全域に渡って良好な画質を得ている。また、反射屈折光学系 1 0 4 の収差が良好に低減されることで、画像処理系 1 0 6 における収差補正の処理が不要になるなど、画像処理の計算負荷を低減している。

【 0 0 2 4 】

収差補正用のレンズ成分の光軸方向の移動は、顕微鏡使用者が表示手段 1 0 7 などに表示される画像データを確認しながら所望の画質が得られるよう手動で行ってもよいし、また、予め設定した収差補正フローに基づいて制御してもよい。

【 0 0 2 5 】

図 2 は図 1 の本発明に係る反射屈折光学系 1 0 4 の実施例 1 の要部断面図である。図 2 において、1 0 4 は反射屈折光学系、1 0 3 は試料としての物体面である。1 0 5 は撮像素子であり、像面に配置されている。A S は開口絞り、I M は中間像である。A X は反射屈折光学系 1 0 4 の光軸である。反射屈折光学系 1 0 4 は物体 1 0 3 からの光束を集光する開口絞り A S と、反射面を含む第 1 結像光学系 G 1 を有する。そして第 1 結像光学系 G

1からの光束を受けて物体の像を撮像素子105に結像する屈折面と遮光部SHを含む第2結像光学系G2を有する。

【0026】

第1結像光学系G1は、物体側から順に第1の光学素子(マンジャンミラー)M1、開口絞りAS、第2の光学素子(マンジャンミラー)M2を有している。第2結像光学系G2は、物体側から順にレンズ群G21、G22、遮光部SH、レンズ群G23～レンズG25を有している。第1結像光学系G1の第1の光学素子M1は、物体103側の面が凸形状で、光軸周辺が正の屈折力の光透過部(第1の透過部)M1T、周辺部のうち物体側の面(第1の反射部)M1aに反射膜を施し、裏面反射部としている。第1の光学素子M1は後述する数値実施例に示すように両凸形状である。

10

【0027】

第2の光学素子M2は物体側に凹面を向けたメニスカス形状で、光軸周辺が負の屈折力の光透過部(第2の透過部)M2T、周辺部のうち像側の面(第2の反射部)M2bに反射膜を施し、裏面反射部としている。第1の光学素子M1と第2の光学素子M2は互いに裏面反射部M1a、M2bが対向するように配置されている。第2の結像光学系G2は物体103からの光束のうち光軸近傍の光束を遮光し、撮像素子105に入射するのを防止する遮光板SHがレンズ群G22の近傍に配置されている。物体103からの光束は、第1の透過部M1T、開口絞りAS、第2の反射部M2b、開口絞りAS、第1の反射部M1a、開口絞りAS、第2の透過部M2Tを介して第2結像光学系G2に入射している。

【0028】

20

各実施例における第1結像光学系G1の第1の光学素子M1と第2の光学素子M2の間には開口絞りSPが配置されている。そして第1の光学素子M1と開口絞りASの光軸方向の距離を t_1 とする。開口絞りSPと第2の光学素子M2の光軸方向の距離を t_2 とする。第1結像光学系G1の焦点距離を f_1 とする。このとき、

$$0.00 < t_1 / f_1 < 0.25 \quad \cdots (1)$$

$$2.3 < t_2 / t_1 \quad \cdots (2)$$

なる条件を満足している。

【0029】

次に条件式(1)、(2)の技術的意味について説明する。条件式(1)は第1の光学素子M1と開口絞りASとの光軸方向の距離に関する。条件式(1)の上限値を超えて開口絞りASが第1の光学素子M1から離れすぎると第1結像光学系の瞳より離れ、歪量が大きくなる。または下限値を超えて開口絞りASが第1の光学素子M1に接近しすぎると $t_1 = 0$ となりASがM1に接触するので $0.00 < t_1 / f_1$ は必須条件である。

30

【0030】

条件式(2)は第1の光学素子M1と第2の光学素子M2との間に開口絞りASを配置するときの位置のバランスに関する。条件式(2)の下限値を超えて開口絞りASが第1の光学素子M1に接近しすぎるとASの位置がM1より20mm以上の距離となり、歪量が大きくなる。

【0031】

図2に示す反射屈折光学系104では、照明光学系102からの光束で照明され、物体103から出射した光束は第1の光学素子M1の中央透過部M1Tを通過する。その後、第2の光学素子M2の屈折面M2aに入射し、その後裏面反射部M2bで反射し、屈折面M2aを通過して第1の光学素子M1の屈折面M1bに入射する。

40

【0032】

その後、第1の光学素子M1の裏面反射部M1aで反射する。そして屈折面M1bを通過し、第2の光学素子M2の中央透過部M2Tを通過し、第2結像光学系G2側へ出射している。そして第2結像光学系G2のレンズ群G21のレンズL1の近傍に試料103の中間像IMを形成する。レンズ群G21のレンズL1はフィールドレンズの作用をしている。

【0033】

50

本実施例において、第1結像光学系G1の構成はこれに限定されるものではない。例えば、マンジャンミラーより成る第1、第2の光学素子M1、M2の替わりに、中心部に透過部を有する表面反射ミラーとレンズとの組み合わせで構成しても構わない。

【0034】

ここで、第1結像光学系G1に含まれる第1の光学素子M1の裏面反射部M1aと第2の光学素子M2の裏面反射部M2bはいずれも非球面形状より成っている。これにより、色収差の発生を抑えつつ、球面収差を良好に補正している。また高NA（口径比）でも、可視の広波長帯域に渡って諸収差を良好に低減している。

【0035】

また、第1の光学素子M1の裏面反射部M1aと第2の光学素子M2の裏面反射部M2bは、いずれも正の屈折力の反射面としている。これにより、第2結像光学系G2のレンズの正の屈折力を強くして光学系全長を短くしたときのペッツパール和の増大を軽減している。これはペッツパール和への効き方が反射面と屈折面で反対となるためである。

【0036】

第1の結像光学系G1からの光は、順に、正の屈折力のレンズ群G21（レンズL1～L8）、負の屈折力のレンズ群G22（レンズL9）、正の屈折力のレンズ群G23（レンズL10、L11）を通過する。更に負の屈折力のレンズ群G24（レンズL12、L13）、正の屈折力のレンズ群G25（レンズL14、L15）を通過する。そして撮像素子105上に物体103を倍率6で拡大結像している。

【0037】

さらに、遮光部SHは、レンズL9の物体103側の面をRa面、撮像素子105側の面をRb面としたとき、レンズL9のRb面上に配置されている。そして、物体103からの光が、第1の光学素子M1、及び、第2の光学素子M2で反射されることなく、第1、第2の光学素子M1、M2の中心透過部M1T、M2Tを通過して直接撮像素子105に到達することを防いでいる。

【0038】

この実施例1の反射屈折光学系104において、物体側の開口数NAは0.7、視野領域は直径28.2mmである。瞳の中抜けの割合は面積比で3割以下に抑えられている。物体側がテレセントリックとなっている。

【0039】

本実施例では、白色光での波面収差最悪値が20m rms以下に抑えられている。図4の収差図においては軸上物高（Y=0mm）、及び、最軸外物高（Y=14.1mm）の収差図を示している。実施例1は波長656.3nm、587.6nm、486.1nm、435.8nmにおいて収差は良好に抑えられている。試料103は直径3mm以上～直径30mm以下である。

【0040】

また、図5は図2に示す反射屈折光学系と同一のレンズ構成において、開口絞り（AS）の位置が第2結像光学系G2に配置したときの光路図である。図5に示す位置に開口絞りASを配置すると、開口絞りASの光束の形状は図7に示すように軸上と軸外では大きくずれることとなる。これを歪と呼び、仮に軸上の設定NAにおいて絞りの開口径を決定すると、軸外の光線がけられることになり、解像度、光量に影響し、光学性能を悪化させる原因となる。

【0041】

図3は、このときの歪の割合を示している。図3は横軸に像高および縦軸に歪量を示している。開口絞りASを第2結像光学系G2に屈折部に配置した場合、像高が大きくなるにつれて歪の量は大きくなり、10割像高では約5%程度歪む。それと比較して、開口絞りASを第1結像光学系G1に配置した場合、像高が大きくなってもほぼ設計値と変わらない歪量となっている。開口絞りASの光束の形状を図6に示す。軸上光線と軸外光線の位置ずれはほとんどない。

【0042】

10

20

30

40

50

本実施例において、開口絞り A S の位置は図 2 に示すように第 1 の光学素子 M 1 の近傍で凸レンズ M 1 の面 M 1 b からの距離が 20 mm 以内である。また、実施例 1 においては、

$$\begin{aligned} f_1 &= 89.2, \quad t_1 = 8, \quad t_2 = 73.57, \text{であり、} \\ t_1 / f_1 &= 0.09 \\ t_2 / t_1 &= 9.19 \end{aligned}$$

である。

【0043】

歪量が大きくなると光量や解像度に影響し、光学性能が悪化してしまうが、開口絞り A S を第 1 結像光学系 G 1 の条件式 (1) を満足する位置に配置することにより防ぐことが

10

容易となる。

【0044】

本実施例では、光学性能の悪化を防ぎ、広い領域に渡って高い解像力を持ち、可視光全域に渡って収差を良好に補正した反射屈折光学系を達成している。

【0045】

次に本発明の実施例 2 について説明する。図 8 に示す実施例 2 は図 2 の実施例 1 とレンズ構成は略同じである。実施例 2 の反射屈折光学系において、物体側の開口数 N A は 0.7 であって、倍率は 10 倍である。物体側がテレセントリックに構成されている。瞳の中抜けの割合が面積比で 3 割以下と抑えられている。また、白色光での波面収差最悪値が 20 m r m s 以下に抑えられている。図 9 に本実施例の収差図を示す。

20

【0046】

図 9 の収差図では軸上物高 (Y = 0 mm)、及び、最軸外物高 (Y = 7 mm) の収差図を示している。実施例 2 は、波長 656.3 nm、587.6 nm、486.1 nm、435.8 nm の各波長において収差は良好に抑えられている。試料 103 は直径 3 mm 以上 ~ 直径 30 mm 以下である。また、実施例 2 において開口絞り A S を第 1 結像光学系 G 1 に配置した場合、歪量は 1 % 以下である。本実施例における開口絞り A S の光束の形状を図 10 に示す。

【0047】

また、開口絞り A S の位置は図 8 に示すように第 1 の光学素子 M 1 の近傍で第 1 の光学素子 M 1 の面 M 1 b からの距離が 20 mm 以内である。また、実施例 2 に示す反射屈折光学系において、

30

$$\begin{aligned} f_1 &= 108, \quad t_1 = 13, \quad t_2 = 57.9, \text{であり、} \\ t_1 / f_1 &= 0.12 \\ t_2 / t_1 &= 4.45 \end{aligned}$$

である。

【0048】

以下、実施例 1 と実施例 2 の数値実施例を示す。面番号は物体面 (試料面) から像面まで数えた光学面の順である。r は第 i 番目の光学面の曲率半径である。d は第 i 番目と第 i + 1 番目の間隔である (符号は物体側から像面側へ測ったときを (光が進行するときを) 正、逆方向を負としている)。N d、 n_d は波長 587.6 nm に対する材料の屈折率とアッペ数をそれぞれ示している。非球面の形状は、以下の式に示す一般的な非球面の式で表される。

40

【0049】

以下の式において、Z は光軸方向の座標、c は曲率 (曲率半径 r の逆数)、h は光軸からの高さである。k は円錐係数、A、B、C、D、E、F、G、H、J・・・は各々、4 次、6 次、8 次、10 次、12 次、14 次、16 次、18 次、20 次、・・・の非球面係数である。

【0050】

【数 1】

$$Z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{(1+k)c^2h^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12} + Fh^{14} + Gh^{16} + Hh^{18} + Jh^{20} + \dots$$

【0051】

「E-X」は「10^{-X}」を意味する。前述した各条件式と数値実施例との関係を表3に示す。

【0052】

[数値実施例1]

面番号	r	d	Nd	d	
物体面		3.00			10
1	783.74	28.01	1.49	70.24	
2	-797.06	81.57			
3	-102.12	7.77	1.52	64.14	
4	-140.83	-7.77	1.52	64.14	
5	-102.12	-81.57			
6	-797.06	-28.01	1.49	70.24	
7	783.74	28.01	1.49	70.24	
8	-797.06	81.57			
9	-102.12	7.77	1.52	64.14	20
10	-140.83	3.49			
11	-154.32	7.05	1.64	55.38	
12	-72.36	0.50			
13	63.71	17.64	1.44	94.95	
14	-50.65	5.00	1.67	38.15	
15	531.40	7.25			
16	134.93	13.56	1.70	48.52	
17	-176.29	0.50			
18	54.79	12.36	1.60	65.44	
19	118.83	14.42			30
20	234.49	11.45	1.75	35.28	
21	-144.57	3.61			
22	99.73	17.43	1.60	65.44	
23	-54.76	5.00	1.67	38.15	
24	-392.90	1.00			
25 0.00 (遮光部)		3.84			
26	-82.47	5.00	1.61	43.71	
27	106.23	26.38			
28	-475.21	23.33	1.72	43.69	
29	-65.34	0.50			40
30	136.04	26.85	1.49	70.24	
31	-132.13	44.13			
32	-86.09	5.00	1.74	32.26	
33	175.53	29.93			
34	-56.65	5.00	1.49	70.24	
35	-1735.21	11.41			
36	-183.59	29.63	1.76	40.10	
37	-85.12	6.37			
38	456.98	31.46	1.68	50.72	
39	-468.94	10.50			50

像面 0

【 0 0 5 3 】

数値実施例1の非球面係数
(非球面係数)

面番号	k	A	B	C	D	
	E	F	G	H	J	
1, 7	0.00E+00	1.67E-09	3.09E-13	3.96E-17	3.63E-21	
	-9.72E-25	1.54E-28	-7.54E-33	0.00E+00	0.00E+00	
4, 10	0.00E+00	7.26E-09	4.06E-13	2.43E-17	2.13E-22	10
	1.53E-25	-8.73E-30	6.74E-34	0.00E+00	0.00E+00	
13	0.00E+00	-6.61E-07	3.61E-10	-1.77E-12	4.28E-15	
	-6.07E-18	4.64E-21	-1.49E-24	0.00E+00	0.00E+00	
19	0.00E+00	1.06E-06	1.26E-10	-3.89E-14	1.21E-16	
	-1.34E-19	8.62E-23	-2.47E-26	0.00E+00	0.00E+00	
20	0.00E+00	-2.24E-07	-2.10E-10	7.61E-14	2.93E-17	
	-6.10E-20	4.21E-23	-1.52E-26	0.00E+00	0.00E+00	
22	0.00E+00	-3.39E-07	1.40E-10	-1.22E-13	1.12E-16	
	-2.82E-19	2.37E-22	-7.09E-26	0.00E+00	0.00E+00	
27	0.00E+00	-8.37E-07	4.38E-10	-6.29E-13	8.80E-16	20
	-9.05E-19	5.49E-22	-1.47E-25	0.00E+00	0.00E+00	
28	0.00E+00	-5.75E-07	6.56E-11	-8.58E-15	2.98E-18	
	-1.39E-21	1.53E-25	-2.07E-29	0.00E+00	0.00E+00	
31	0.00E+00	-2.68E-07	3.68E-11	1.85E-15	1.56E-19	
	-3.12E-22	4.81E-26	-1.39E-30	0.00E+00	0.00E+00	
32	0.00E+00	-1.11E-06	1.65E-10	1.46E-15	-1.61E-17	
	3.66E-21	-2.08E-24	4.09E-28	0.00E+00	0.00E+00	
35	0.00E+00	-7.37E-07	2.14E-10	-5.75E-14	1.31E-17	
	-2.37E-21	2.68E-25	-1.43E-29	0.00E+00	0.00E+00	
39	0.00E+00	-2.14E-07	3.18E-11	-8.94E-15	1.60E-18	30
	-1.62E-22	8.95E-27	-2.10E-31	0.00E+00	0.00E+00	

【 0 0 5 4 】

[数値実施例 2]

物体面	r	d	ND	d	
1 非球面	642.4	9.4	1.52	64.14	
2 球	-1525.2	70.9			
3 球	-85.3	7.2	1.52	64.14	
4 非球面	-115.3	-7.2	1.52	64.14	
5 球	-85.3	-70.9			40
6 球	-1527.6	-9.4	1.52	64.14	
7 非球面	642.4	9.4	1.52	64.14	
8 球	-1525.2	70.9			
9 球	-85.3	7.2	1.52	64.14	
10 非球面	-115.3	3.0			
11 非球面	-106.2	8.6	1.64	55.38	
12 球	-23.6	5.0	1.74	29.30	
13 球	-52.4	2.5			
14 非球面	47.4	8.2	1.61	60.69	
15 球	-60.3	9.9			50

16	球	45.1	9.4	1.54	55.43
17	球	-89.1	3.2		
18	球	-126.3	6.9	1.75	30.11
19	非球面	-41.8	6.7		
20	球	-24.2	7.4	1.65	33.10
21	非球面	-149.0	6.9		
22	球	1.00E+18	6.8	1.50	59.58
23	球	1.00E+18	0.0		
24	球	97.4	9.5	1.71	47.49
25	非球面	-554.5	0.9		
26	球	110.1	14.2	1.61	60.52
27	非球面	-58.2	0.5		
28	球	43.8	8.8	1.75	31.34
29	球	60.1	8.2		
30	非球面	58.2	7.3	1.74	35.95
31	球	46.4	27.3		
32	球	-27.3	5.6	1.74	35.95
33	非球面	793.1	17.6		
34	非球面	-39.1	6.7	1.49	68.89
35	球	-147.5	10.9		
36	球	-77.8	14.6	1.74	44.85
37	非球面	-60.9	0.7		
38	球	-134.1	20.2	1.74	44.85
39	球	-73.7	0.5		
40	球	1474.7	18.7	1.74	37.55
41	非球面	-263.7	1.5		

像面

【 0 0 5 5 】

面番号	k	A	B	C	D	
	E	F	G	H	J	
1, 7	0.00E+00	1.84E-08	-7.14E-13	-7.14E-13	1.27E-19	
	-5.77E-23	1.31E-26	-1.19E-30	0.00E+00	0.00E+00	
4, 10	0.00E+00	1.47E-08	1.37E-12	1.07E-16	4.38E-21	
	1.80E-24	-1.67E-28	2.11E-32	0.00E+00	0.00E+00	
11	0.00E+00	-5.87E-06	8.08E-09	8.05E-12	3.85E-14	
	9.03E-26	-1.57E-32	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
14	0.00E+00	-4.04E-06	-7.89E-09	1.77E-11	-4.83E-14	
	-5.88E-24	-2.12E-27	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
19	0.00E+00	2.57E-07	-5.28E-10	5.16E-12	-7.30E-15	
	-2.69E-18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
21	0.00E+00	-8.47E-06	2.05E-09	-5.43E-12	8.12E-15	
	-8.82E-18	-9.75E-30	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
25	0.00E+00	-8.16E-07	5.19E-10	-1.81E-12	2.14E-15	
	-7.44E-19	-7.83E-24	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
27	0.00E+00	3.63E-06	-1.07E-09	1.64E-12	-1.60E-15	
	6.70E-19	-8.25E-23	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
30	0.00E+00	-2.80E-08	-4.09E-09	4.05E-12	-4.18E-15	
	3.21E-18	-5.72E-24	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
33	0.00E+00	5.46E-06	-6.07E-09	8.19E-13	2.08E-15	

10

20

30

40

50

	-3.65E-19	-6.71E-22	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
34	0.00E+00	6.51E-06	-1.13E-09	1.19E-12	-7.85E-17
	-5.25E-19	4.61E-22	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
37	0.00E+00	1.23E-06	-3.10E-10	8.66E-14	2.17E-18
	-2.43E-21	-4.59E-25	4.48E-28	0.00E+00	0.00E+00
41	0.00E+00	-6.20E-07	2.51E-10	-7.51E-14	1.44E-17
	-1.72E-21	1.04E-25	-1.76E-30	0.00E+00	0.00E+00

【 0 0 5 6 】

【表 1】

条件式	実施例	
	1	2
(1) t_1 / f_1	0 . 0 9	0 . 1 2
(2) t_2 / t_1	9 . 1 9	4 . 4 5

10

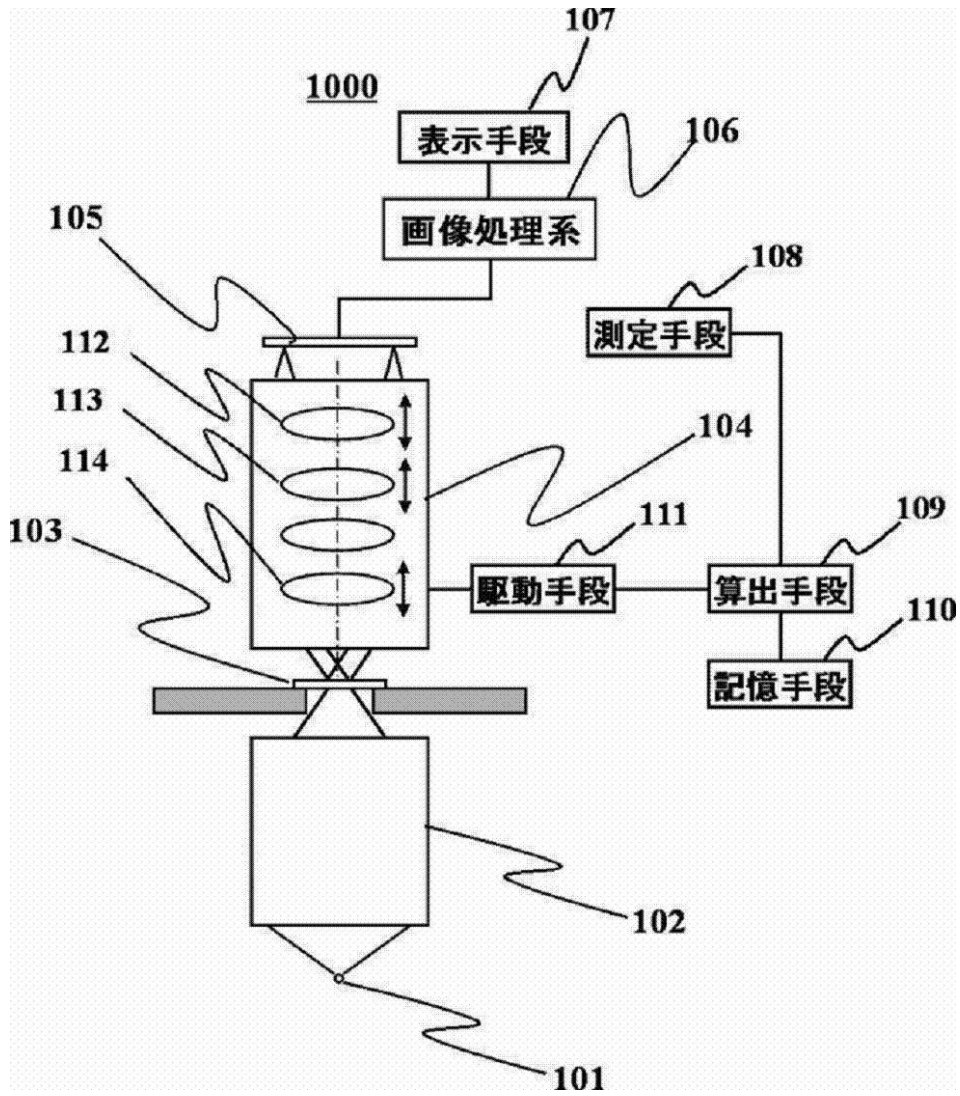
【符号の説明】

【 0 0 5 7 】

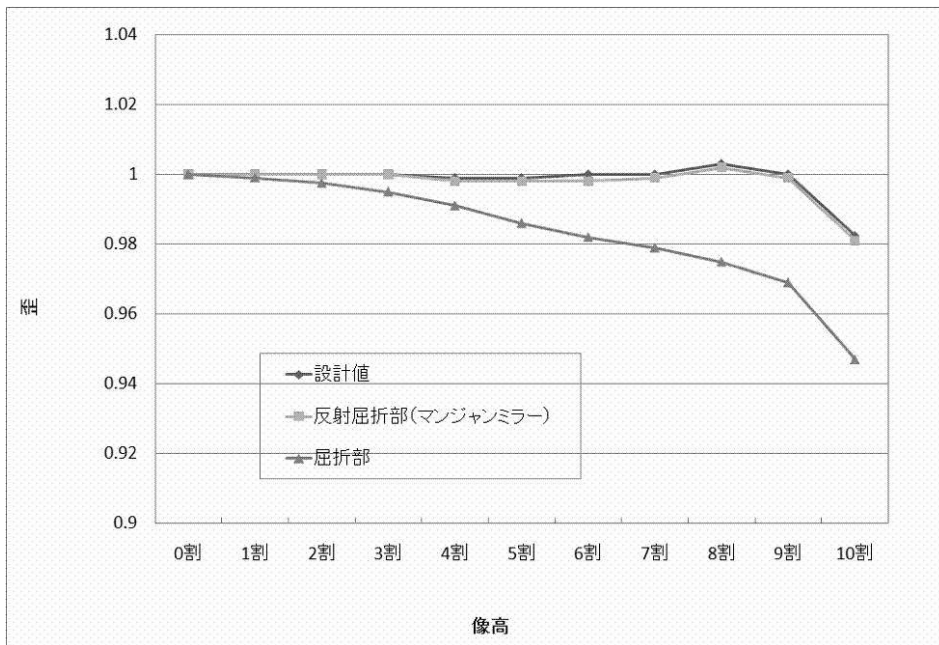
1 0 1 光源 1 0 2 照明光学系 1 0 3 試料
 1 0 4 結像光学系 1 0 5 撮像素子 1 0 6 画像処理系
 1 0 7 ~ 1 0 9 収差補正レンズ A S 開口絞り I M 中間像
 A X 光軸 G 1 第 1 結像光学系 G 2 第 2 結像光学系
 L 1 ~ L 1 5 レンズ M 1 第 1 の光学素子 M 2 第 2 の光学素子
 S H 遮光部

20

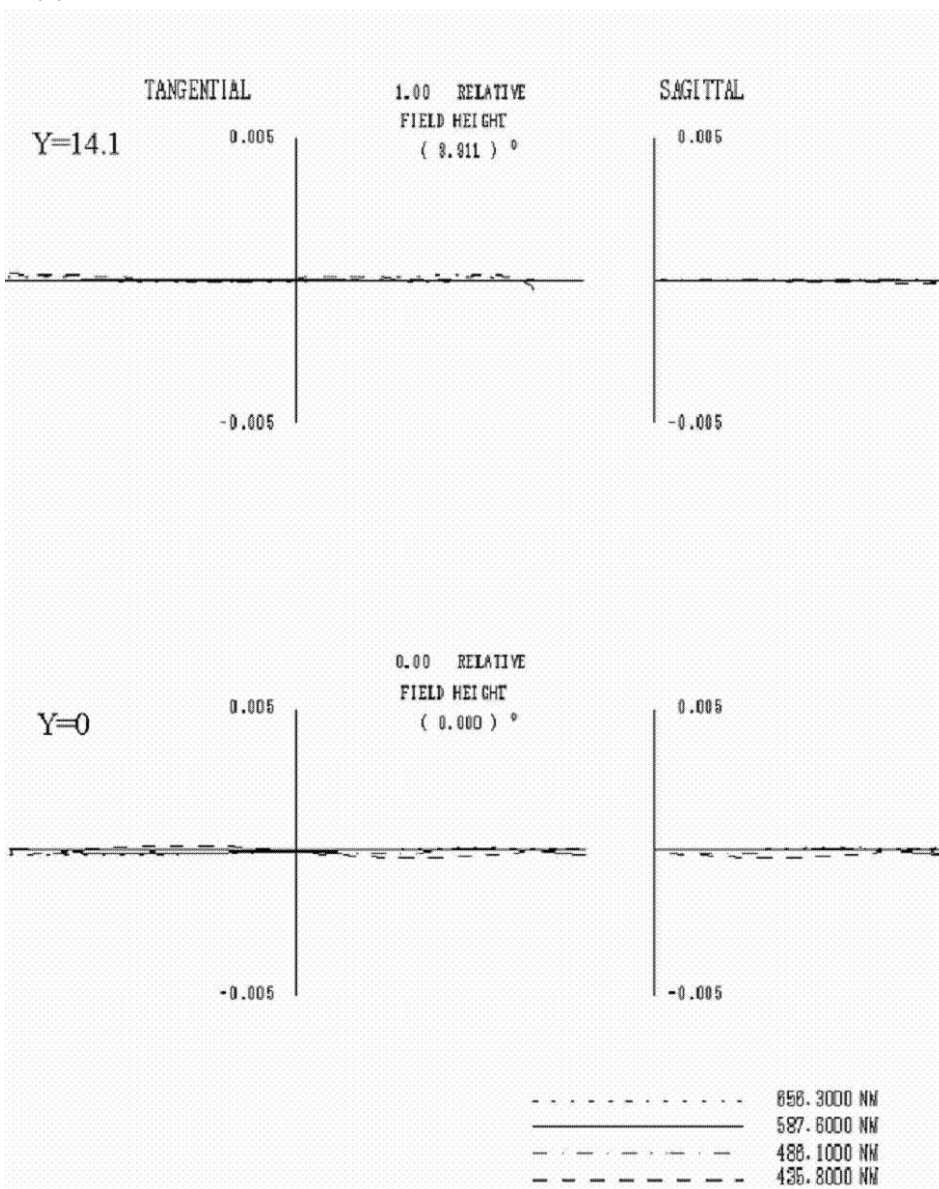
【図1】



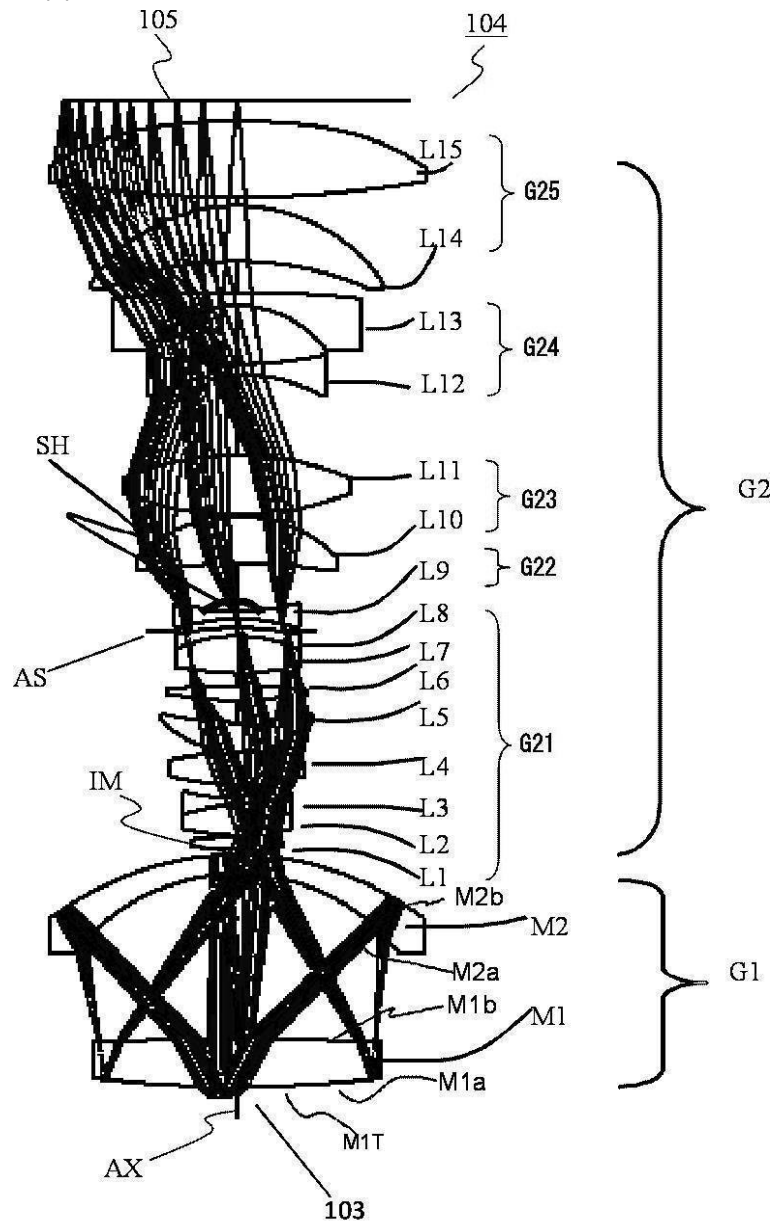
【図 3】



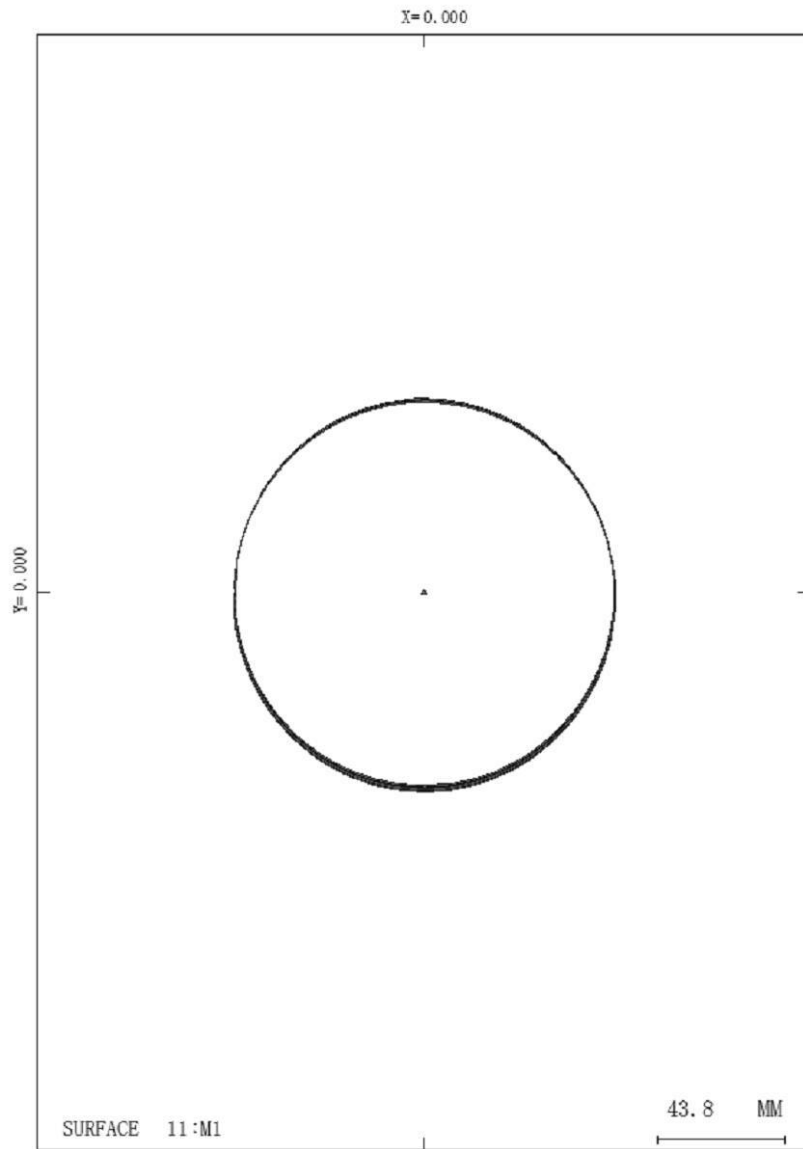
【図 4】



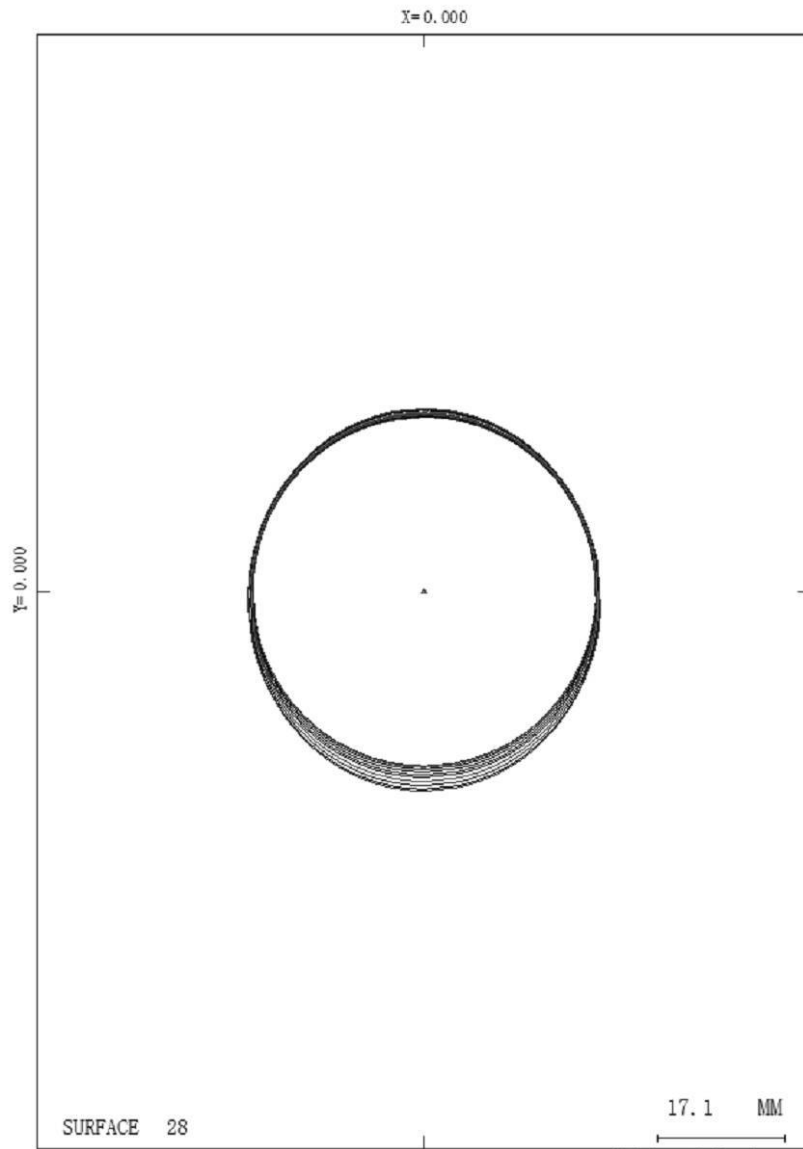
【図5】



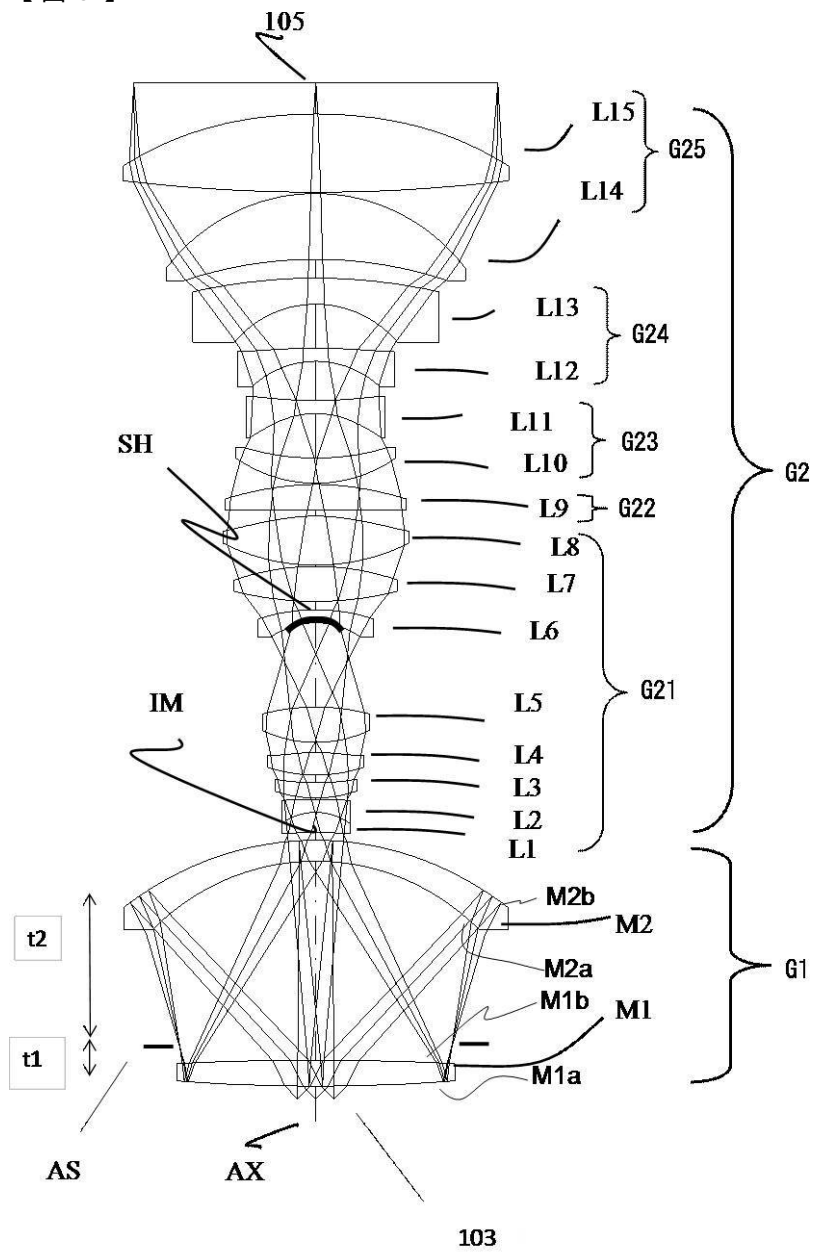
【図 6】



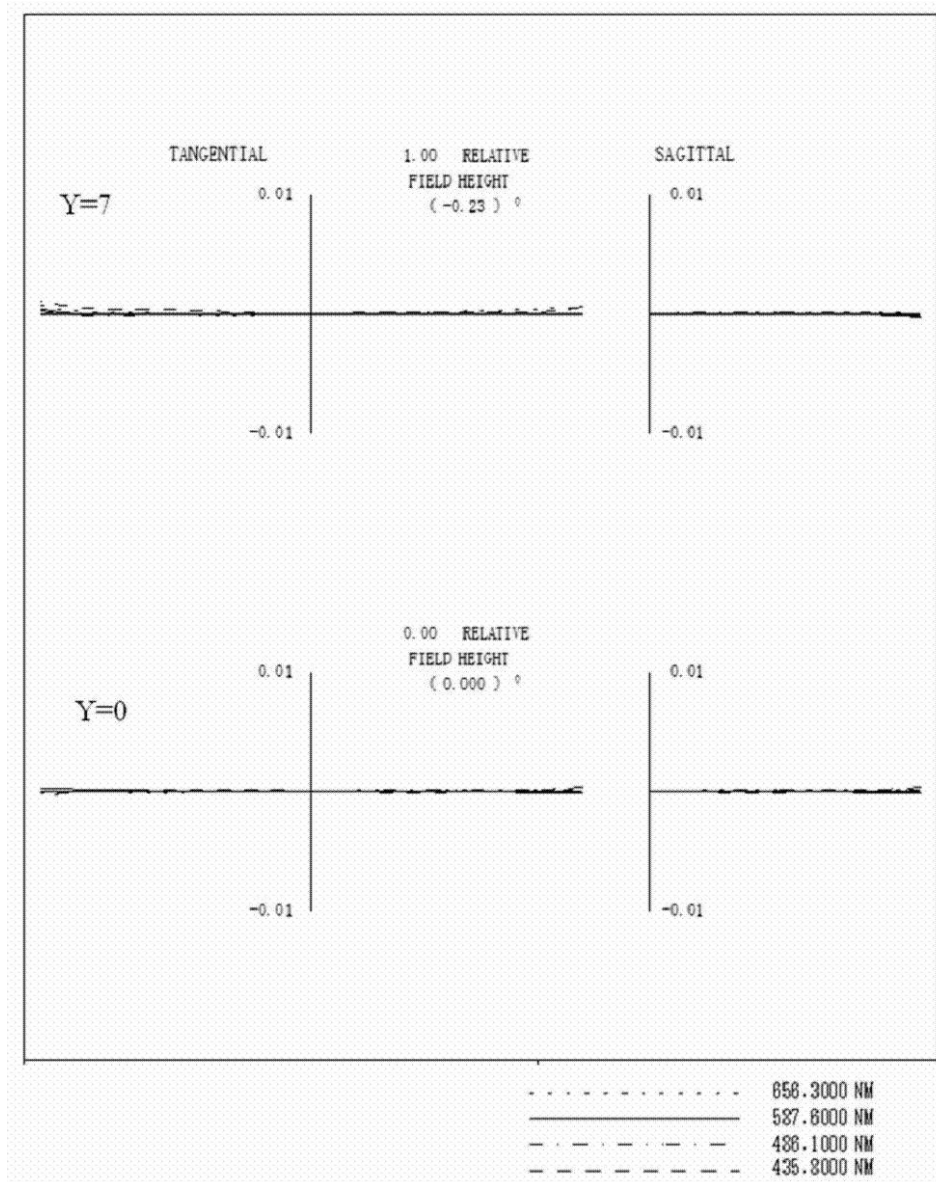
【図 7】



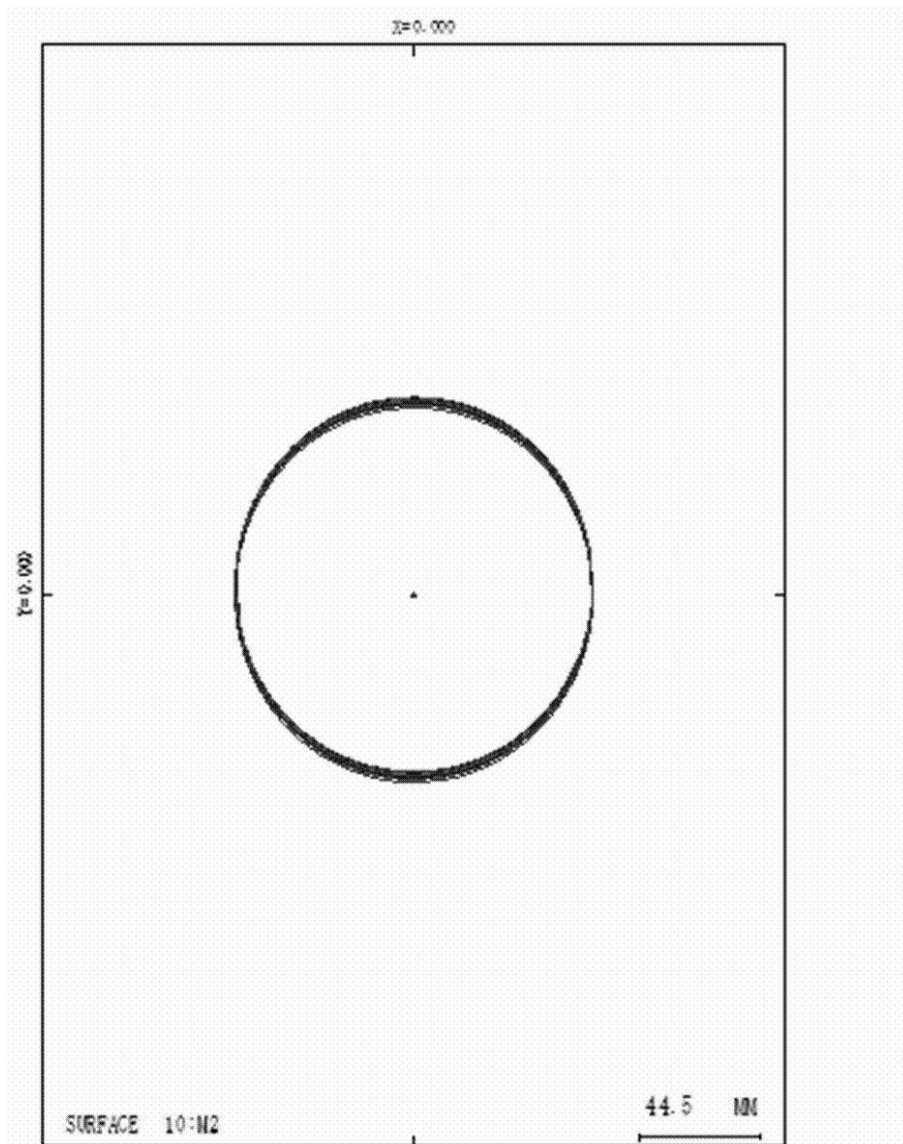
【図 8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平10-104513(JP,A)
特開2003-161886(JP,A)
特表2008-508560(JP,A)
米国特許出願公開第2004/0165257(US,A1)
特表2007-514179(JP,A)
国際公開第00/039623(WO,A1)
米国特許出願公開第2003/0011894(US,A1)
国際公開第2009/046137(WO,A1)
特表2010-541021(JP,A)
特開2008-185965(JP,A)
特開2003-015046(JP,A)
特開2007-047228(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 9/00 - 17/08
G02B 21/00 - 21/36
G02B 25/00 - 25/04