(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第3717555号
(P3717555)
(45)発行日　平成17年11月16日(2005.11.16)　(24)登録日　平成17年9月9日(2005.9.9)

(51)Int.Cl.[7]　F I
G02B　5/18　G02B　5/18

請求項の数 14　(全 19 頁)

(21)出願番号　特願平7-230104
(22)出願日　平成7年9月7日(1995.9.7)
(65)公開番号　特開平9-127321
(43)公開日　平成9年5月16日(1997.5.16)
審査請求日　平成14年4月9日(2002.4.9)
(31)優先権主張番号　特願平6-217420
(32)優先日　平成6年9月12日(1994.9.12)
(33)優先権主張国　日本国(JP)
(31)優先権主張番号　特願平6-308835
(32)優先日　平成6年12月13日(1994.12.13)
(33)優先権主張国　日本国(JP)
(31)優先権主張番号　特願平7-220754
(32)優先日　平成7年8月29日(1995.8.29)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

(73)特許権者　000000376
オリンパス株式会社
東京都渋谷区幡ヶ谷２丁目４３番２号
(74)代理人　100072051
弁理士　杉村　興作
(74)代理人　100065363
弁理士　佐藤　安徳
(74)代理人　100089576
弁理士　冨田　典
(74)代理人　100073313
弁理士　梅本　政夫
(74)代理人　100081307
弁理士　仁平　孝

最終頁に続く

(54)【発明の名称】回折光学素子

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

積層された複数の光学材料を有し、その少なくとも一つの互いに異なる光学材料の境界面にレリーフパターンを形成してなる回折光学素子において、

前記レリーフパターンを形成した境界面に接する互いに異なる光学材料を、それらの屈折率$n_1(\lambda)$，$n_2(\lambda)$が、

【数１】

$$n_1(\lambda) > n_2(\lambda)$$

$$\frac{n_1(\lambda_2) - n_2(\lambda_2)}{n_1(\lambda_1) - n_2(\lambda_1)} > \frac{n_1(\lambda_2) - 1}{n_1(\lambda_1) - 1}$$

ただし、$\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$；$\lambda_1$，$\lambda_2$は任意の光の波長を満たすものをもって構成し、溝深さｄで形成した前記レリーフパターンの周期構造のピッチＴが、$T^2 > 4\pi\lambda d / \{n_1(\lambda) + n_2(\lambda)\}$、ただし、$\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$、を満たすことを特徴とする回折光学素子。

【請求項２】

請求項１記載の回折光学素子において、

λ_1　＝４００ｎｍ、λ_2　＝７００ｎｍとしたことを特徴とする回折光学素子。

【請求項３】

請求項１または２記載の回折光学素子において、
屈折率n_2（λ）の光学材料が、Tl_2Oを含むガラスからなることを特徴とする回折光学素子。
【請求項４】
請求項１、２または３記載の回折光学素子において、
前記レリーフパターンの周期構造のピッチTが、$T^2 > 40\pi\lambda d / \{n_1(\lambda)+n_2(\lambda)\}$、ただし、$\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$、を満たすことを特徴とする回折光学素子。
【請求項５】
請求項３記載の回折光学素子において、
Tl_2Oの含有率が３０mol%以下であることを特徴とする回折光学素子。
【請求項６】
請求項３記載の回折光学素子において、
Tl_2Oの含有率が７．５mol%以上であることを特徴とする回折光学素子。
【請求項７】
請求項１～４のいずれか一項に記載の回折光学素子において、
前記レリーフパターンは、鋸歯波状の断面形状を有することを特徴とする回折光学素子。
【請求項８】
請求項７記載の回折光学素子において、
前記レリーフパターンは、レンズ作用を有するパターンであることを特徴とする回折光学素子。
【請求項９】
請求項１～４のいずれか一項に記載の回折光学素子において、
前記レリーフパターンを形成しない面の少なくとも１つの面に、反射防止コートを有することを特徴とする回折光学素子。
【請求項１０】
請求項１～４のいずれか一項に記載の回折光学素子において、
前記レリーフパターンを形成しない面の少なくとも１つの面を曲面としたことを特徴とする回折光学素子。
【請求項１１】
請求項１０記載の回折光学素子において、
前記曲面は、レンズ作用を有することを特徴とする回折光学素子。
【請求項１２】
請求項１～４のいずれか一項に記載の回折光学素子において、
外部に接する面の少なくとも１つの面に、ミラーコートを有することを特徴とする回折光学素子。
【請求項１３】
請求項１２記載の回折光学素子において、
前記ミラーコートを有する面を構成する光学材料と接する異なる光学材料の面に前記レリーフパターンを形成すると共に、前記ミラーコートを有する面を構成する光学材料の厚さを、前記レリーフパターンの溝深さと実質的に等しくしたことを特徴とする回折光学素子。
【請求項１４】
請求項１～４のいずれか一項に記載の回折光学素子において、
互いに接する異なる２種類の光学材料の少なくとも一方を、プラスチック光学材料をもって構成したことを特徴とする回折光学素子。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【発明の属する技術分野】
この発明は、複数の波長で使用する回折光学素子に関するものである。

【０００２】
【従来の技術】
回折光学素子、例えば、集光作用を有する回折レンズを用いる光学系には、従来の屈折レンズを用いる場合に比べて、以下のような特長を有することが知られている。
▲１▼　回折レンズによって非球面波を容易に生成できるので、収差補正上効果的である。
▲２▼　回折レンズは、実質的に厚みを持たないので、光学系をコンパクトにできると共に、設計の自由度を上げることができる。
▲３▼　屈折レンズでいう分散特性に相当する量が、回折レンズでは逆の値を持つので、色収差を効果的に補正することができる。
【０００３】
このような回折レンズの特長を利用して、光学系の性能を向上させることに関しては、例えば、Binary Optics Technology;The Theory and Design of Multi-Level Diffractive Optical Element,Gary J.Swanson,Technical Report 854,MIT Lincoln Laboratory,August 1989. に詳しく記述されている。
【０００４】
【発明が解決しようとする課題】
上述したように、回折光学素子には、従来の屈折素子にはない多くの有用な特長があるが、他方では、回折効率が波長に依存するために、以下に説明するような種々の問題がある。例えば、光学系に適用する回折光学素子は、レンズ素子として利用する場合が多いが、このような用途においては、複数の回折光（複数の焦点）が存在するのは、一般に好ましくない。そこで、回折レンズにおいては、一般に、図１９に示すように、使用する波長で透明な基材１０に、断面形状が鋸歯波状のレリーフパターン２０を形成して、特定次数の回折光にエネルギーを集中させるようにしている。
【０００５】
しかしながら、図１９に示すように、断面形状を鋸歯波状に加工すると、その溝深さによってエネルギーを集中できる波長が異なるため、波長幅を有する帯域光のエネルギーを特定次数の回折光に集中させることができなくなる。このような現象は、例えば、レーザのような単色と見なせる光を利用する場合には問題とならないが、カメラのように白色光を利用する光学系においては、無視できない問題となる。
【０００６】
また、回折光学素子の有用な特長の一つである色収差補正効果を実現する場合には、使用する波長が必然的に複数であるために、特定の波長の光で回折効率を最適化すると、その他の波長では回折効率が低下し、特に、可視帯域光で撮像する撮像光学系に適用する場合には、回折効率の波長依存特性によって、色むらや不要次数光によるフレアが生じるという問題がある。
【０００７】
図２０は、図１９に示す回折光学素子において、基材１０としてＢＫ７を用い、レリーフパターン２０を、波長λ＝５２０ｎｍにおいて１次回折効率が１００％となるような溝深さで形成した場合の１次回折効率の波長依存特性を示すものである。図２０から明らかなように、一般に可視波長領域と見なせるλ＝４００ｎｍからλ＝７００ｎｍにおいて、回折効率は、最適化したλ＝５２０ｎｍから離れるに従って減少し、特に、短波長領域での低下が著しいことがわかる。このような所望次数における回折効率の低下は、不要次数光の増加として、光学系に悪影響を与えることになる。
【０００８】
この発明は、上述した問題点に着目してなされたもので、回折効率の波長依存を低減して、色むらや不要次数光によるフレアの発生等を有効に防止し得るよう適切に構成した回折光学素子を提供することを目的とするものである。
【０００９】
【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するため、この発明は、積層された複数の光学材料を有し、その少なくとも一つの互いに異なる光学材料の境界面にレリーフパターンを形成してなる回折光学素子において、

前記レリーフパターンを形成した境界面に接する互いに異なる光学材料を、それらの屈折率$n_1(\lambda)$，$n_2(\lambda)$が、

【数２】

$$n_1(\lambda) > n_2(\lambda)$$

$$\frac{n_1(\lambda_2) - n_2(\lambda_2)}{n_1(\lambda_1) - n_2(\lambda_1)} > \frac{n_1(\lambda_2) - 1}{n_1(\lambda_1) - 1}$$

を満たすものをもって構成し、溝深さｄで形成した前記レリーフパターンの周期構造のピッチＴが、$T^2 > 4\pi\lambda d / \{n_1(\lambda) + n_2(\lambda)\}$、ただし、$\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$、を満たすことを特徴とするものである。

【００１０】

前記波長λ_1およびλ_2は、λ_1＝４００ｎｍ、λ_2＝７００ｎｍとするのが、適用可能な光学材料の種類が多く、光学材料の組み合わせの最適化の点で好ましい。

【００１１】

前記屈折率$n_2(\lambda)$の光学材料として、Tl_2Oを含むガラスを適用することが、これと対をなす屈折率$n_1(\lambda)$の光学材料の選択の範囲を広げる点で好ましい。

【００１３】

【発明の実施の形態】

断面を鋸歯波状に形成したレリーフパターンは、図１に示すような位相シフト関数φ（ｘ）で表すことができる。このφ（ｘ）は、レリーフパターンの波面変調作用を特長づける関数で、その形状は、レリーフパターンの断面形状と一致した周期関数である。ここで、位相シフト関数φ（ｘ）の振れ幅（以後、これを位相振幅と呼ぶことにする）ａを用いれば、図１に示す位相シフト関数φ（ｘ）で表されるレリーフパターンのｍ次回折効率η_mは、

【数４】

$$\eta_m = \left\{ \frac{\sin(m-a)\pi}{(m-a)\pi} \right\}^2 \qquad (1)$$

で与えられる。

【００１４】

（１）式において、位相振幅ａは、空気の屈折率を１、基材の屈折率をｎ、溝深さをｄ、および光の波長をλとして、

【数５】

$$a = \frac{(n-1)d}{\lambda} \qquad (2)$$

で定義される量である。ここで、波長λ_0でm_0次回折効率が１００％となるように最適化した溝深さd_0は、

【数６】

$$d_0 = \frac{m_0 \lambda_0}{n(\lambda_0) - 1} \qquad (3)$$

であるから、この結果を（２）式に用いれば、

【数７】

$$a(\lambda) = m_0 \cdot \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda} \qquad (4)$$

のように表すことができる。

【００１５】

（４）式は、ある定まった溝深さd_0に対して位相振幅ａが波長に依存することを意味し、この位相振幅ａの波長依存によって、（１）式から明らかなように、回折効率の波長依存が引き起こされる。図２は、図２０に示した回折効率の波長依存特性に対応する位相振幅の波長依存特性を示すものである。

【００１６】

位相振幅の波長依存を、さらに詳しく説明するために、（４）式から位相振幅の波長依存を決定する要素Ｒ（λ），Ｄ（λ）を、以下のように定義する。

【数８】

$$\left.\begin{aligned} R(\lambda) &= \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \\ D(\lambda) &= \lambda_0 / \lambda \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

【００１７】

図３は、（５）式で定義した要素Ｒ（λ），Ｄ（λ）の位相振幅の波長依存特性を示すものである。図３から明らかなように、Ｒ（λ），Ｄ（λ）は、波長の増加に伴ってともに単調に減少するが、その変化は、Ｒ（λ）よりもＤ（λ）のほうが大きい。このことから、レリーフパターンの回折効率の波長依存は、もっぱらＤ（λ）に依存していることがわかる。

【００１８】

本発明者は、種々の実験検討により、特定の条件下において、上記のＲ（λ）がＤ（λ）の波長依存を打ち消すように作用し、その結果、位相振幅の波長依存が低減し、回折効率の波長依存特性を改善できることを見いだした。すなわち、レリーフパターンを、異なる光学材料の境界面に形成し、それぞれの光学材料を高屈折率低分散および低屈折率高分散の組み合わせ（ただし、屈折率および分散の高低は、相対的なもの）とする。このように構成すると、（４）式に相当する位相振幅の波長依存は、

【数９】

$$a'(\lambda) = m_0 \cdot \frac{n_1(\lambda) - n_2(\lambda)}{n_1(\lambda_0) - n_2(\lambda_0)} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda} \qquad (6)$$

のようになる。さらに、この（６）式から、（５）式に相当する位相振幅の波長依存を決定する要素Ｒ′（λ），Ｄ（λ）は、

【数１０】

$$\left.\begin{aligned} R'(\lambda) &= \frac{n_1(\lambda)-n_2(\lambda)}{n_1(\lambda_0)-n_2(\lambda_0)} \\ D(\lambda) &= \lambda_0/\lambda \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

で与えられる。ここで、$n_1(\lambda)$および$n_2(\lambda)$は、それぞれ高屈折率低分散材料および低屈折率高分散材料の屈折率である。

【００１９】

このように、この発明では、従来、基材と空気との屈折率の差を利用して構成していたレリーフパターンを、異なる光学材料の屈折率の差を利用して構成し、さらにその組み合わせを最適化することによって、回折効率の波長依存を改善する。具体的には、レリーフパターンを形成した境界面に接する互いに異なる光学材料の屈折率$n_1(\lambda)$，$n_2(\lambda)$が、

【数１１】

$$\left.\begin{aligned} & n_1(\lambda) > n_2(\lambda) \\ & \frac{n_1(\lambda_2)-n_2(\lambda_2)}{n_1(\lambda_1)-n_2(\lambda_1)} > \frac{n_1(\lambda_2)-1}{n_1(\lambda_1)-1} \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

ただし、$\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ ；λ_1，λ_2 は、それぞれ

使用波長帯域の下限および上限の光の波長

の条件を満足するようにする。

【００２０】

すなわち、回折効率の波長依存の主因であるＤ（λ）の寄与に対して、従来は（５）式で定義されるＲ（λ）が対をなして、むしろ回折効率の波長依存を増加させるように作用していたが、この発明では、（８）式の条件を満足することにより、従来のＲ（λ）の作用と比較して、（７）式で定義されるＲ′（λ）が、回折効率の波長依存を低減させる方向に作用することになる。なお、（８）式において、使用波長幅の上限（λ_2）および下限（λ_1）は、特に限定されるものではないが、実用的には、通常のカメラ等に用いられる可視光の波長領域に適用するのが、適用可能な光学材料の種類が多く、光学材料の組み合わせの最適化にとって有利であることから、λ_1＝４００ｎｍ、λ_2＝７００ｎｍとするのが最も効果的である。

【００２１】

ここで、異なる光学材料の境界面にレリーフパターンを構成したものとして、例えば、特開平２－４３５０３号公報（従来例１）に複合光学素子が開示されている。しかし、従来例１は、回折レンズを積層することにより、個々の回折レンズのパワー負担を減少させるようにしたもので、この発明の回折光学素子とは、その目的を全く異にすると共に、当然ながらこの発明の特徴である光学材料の特性に関しては何ら言及されていない。

【００２２】

一方、光学材料の特性に関して言及したものとして、特開平５－６６３７０号公報（従来例２）に、波長選択性位相格子光学的ローパスフィルタが開示されている。このローパスフィルタにおいては、緑色光（Ｇ）波長における光学材料の屈折率差をゼロにすることにより、その波長における回折作用を実質的に無くして、Ｇ波長近傍における遮断周波数を高くしている。つまり、２種類の光学材料の分散を異なるものとすることによって、Ｇ波長から離れるほど遮断周波数が低くなるように、すなわち、位相振幅を増加させることによって、回折作用を増加させるように構成している。

【００２３】

この従来例２において、２種類の光学材料の境界面にレリーフパターンを形成する理由は、Ｇ波長における屈折率差をゼロにすることによって、位相振幅をゼロにするためである。このような構成は、例えば、特開昭６４－６１７２６号公報（従来例３）に開示されているように、２種類の光学材料の屈折率差をゼロを中心にして制御する、一種のスイッチング素子を実現したものと同一の思想の上に成り立っている。

【００２４】

この発明では、（８）式から明らかなように、境界面にレリーフパターンを形成する２種類の光学材料の屈折率の大小関係が、使用する波長帯域において反転することがない。また、この発明では、光学材料の組み合わせを適切に選択することにより、屈折率の波長依存に伴う作用Ｒ′（λ）が、回折光学素子の本質的な作用Ｄ（λ）を打ち消すようにして、回折効率の波長依存を低減させるようにしているが、このような内容については、上述した従来例では何ら考慮していない。例えば、従来例２の構成においては、確かにＧ波長において回折作用をなくすという一種の回折効率の制御を行っているが、その周辺の波長における回折作用、つまり回折効率の波長依存は、必ずしも最適に制御されているとはいえない。特に、この従来例２についていえば、回折光学素子の本質的な作用Ｄ（λ）に関して全く考慮されていない。この発明は、上述した従来例とは、思想が根本的に異なり、使用する波長帯域全体にわたる総合的な回折効率に関し、従来にない多大な効果をもたらすものである。

【００２５】

図４は、この発明において境界面にレリーフパターンを形成する２種類の光学材料の屈折率の波長依存特性の一例を示すものである。ここで、注目すべき点は、２種類の光学材料の屈折率差が、短波長側で小さく、長波長側で大きいことである。このように２種類の光学材料を選定することにより、図５に示すように、（７）式で示したＲ′（λ）が波長の増加に伴って単調に増加して、Ｄ（λ）の効果を打ち消すように作用し、その結果、（６）式で示した位相振幅の波長依存が低減されて、回折効率の波長依存が改善される。このような改善の効果は、図３に示した基材表面にレリーフパターンを形成した従来のものと比較して、２種類の光学材料の特性を、Ｒ′（λ）の傾きが増加するように選択したときに表れる。

【００２６】

しかし、２種類の光学材料の選択について、（８）式の条件から外れると、基材表面にレリーフパターンを形成した従来の回折光学素子と比較して、回折効率の波長依存が悪化する。例えば、ＢＫ７（低屈折率低分散）とＰＣ（ポリカーボネイト；高屈折率高分散）との境界面にレリーフパターンを形成すると、その回折効率の波長依存は、図６に曲線▲２▼で示すようになり、曲線▲１▼で示す従来の基材（ＢＫ７）表面にレリーフパターンを形成した回折光学素子における回折効率の波長依存と比較して悪くなる。なお、図６の曲線▲１▼および▲２▼は、それぞれレリーフの溝深さを、波長λ＝５２０ｎｍで回折効率が１００％となるように設定した場合の波長依存を示す。このように、光学材料の組み合わせが不適当であると、むしろ回折効率の波長依存が悪化するため、２種類の光学材料の境界面にレリーフパターンを形成して、回折効率の波長依存を向上させるためには、光学材料の組み合わせが重要な要素となる。

【００２７】

次に、この発明にかかる回折光学素子におけるレリーフパターンの溝深さについて言及する。この発明において、２種類の光学材料の境界面の断面を鋸歯波状に形成したレリーフパターンの溝深さは、次の（９）式で表される。これは、基材表面にレリーフパターンを形成する場合の（３）式に相当する溝深さであって、波長λ_0においてｍ$_0$次回折効率が１００％となるように最適化した溝深さである。

【数１２】

$$d_0 = \frac{m_0 \lambda_0}{n_1(\lambda_0) - n_2(\lambda_0)} \qquad (9)$$

【００２８】
この溝深さは、従来の基材表面にレリーフパターンを形成する場合と比較して、一般に深くなる。しかし、この溝深さが、レリーフパターンのピッチＴに対してある程度深くなると、回折効率の入射角依存が増大して、光学系への適用の際に問題となる場合があると共に、回折効率の波長依存に関して、すでに（１）式で示した関係が不正確なものとなる。このように溝深さが深いレリーフパターンは、一般に、厚型格子と呼ばれる。
【００２９】
この発明において、レリーフパターンの厚さを特徴づけるパラメータとしてのＱ値は、溝深さｄ、波長λとして、
【数１３】

$$Q = \frac{4\pi\lambda d}{n_1(\lambda) + n_2(\lambda)} \cdot \frac{1}{T^2} \qquad (10)$$

のように表すことができる。
【００３０】
ここで、一般に、薄いレリーフパターンは、Ｑ＜１の条件で分類されるので、この発明にかかる回折光学素子においても、その周期構造のピッチＴが、Ｑ＜１を満たすように構成することが望ましい。すなわち、
【数１４】

$$T^2 > \frac{4\pi\lambda d}{n_1(\lambda) + n_2(\lambda)} \qquad (11)$$

を満足するよう構成するのが好ましい。
【００３１】
また、本発明者による種々の実験検討によれば、特に、Ｑ＜０．１のときに、レリーフパターンは、薄型の性質をよりよく表すことが確認された。したがって、より好ましくは、Ｑ＜０．１を満たすように、すなわち、
【数１５】

$$T^2 > \frac{40\pi\lambda d}{n_1(\lambda) + n_2(\lambda)} \qquad (12)$$

を満足するように、レリーフパターンを構成するのが望ましい。
【００３２】
【実施例】
この発明の第１実施例においては、境界面にレリーフパターンを形成する２種類の光学材料として、光学ガラスＢＳＭ８１（オハラ製）と、プラスチック光学材料ＰＣ（ポリカーボネイト）とを用いる。図４は、それぞれの光学材料の屈折率の波長依存特性を示すもので、$n_1(\lambda)$は高屈折率低分散材料に相当するＢＳＭ８１の屈折率波長依存特性を、$n_2(\lambda)$は低屈折率高分散材料に相当するＰＣの屈折率波長依存特性を示している。かかる光

学材料の組み合わせが、位相振幅の波長依存に及ぼす作用については、図５において既に説明したので、以下に、かかる光学材料の組み合わせによって、位相振幅の波長依存が実際にどのように改善されたかを、図７を参照しながら説明する。

【００３３】

図７は、位相振幅の波長依存特性を示すもので、▲１▼は、基材（ＢＳＭ８１）の表面にパターンを形成した従来の回折光学素子の場合を、▲２▼は、上記の２種の光学材料（ＢＳＭ８１，ＰＣ）の境界面にパターンを形成したこの実施例による回折光学素子の場合をそれぞれ示している。なお、回折効率が最大となるように最適化した波長は、▲１▼については５２０ｎｍ、▲２▼については、d-line（５８７．５６ｎｍ）とした。この実施例においては、比較的短波長側での位相振幅の波長依存の改善効果が大きいので、回折効率が最大となるように最適化する波長は、従来の場合と比較して長波長側に設定するのが好ましく、このように設定することにより、使用波長帯域に亘って位相振幅の変化量をより小さく抑えることが可能となる。

【００３４】

図８は、図７に示した位相振幅の波長依存特性に対応する回折効率の波長依存特性を示すもので、▲１▼は従来の回折光学素子の波長依存特性を、▲２▼は上記の２種の光学材料（ＢＳＭ８１，ＰＣ）を用いるこの実施例による回折光学素子の波長依存特性を示している。図８から明らかなように、この実施例による回折光学素子によれば、回折効率の波長依存特性を実質的に無視できる程度に小さく抑えることができ、改善の効果が著しいことが実証された。

【００３５】

なお、上記の説明では、低屈折率高分散材料として、プラスチック光学材料ＰＣを用いたが、一般に、プラスチック光学材料は、低屈折率高分散の特長を有するので、他のプラスチック光学材料も有効に用いることができる。しかも、プラスチック光学材料は、成形性に優れているので、回折光学素子をより容易に製造できるという利点がある。

【００３６】

また、この実施例では、レリーフパターンを２種類の光学材料の境界面に形成しているので、光学素子の耐環境性を向上することが可能となる。すなわち、レリーフパターンは、通常の屈折素子（例えば、レンズ）と異なり、その表面が埃や指紋で汚染された場合、払拭することが一般に困難であるが、この実施例にかかる回折光学素子では、レリーフパターンを２種類の光学材料の境界面に形成しているので、汚染の問題が生じない。

【００３７】

以下、第１実施例による回折光学素子の具体的構成について説明する。なお、以下に例示する回折光学素子の全てに共通する特長は、回折効率の波長依存が改善されたこと、耐環境性が向上されたことにある。

【００３８】

図９は、第１実施例による回折光学素子の基本的な構成を示すものである。この回折光学素子は、プリズム作用をなすもので、ＰＣよりなる光学材料１１と、ＢＳＭ８１よりなる光学材料１２との境界面に、等ピッチの鋸歯波状レリーフパターン２１を形成したものである。また、図１０は、図９の変形例を示すもので、光学材料１１，１２の境界面のレリーフパターン２３を、集光作用を有するように形成すると共に、光学材料１１の外部と接する面３２も集光作用を有するように曲面としたものである。

【００３９】

図９および１０に示す回折光学素子によれば、素子に入射する光は、特定方向に進行方向が曲げられるが、その際に光を曲げる作用の波長依存が、レリーフパターン２１または２３（回折面）と、外部に接する面３１または３２（屈折面）とで相補的となるので、色収差が低減されることになる。

【００４０】

図１１は、光学材料１１，１２の境界面に、断面形状が矩形のレリーフパターン２２を形成したものである。このように、レリーフパターン２２の断面形状を矩形にすれば、複数

の次数の回折光を生成することができると共に、その各次数の回折光の強度分布の波長依存を防止することができる。したがって、かかる回折光学素子は、遮断周波数の波長依存を低減した空間的ローパスフィルタとして好適に用いることができる。

【００４１】

図１２は、異なる光学材料が接する境界面を２面として、それぞれの境界面にレリーフパターン２１，２２を形成したものである。２つの境界面を形成する光学材料１１，１２および１３は、中間の光学材料１２をＰＣ、両側の光学材料１１，１３をＢＳＭ８１とするか、中間の光学材料１２をＢＳＭ８１、両側の光学材料１１，１３をＰＣとするか、あるいは、それぞれ異なる３種類の光学材料とする。この回折光学素子によれば、パターンピッチの制限等によって光を曲げる角度が制限される場合に、各パターン面（回折面）が負担する曲げ量を低減できるので、所望の特性のものを容易に得ることができる。

【００４２】

図１３は、３つの光学材料１１，１２および１４を積層して得られる２つの境界面の一方にレリーフパターン２３を、他方に球面３３を形成したものである。この場合、レリーフパターン２３を形成する光学材料１１，１２は、例えば上記のＢＳＭ８１とＰＣとの組み合わせとするが、光学材料１４は、任意の光学材料を用いる。

【００４３】

この発明の第２実施例においては、屈折率$n_2(\lambda)$の低屈折率高分散の光学材料を、少なくともＴｌ$_2$Ｏを含むガラスをもって構成する。一般に、ガラス材料にＴｌ$_2$Ｏを添加すると、高屈折率高分散へと変化し、その変化の軌跡は、ガラスマップ上で低屈折率高分散の方へ曲がった弓状になる。例えば、ＳｉＯ$_2$（シリカガラス＝石英ガラス）にＴｌ$_2$Ｏを添加すると、図１４に示すように変化する。なお、図１４は、ＳｉＯ$_2$にＴｌ$_2$Ｏを０ｍｏｌ％から２５ｍｏｌ％まで添加した場合を示している。

【００４４】

図１４から明らかなように、ＳｉＯ$_2$－Ｔｌ$_2$Ｏガラスの分布は、市販のガラスに比べて低屈折率高分散となる。したがって、このＳｉＯ$_2$－Ｔｌ$_2$Ｏガラスを低屈折率高分散の光学材料として用いれば、これと境界をなす屈折率$n_1(\lambda)$の高屈折率低分散の光学材料の選択範囲が広がり、市販のガラスを使用することも可能となる。

【００４５】

なお、屈折率$n_2(\lambda)$の低屈折率高分散の光学材料は、ＳｉＯ$_2$－Ｔｌ$_2$Ｏの２成分ガラスに限らず、さらに他の成分を添加することができる。このように他の成分を添加すれば、添加する成分やその添加量によって、ガラスの屈折率および分散が変化し、図１４に示す曲線の周辺に分布する様々なガラスを得ることが可能となる。

【００４６】

また、Ｔｌ$_2$Ｏを添加する元の材料は、ＳｉＯ$_2$に限らず、Ｂ$_2$Ｏ$_3$（酸化ほう素）等の他の材料を用いることができる。このように元の材料を変えると、図１４において、Ｔｌ$_2$Ｏおよびその他の成分を添加したときのガラスマップ上での軌跡の出発点が変わり、また変化の仕方も変わるので、レリーフパターンを形成する２種類の光学材料の組み合わせ範囲をより広くすることが可能となる。

【００４７】

このように、Ｔｌ$_2$Ｏを添加する元の材料を他の材料に変えたり、Ｔｌ$_2$Ｏおよび他の成分の添加量を、連続的に変えたりすることができるので、ガラスマップ上の所定の範囲内に分布する任意のガラスを得ることが可能になる。なお、Ｔｌ$_2$Ｏの添加量は、３０ｍｏｌ％を越えると、ガラスを生成することが困難になるので、３０ｍｏｌ％以下とするのが望ましい。

【００４８】

また、ピッチの面から、$n_2(\lambda)$の低屈折率高分散材料に含まれるＴｌ$_2$Ｏの割合は、７．５ｍｏｌ％以上が特に好ましい。このようにすれば、$n_1(\lambda)$の高屈折率低分散材料の市販のガラスと組み合わせる場合、低屈折率高分散材料がプラスチック光学材料の場合に比べて、上記（１１）式の右辺の値を小さくでき、したがってレリーフパターンのピッチを

より小さくすることができるので、光を曲げる角度の範囲を広くでき、回折光学素子の適用範囲を広げることができる。

【００４９】

この実施例では、境界面にレリーフパターンを形成する２種類の光学材料として、光学ガラスＬＡＬ１１（オハラ製）と、SiO_2－Tl_2O（Tl_2O：８．７５mol％）とを用いる。図１５は、それぞれの光学材料の可視域における屈折率の波長依存特性を示すもので、$n_1(\lambda)$は高屈折率低分散材料に相当するＬＡＬ１１の屈折率波長依存特性を、$n_2(\lambda)$は低屈折率高分散材料に相当するSiO_2－Tl_2Oの屈折率波長依存特性をそれぞれ示している。

【００５０】

図１６は、位相振幅の波長依存特性を示すもので、▲１▼は、基材（ＬＡＬ１１）の表面にレリーフパターンを形成した従来の回折光学素子の場合を、▲２▼は、上記２種の光学材料（ＬＡＬ１１，SiO_2－Tl_2O）の境界面に鋸歯形状のレリーフパターンを形成したこの実施例の回折光学素子の場合をそれぞれ示している。なお、回折効率が最大となるように最適化した波長は、▲１▼については５１０ｎｍ、▲２▼についてはd-line（５８７．５６ｎｍ）とした。この実施例においても、第１実施例の場合と同様に、比較的短波長側での位相振幅の波長依存の改善効果が大きいので、回折効率が最大となるように最適化する波長は、従来の場合と比較して長波長側に設定するのが好ましく、これにより使用波長帯域に亘って位相振幅の変化量をより小さく抑えることが可能となる。

【００５１】

図１７は、図１６に示した位相振幅の波長依存特性に対応する回折効率の波長依存特性を示すもので、▲１▼は従来の回折光学素子の波長依存特性を、▲２▼は上記２種の光学材料（ＬＡＬ１１，SiO_2－Tl_2O）を用いるこの実施例による回折光学素子の波長依存特性を示している。図１７から明らかなように、この実施例による回折光学素子によれば、回折効率の波長依存特性を実質的に無視できる程度に小さく抑えることができ、改善の効果が著しいことがわかる。

【００５２】

この実施例による回折光学素子を構成する２種類の光学材料は、上記の例に限らず、種々の組み合わせが可能である。その幾つかの組み合わせについて、従来の回折効率と、この実施例により改善された回折効率とを、波長４００ｎｍから７００ｎｍの範囲で、５０ｎｍごとに表１に比較して示す。なお、表１において、各欄の上段は市販ガラス（材料１）を、下段はSiO_2－Tl_2Oガラスで、Tl_2Oを表記の割合（mol％）で含むもの（材料２）をそれぞれ示す。また、各欄において、従来の回折効率は、その左欄上段の材料１の表面にレリーフパターンを形成した回折光学素子のものを示し、この実施例（本発明）にかかる回折効率は、その左欄上段の材料１と、下段の材料２との境界面にレリーフパターンを形成した回折光学素子のものを示す。この表１から、この実施例による回折光学素子によれば、いずれの組み合わせにおいても、回折効率の波長依存が著しく改善されていることがわかる。

【００５３】

【表１】

材料1 市販ガラス 材料2 SiO_2-Tl_2O	回折効率							
	波長 (nm)	400	450	500	550	600	650	700
BSL 7 2.00 (mol %)	従来	0.7373	0.9343	0.9985	0.9808	0.9212	0.8444	0.7640
	本発明	0.9953	0.9920	0.9897	0.9971	0.9996	0.9899	0.9673
BAL 5 3.75 (mol %)	従来	0.7279	0.9322	0.9985	0.9804	0.9198	0.8421	0.7610
	本発明	0.9966	0.9912	0.9894	0.9971	0.9996	0.9900	0.9677
BAL 50 4.00 (mol %)	従来	0.7351	0.9338	0.9985	0.9807	0.9208	0.8438	0.7632
	本発明	0.9932	0.9926	0.9899	0.9972	0.9996	0.9899	0.9670
BAL 22 4.50 (mol %)	従来	0.7366	0.9341	0.9985	0.9807	0.9211	0.8442	0.7637
	本発明	0.9586	0.9994	0.9947	0.9980	0.9997	0.9918	0.9719
BAL 42 5.00 (mol %)	従来	0.7336	0.9335	0.9985	0.9806	0.9206	0.8435	0.7628
	本発明	1.0000	0.9815	0.9861	0.9966	0.9996	0.9885	0.9638
BSM 7 6.25 (mol %)	従来	0.7335	0.9335	0.9985	0.9806	0.9206	0.8435	0.7628
	本発明	0.9920	0.9932	0.9901	0.9972	0.9996	0.9900	0.9674
BSM 81 7.50 (mol %)	従来	0.7346	0.9337	0.9985	0.9806	0.9207	0.8436	0.7629
	本発明	1.0000	0.9842	0.9855	0.9964	0.9996	0.9884	0.9627
LAL 11 8.75 (mol %)	従来	0.7319	0.9331	0.9985	0.9805	0.9203	0.8430	0.7622
	本発明	0.9913	0.9933	0.9901	0.9972	0.9996	0.9899	0.9670
LAL 12 10.00 (mol %)	従来	0.7302	0.9327	0.9985	0.9805	0.9201	0.8425	0.7615
	本発明	0.9744	0.9977	0.9930	0.9977	0.9997	0.9908	0.9693
LAL 18 12.50 (mol %)	従来	0.7298	0.9326	0.9985	0.9804	0.9200	0.8424	0.7613
	本発明	0.9847	0.9954	0.9913	0.9974	0.9996	0.9902	0.9676
YGH 51 15.00 (mol %)	従来	0.7275	0.9321	0.9985	0.9803	0.9196	0.8417	0.7605
	本発明	0.9739	0.9977	0.9928	0.9976	0.9997	0.9908	0.9691
LAH 67 17.50 (mol %)	従来	0.7185	0.9301	0.9984	0.9799	0.9182	0.8395	0.7576
	本発明	0.9915	0.9931	0.9899	0.9971	0.9996	0.9897	0.9663
LAH 55 20.00 (mol %)	従来	0.7145	0.9293	0.9984	0.9797	0.9176	0.8385	0.7563
	本発明	0.9934	0.9921	0.9893	0.9970	0.9996	0.9895	0.9659
LAH 57 22.50 (mol %)	従来	0.7123	0.9288	0.9984	0.9796	0.9173	0.8379	0.7557
	本発明	0.9644	0.9989	0.9939	0.9979	0.9997	0.9913	0.9705
LAH 75 25.00 (mol %)	従来	0.6982	0.9258	0.9984	0.9791	0.9153	0.8347	0.7515
	本発明	0.9069	0.9990	0.9978	0.9987	0.9998	0.9932	0.9758

【００５４】

なお、表１では、波長４００ｎｍから７００ｎｍの範囲について示したが、上記（８）式で示した使用波長帯域の上限および下限は、この帯域に特に限定されるものではない。しかし、通常のカメラ等の大半の光学機器は、可視領域で用いられていると共に、この領域で適用可能な光学材料の種類は多く、材料の組み合わせの最適化にとって有利であるので、この実施例による回折光学素子も、実用的には、可視光の波長領域に適用することが最も効果的である。

【００５５】

また、Tl_2Oの添加量は、表１に示したもの以外にも、連続的に変えることができ、これにより図１４の曲線上に分布するガラスを連続的に得ることもできる。さらに、SiO_2－Tl_2Oガラスに他の成分を添加して、屈折率および分散を微調整することにより、図１４の曲線からわずかに離れたガラスを得ることもできる。また、母体材料をSiO_2

から、例えば、B_2O_3 等の他の材料に置き換えることもでき、この場合も、Tl_2Oの添加量により、屈折率と分散を変えることができる。

【００５６】

以上のように、主として、Tl_2Oの添加量を調節することにより、所望の低屈折率高分散のガラスを容易に得ることができるので、使用できる屈折率$n_1(\lambda)$の高屈折率低分散材料も非常に多くなる。その結果、上記（８）式を満たす組み合わせが多数存在することになり、市販のガラスも数多く使用することができるようになる。

【００５７】

この実施例においても、第１実施例の場合と同様に、レリーフパターンを２種類の光学材料の境界面に形成しているので、汚染の問題がなく、したがって光学素子の耐環境性を向上することができる。また、特に、この実施例では、２種類の光学材料をともにガラスとすることができるので、プラスチック等を用いる場合に比べて、光学性能、耐久性に優れた回折光学素子を得ることができる。

【００５８】

なお、第２実施例による回折光学素子は、具体的には、図９～１３と同様に構成することができる。すなわち、図９に示す構成においては、光学材料１１をSiO_2-Tl_2Oガラス、光学材料１２をＬＡＬ１１として、それらの境界面に、等ピッチの鋸歯波状レリーフパターン２１を形成する。また、図１０に示す構成においては、SiO_2-Tl_2Oガラスよりなる光学材料１１とＬＡＬ１１よりなる光学材料１２の境界面のレリーフパターン２３を集光作用を有するように形成すると共に、光学材料１１の外部と接する面３２も集光作用を有するように曲面とする。

【００５９】

このように構成すれば、第１実施例の場合と同様に、素子に入射して特定方向に進行方向を曲げられる光の波長依存が、レリーフパターン２１または２３（回折面）と、外部に接する面３１または３２（屈折面）とで相補的となるので、色収差を低減することができる。

【００６０】

また、図１１に示すように、SiO_2-Tl_2Oガラスよりなる光学材料１１とＬＡＬ１１よりなる光学材料１２の境界面に、断面形状が矩形のレリーフパターン２２を形成する。かかる回折光学素子によれば、第１実施例の場合と同様に、複数の次数の回折光を生成することができると共に、その各次数の回折光の強度分布の波長依存を防止することができるので、遮断周波数の波長依存を低減した空間的ローパスフィルタとして、好適に用いることができる。

【００６１】

さらに、図１２に示すように、異なる光学材料が接する境界面を２面として、それぞれの境界面にレリーフパターン２１，２２を形成する。この場合、２つの境界面を形成する光学材料１１，１２および１３は、中間の光学材料１２をSiO_2-Tl_2Oガラス、両側の光学材料１１，１３をＬＡＬ１１とするか、中間の光学材料１２をＬＡＬ１１、両側の光学材料１１，１３をSiO_2-Tl_2Oガラスとするか、あるいは、それぞれ異なる３種類の光学材料とする。この回折光学素子によれば、第１実施例の場合と同様に、パターンピッチの制限等によって光を曲げる角度が制限される場合に、各パターン面（回折面）が負担する曲げ量を低減できるので、所望の特性のものを容易に得ることができる。

【００６２】

また、図１３に示すように、３つの光学材料１１，１２および１４を積層して得られる２つの境界面の一方にレリーフパターン２３を、他方に球面３３を形成する。この場合、レリーフパターン２３を形成する光学材料１１，１２は、上記のSiO_2-Tl_2OガラスとＬＡＬ１１との組み合わせとするが、光学材料１４は、任意の光学材料を用いる。

【００６３】

なお、この発明は、上述した実施例にのみ限定されるものではなく、幾多の変形または変更が可能である。例えば、図９～１３においては、透過型の回折光学素子の具体的構成に

ついて示したが、この発明にかかる回折光学素子は、外部に接する面にミラーコートを施すことにより、反射型素子として構成することもできる。例えば、図１８に示すように、光学材料１１，１２の境界面にレリーフパターン２１を形成すると共に、光学材料１２側の外部に接する面３４にミラーコートを施す。なお、光学材料１２の層の厚さは、レリーフパターン２１と同程度とする。この回折光学素子によれば、光が面３１の側から入射した場合、波面変調作用がほぼミラーコート面３４で生じていると見なせるので、実質的に反射型格子を得ることができる。

【００６４】

また、上記の各回折光学素子において、光利用効率を向上させるために、レリーフパターンやミラーコートを形成しない面に、反射防止コートを施すこともできる。

【００６６】

【発明の効果】

この発明によれば、回折効率の波長依存を有効に低減することができるので、例えば、カメラのような白色光で使用する光学系に適用した場合には、色むらや不要次数光によるフレアの発生等を有効に防止することができる。また、レリーフパターンを素子の内部に形成するようにしたので、耐環境性を向上することができる。

【図面の簡単な説明】

【図１】断面が鋸歯波状のレリーフパターンにおける位相シフト関数φ（ｘ）を示す図である。

【図２】図２０で示した回折効率の波長依存特性に対応する位相振幅の波長依存特性を示す図である。

【図３】図２の位相振幅の波長依存を決定する要素Ｒ（λ），Ｄ（λ）の波長依存特性を示す図である。

【図４】この発明の第１実施例において、境界面にレリーフパターンを形成する２種類の光学材料の屈折率の波長依存特性の一例を示す図である。

【図５】図４の２種類の光学材料における位相振幅の波長依存を決定する要素Ｒ′（λ），Ｄ（λ）の波長依存特性を示す図である。

【図６】従来の回折光学素子と、２種類の光学材料の不適切な選択による回折光学素子との回折効率の波長依存特性を比較して示す図である。

【図７】従来の回折光学素子と、第１実施例による回折光学素子との位相振幅の波長依存特性を比較して示す図である。

【図８】図７に示した位相振幅の波長依存特性に対応する回折効率の波長依存特性を示す図である。

【図９】この発明による回折光学素子の基本的な構成を示す断面図である。

【図１０】同じく、その変形例を示す断面図である。

【図１１】断面形状が矩形のレリーフパターンを有するこの発明による回折光学素子の構成を示す断面図である。

【図１２】２つの境界面を有するこの発明による回折光学素子の一例の構成を示す断面図である。

【図１３】同じく、他の例を示す断面図である。

【図１４】SiO_2 にTl_2Oを０mol %から２５mol %まで添加した場合の屈折率分散の変化を示す図である。

【図１５】この発明の第２実施例において、境界面にレリーフパターンを形成する２種類の光学材料の屈折率の波長依存特性の一例を示す図である。

【図１６】従来の回折光学素子と、第２実施例による回折光学素子との位相振幅の波長依存特性を比較して示す図である。

【図１７】図１６に示した位相振幅の波長依存特性にそれぞれ対応する回折効率の波長依存特性を比較して示す図である。

【図１８】この発明による反射型回折光学素子の一例の構成を示す断面図である。

【図１９】従来の回折光学素子を示す部分断面図である。

【図２０】従来の回折光学素子における１次回折効率の波長依存特性の一例を示す図である。

【符号の説明】

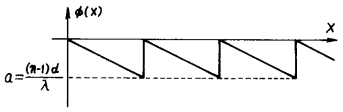
１１，１２，１３，１４　光学材料

２１，２２，２３　レリーフパターン

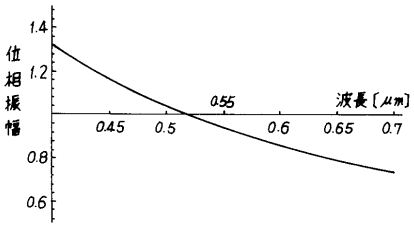
３３　球面

３４　ミラーコート面

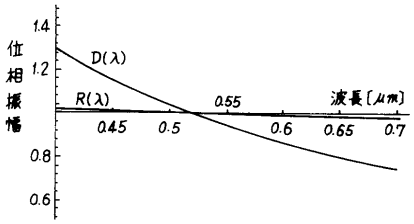
【図１】



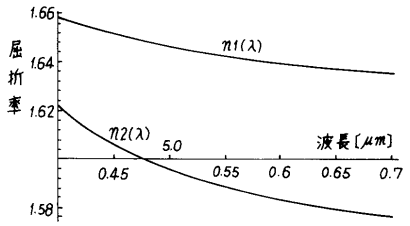
【図２】



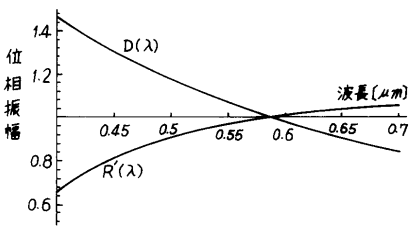
【図３】



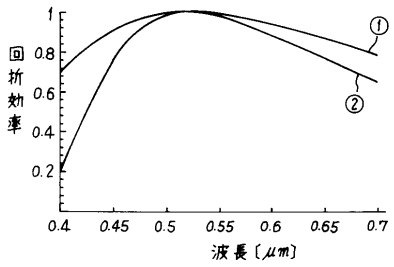
【図４】



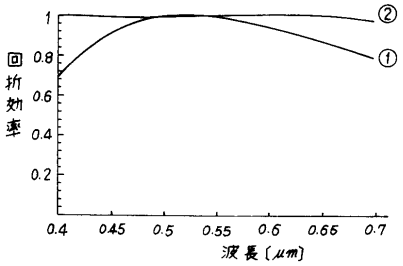
【図５】



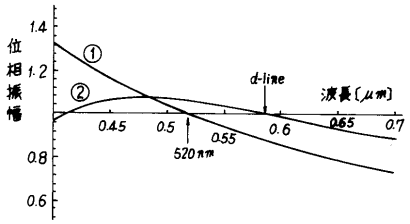
【図６】



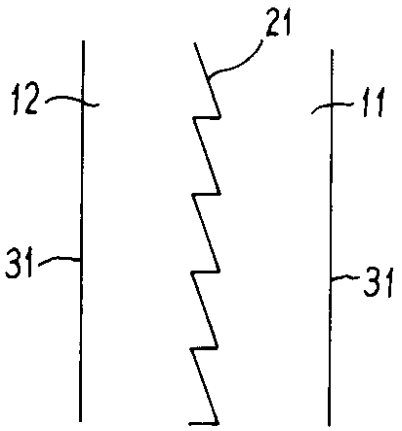
【図８】



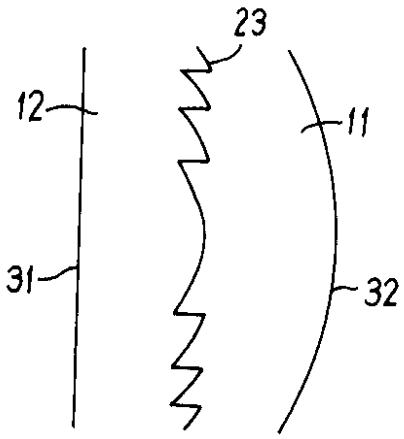
【図７】



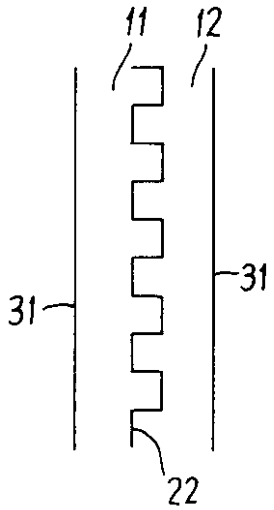
【図９】



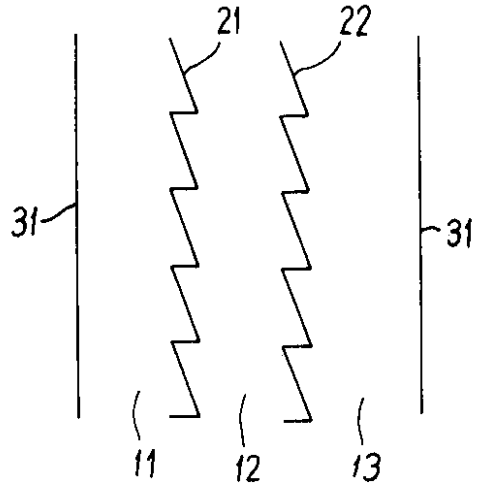
【図１０】



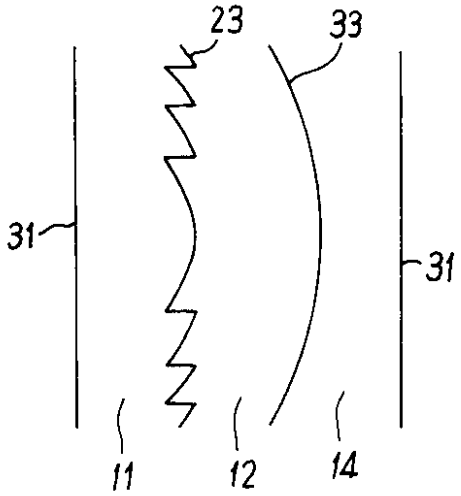
【図１１】



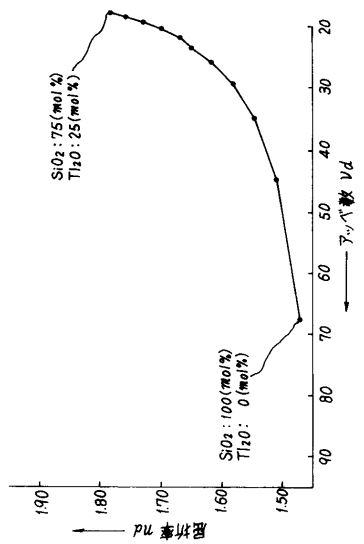
【図１２】



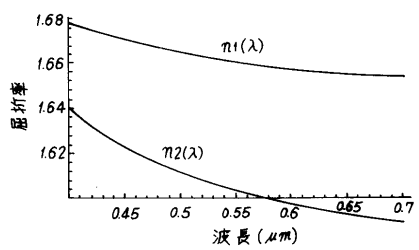
【図１３】



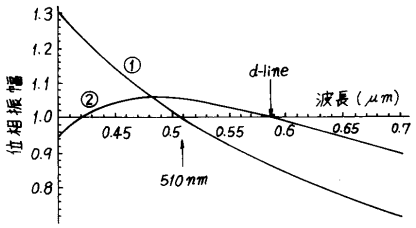
【図１４】



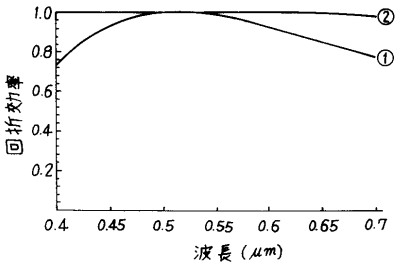
【図１５】



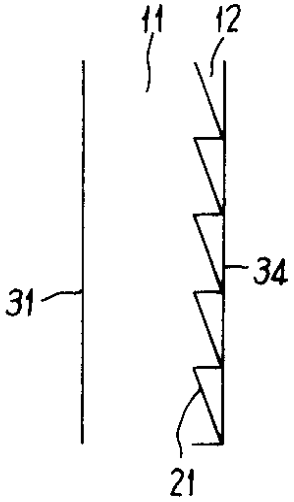
【図１６】



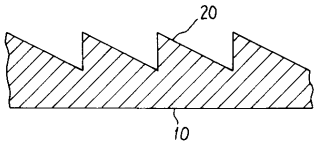
【図１７】



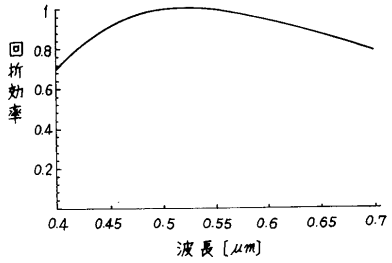
【図１８】



【図１９】



【図２０】



フロントページの続き

(72)発明者　石井　哲也
東京都渋谷区幡ヶ谷２丁目４３番２号　オリンパス光学工業株式会社内
(72)発明者　今村　文美
東京都渋谷区幡ヶ谷２丁目４３番２号　オリンパス光学工業株式会社内

審査官　吉野　公夫

(56)参考文献　特開平０３－１９１３１９（ＪＰ，Ａ）
特開平０６－２２２３６１（ＪＰ，Ａ）
特開昭５９－０５００４７（ＪＰ，Ａ）
特開昭５５－１０１９２２（ＪＰ，Ａ）
特開昭５９－００５２０６（ＪＰ，Ａ）
特開昭６４－０６１７２６（ＪＰ，Ａ）
特開昭５７－１７９０５５（ＪＰ，Ａ）
特開昭５９－０９５５０１（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.[7]，ＤＢ名)
G02B　5/18