

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第4252447号
(P4252447)

(45) 発行日 平成21年4月8日(2009.4.8)

(24) 登録日 平成21年1月30日(2009.1.30)

(51) Int.Cl.

F I

GO2B 21/02 (2006.01)

GO2B 5/18 (2006.01)

GO2B 5/32 (2006.01)

GO2B 21/02 A

GO2B 5/18

GO2B 5/32

請求項の数 23 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2003-507611 (P2003-507611)	(73) 特許権者	597141922
(86) (22) 出願日	平成14年6月19日 (2002. 6. 19)		カール ツァイス イェナ ゲーエムペー
(65) 公表番号	特表2004-530937 (P2004-530937A)		ハー
(43) 公表日	平成16年10月7日 (2004. 10. 7)		ドイツ連邦共和国 D-07745 イェ
(86) 国際出願番号	PCT/EP2002/006798		ナ カールツァイスプロメナーデ 1
(87) 国際公開番号	W02003/001272		O
(87) 国際公開日	平成15年1月3日 (2003. 1. 3)	(74) 代理人	100068755
審査請求日	平成17年5月27日 (2005. 5. 27)		弁理士 恩田 博宣
(31) 優先権主張番号	101 30 212.6	(74) 代理人	100105957
(32) 優先日	平成13年6月22日 (2001. 6. 22)		弁理士 恩田 誠
(33) 優先権主張国	ドイツ (DE)	(72) 発明者	ブルンナー、ロベルト
			ドイツ連邦共和国 07743 イェナ
			ベルゴッフスヴェク 6 デー
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 対物レンズ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

紫外線波長に対する対物レンズ（１）であって、
前記対物レンズ（１）の開口数は 0.5 よりも大きく、前記対物レンズの動作距離（A）は 6 ミリメートルよりも長く、前記対物レンズ（１）は ± 0.5 ナノメートルの波長範囲の色消し効果を有し、

前記対物レンズ（１）は第 1 光学群（５）と第 2 光学群（６）を備え、前記第 2 光学群（６）は前記第 1 光学群（５）の後に続いて配列され、前記第 1 光学群（５）は正の屈折力を有し、前記第 2 光学群（６）は負の屈折力を有し、前記第 1 光学群（５）は数個の屈折素子（7, 8, 9, 10）を含み、

前記第 1 光学群（５）は一つの回折素子（11）を備え、前記回折素子（11）は前記正の屈折力を増大させ且つ前記色消し効果を有し、

前記回折素子（11）は透過型位相格子であり、

前記回折素子（11）の格子数は、前記対物レンズ（１）の光軸（OA）から半径方向に外に向かって、1 ミリメートル当たり 0 ラインから 1 平方ミリメートル当たり 180 ラインまで線形に増大することを特徴とする、対物レンズ。

【請求項 2】

対物レンズ（１）は、顕微鏡対物レンズである、請求項 1 記載の対物レンズ。

【請求項 3】

前記対物レンズ（１）の前記色消し特性は、前記回折素子（11）によって完全に実現

される、請求項 1 または 2 記載の対物レンズ (1)。

【請求項 4】

前記第 1 光学群 (5) と前記第 2 光学群 (6) の全ての前記光学素子 (7 , 8 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14 , 15) は、最大 2 つの異なる材料からなる、請求項 1 乃至 3 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 5】

全ての前記光学素子 (7 , 8 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14 , 15) は、同じ材料からなる、請求項 1 乃至 3 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 6】

全ての前記光学素子 (7 , 8 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14 , 15) は、接着剤を用いることなく支持される、請求項 1 乃至 5 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 7】

前記第 1 光学群 (5) の最大ビーム径は、前記第 2 光学群 (6) の最大ビーム径よりも大きい、請求項 1 乃至 6 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 8】

前記回折素子 (11) は、前記対物レンズ (1) の前記光軸 (O A) に対して対称に回転できる格子である、請求項 1 乃至 7 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 9】

前記格子は、前記対物レンズ (1) の前記光軸 (O A) に対して同心円状に位置する環状の溝を備える、請求項 8 記載の対物レンズ (1)。

【請求項 10】

全ての前記溝は、互いに同じ深さを有する、請求項 9 記載の対物レンズ (1)。

【請求項 11】

各々の前記溝の前記深さは、前記対物レンズの前記光軸 (O A) からの半径方向の距離が増大するにつれて浅くなる、請求項 9 記載の対物レンズ (1)。

【請求項 12】

前記格子は、平行平板の一方の側に形成される、請求項 8 乃至 11 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 13】

前記格子は、前記第 1 光学群 (5) の前記屈折素子 (7 , 8 , 9 , 10) のうちの一つの光学有効表面上に形成される、請求項 8 乃至 11 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 14】

前記格子はブレース格子である、請求項 8 乃至 13 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 15】

前記回折素子 (11) は、最大ビーム径を有する第 1 光学群 (5) の領域に配置される、請求項 1 乃至 14 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 16】

前記回折素子 (11) の所定次数の回折光は、結像に使用される、請求項 1 乃至 15 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 17】

前記所定次数は、正または負の 1 次である、請求項 16 記載の対物レンズ。

【請求項 18】

前記回折素子 (11) は円形状のストップを備え、
前記ストップは、前記対物レンズの前記光軸 (O A) に対して同心円状に配置される、
請求項 1 乃至 17 何れか一項記載の対物レンズ (1)。

【請求項 19】

前記円形状のストップの直径は、前記第 2 光学群 (6) から出て行くビームのビーム径よりも大きくなるように選択される、請求項 18 記載の対物レンズ (1)。

【請求項 20】

10

20

30

40

50

前記第1光学群(5)の全ての屈折素子(7, 8, 9, 10)は、それぞれ正の屈折力を有する、請求項1乃至19何れか一項記載の対物レンズ(1)。

【請求項21】

前記第2光学群(6)のみが、負の屈折力を有する素子を備える、請求項1乃至20何れか一項記載の対物レンズ(1)。

【請求項22】

前記色消し効果の前記波長範囲は 193 ± 0.5 ナノメートル、 213 ± 0.5 ナノメートル、 248 ± 0.5 ナノメートル、 266 ± 0.5 ナノメートル、および 157 ± 0.5 ナノメートルである、請求項1乃至21何れか一項記載の対物レンズ(1)。

【請求項23】

前記色消し効果の前記波長範囲は 193 ± 0.5 ナノメートルである、請求項1乃至22何れか一項記載の対物レンズ(1)。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は対物レンズに関し、特に顕微鏡対物レンズに関する。前記対物レンズは正の屈折力を有する被写体側第1光学群と、前記第1光学群の後に続いて配列され、負の屈折力を有する第2光学群とを備え、前記第1光学群は幾つかの屈折素子を含む。

【背景技術】

【0002】

そのような顕微鏡対物レンズは、例えば、半導体構成要素の製造に使用されるマスクを光学的に制御する顕微鏡に用いられる。このようなマスクは、例えば石英基板を有し、この石英基板上にはマスク構造がクロムで形成される。その表面がマスク構造から離れる形でマスク構造から7.5ミリメートルの距離に位置する取り外し可能なプラスチック層を、マスク構造上に取り付け前記マスクを保護する。光制御に要求される解像度を達成するために、顕微鏡対物レンズは0.5よりも大きい開口数を有するが、この場合、対物レンズの作動距離は通常1ミリメートルよりも短い。このため、保護層を除去してマスクを制御する必要があり、これが一方で制御期間中の作業コストを押し上げ、また他方でマスクの品質をかなり下げるパーティクルが望ましくない形でマスクに付着してしまう。

【0003】

さらにそのような顕微鏡対物レンズにおいては、266ナノメートルよりも短い波長では、ホタル石レンズ及び石英ガラスレンズを設けて色消しを行なうことも必要となる。しかしながら、ホタル石は非常に高価であり、しかも要求精度で処理することが難しく、さらには不利なことに吸湿性を示す。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

このことから、本発明の目的は対物レンズ、特に前述のタイプの顕微鏡対物レンズを改良して対物レンズが高開口数と同時に大きな動作距離を有するようにすることにある。

【課題を解決するための手段】

【0005】

前述のタイプの対物レンズにおいては、この目的は、第1光学群が、回折を大きくする効果と、色消し効果を有する少なくとも一つの回折素子を含むことにより達成される。

正の屈折力または正の効果(例えば、第1光学群の)とは、ここでは、ビームの発散を小さくする、またはビームを変えて収束させる性能、或いは収束を強める性能と解される。第1光学群に関連する形で、この性能を回折素子の少なくとも1次の回折光に適用する。このようにして、前記少なくとも1次の回折光に対して、回折素子それ自体も正の屈折力、及びその結果としての屈折増大効果を有する。負の屈折力または負の効果(例えば、第2光学群の)とはここでは、ビームの発散を大きくする性能、またはビームの収束を弱くする性能、或いは前記収束を発散に変える性能とも解される。従って、回折素子が備え

10

20

30

40

50

る色消し効果は少なくとも１次の回折のために在り、この少なくとも１次の回折に対しては回折素子も屈折増大効果を有する。

【０００６】

このような回折素子とすることにより、本発明による対物レンズは光学素子を備え、この光学素子により、本発明による対物レンズの球面収差及びコマ収差を、例えば利点を生じる形で改良することができ、そして同時に、この光学素子が対物レンズの色消し特性にも寄与する。何故ならば、回折素子の発散が本発明による対物レンズの屈折素子の発散に対して逆行するからである。

【０００７】

このようにして、本発明による対物レンズにおいては、ホタル石レンズを使用して紫外線範囲（３００ナノメートルよりも短い波長）の用途において色消しを行なう必要が無いので、色消しが要求されるためにこれもホタル石レンズを備えることとなっている従来の対物レンズに比べてその製造が容易となる。

【０００８】

特に、本発明による対物レンズの光学素子材料は、他の重要な特性の観点（例えば、動作性または透過特性）から要求される色消し特性に関係なく選択することができ、前記光学素子の全てを同じ材料または異なる材料からも作製することができる。

【０００９】

また回折素子は、屈折素子に比べて比較的大きい正の屈折力（または大きな正の効果）を有するので、本発明による対物レンズの素子数が屈折素子のみから構成される対物レンズと比べて明らかに少なくなる。これは特筆すべき利点であり、特に数ナノメートル以下の波長範囲の色消し高性能対物レンズにおいて顕著である。というのは、光学素子が作製され、調整されるところの精度が極端に高いために、どのような素子でも使用しなくて済むのであれば明らかにより経済的で、より短期間で作製できる対物レンズが可能となるからである。

【００１０】

さらに、本発明による対物レンズの面間寸法は、従来の（純粋に屈折のみの）対物レンズに比較して非常に短いために、利点を生じる形で同じ開口及び同じ動作距離で実現可能となる。従って、本発明による対物レンズを交換可能な対物レンズとして容易に実現することができる。この対物レンズを、光学検査システム及び顕微鏡のような既に在る装置に、この目的のためにこれらの装置を変更する必要を生じることなく挿入することができる。これにより、前記装置は、非常に大きな開口率とともに非常に長い動作距離を有する本発明による対物レンズを問題を全く生じることなく容易に再装備することができる。

【００１１】

回折素子は、対物レンズが備える色消し効果及び第１光学群の屈折増大効果に加えて、本発明による対物レンズの残りの光学素子により生じる高次の球面収差も補償されるように設計されることが好ましい。

【００１２】

また、本発明による対物レンズにおいて色消し効果を持った回折素子により、極端に小さい端部厚さ及びレンズ間の極端に短いエアギャップの問題 実装技術を極度に複雑にしている必要な色消しが原因で屈折素子のみで構成される対物レンズにおいて生じる を防止することができるので、光学素子の実装が本発明による対物レンズにおいては明らかに簡素化されるという利点が生じる。これが、本発明による対物レンズの作製を経済的かつ迅速にしている別の理由である。

【００１３】

本発明による対物レンズの好適な実施形態においては、両方の光学群の全ての光学素子が最大２つの異なる材料、好ましくは同じ材料から形成される。色消しは回折素子により行なわれるので、材料は、本発明による対物レンズが使用される予定のスペクトル範囲に最も適するものが選択される。例えば、最良の透過特性を有する材料及び／又は最も容易に動作する材料が選択される。このようにして、前記素子は、例えば石英及び／又はフッ

10

20

30

40

50

化カルシウムにより構成することができる。

【0014】

193±0.5ナノメートル、213±0.5ナノメートル、248±0.5ナノメートル、266±0.5ナノメートルの波長範囲に対して、スプラシル（合成石英）が好適であり、そして157±0.5ナノメートルでは、ホタル石が好適な材料である。

【0015】

特に、本発明による対物レンズは、所定の波長範囲に対する対物レンズの所望の色消し特性が少なくとも一つの回折素子により完全に実現されるように設計される。所望の色消し特性が対物レンズの完全な色消し特性である場合、対物レンズの後に続いて配列される、顕微鏡のチューブレンズのような光学配列が、それらの色消し特性の観点から対物レンズとは全く関係なく設計される。もう一つ別の方法として、所望の色消し特性を本発明による対物レンズの不完全な色消し特性として、対物レンズから出て行くビームが完全には無色とならないようにすることができる。所望であれば、対物レンズの後に続いて配列される光学配列（例えば、顕微鏡のチューブレンズ）を用いて、完全な色消し特性が実現されない状態を提供することができる。

10

【0016】

本発明による対物レンズの基本は、屈折素子（これらの素子はそれら自体は全く色消しがされないことが好ましい）の色消し特性が、少なくとも一つの回折素子（または、幾つかの回折素子によっても）により実質的に、または時には排他的に実現されることにある。第2光学群は回折素子を含まないことが好ましいが、一つのみ、または時には幾つかの屈折素子を含むことができる。勿論、第2光学群は一つまたはそれよりも多くの回折素子を含むことも可能である。

20

【0017】

本発明による対物レンズにおいては、両方の光学群の光学素子が接着剤を用いることなく実装されるので、特に大きな問題を生じさせる紫外線範囲の波長で見られるように、光学接着剤を使用するシステムにおいて、接着剤が古くなるという不具合を回避できるという利点が得られる。これにより、本発明による対物レンズの非常に長い使用寿命が保証される。

【0018】

本発明による対物レンズにおいては、第1光学群における最大ビーム径が第2光学群における最大ビーム径よりも大きいという利点がある。これにより、本発明による対物レンズの大きな開口数及び短い面間寸法を実現することができる。特に、本発明による対物レンズを顕微鏡に使用することにより高解像度が達成される。

30

【0019】

本発明による対物レンズの回折素子は、対物レンズの光軸に対して対称に回転することができる格子であるので、本発明による対物レンズにおける回折素子の組み込み及び調整が前記対称性により簡易化される。これにより、本発明による対物レンズの迅速な作製も可能となる。

【0020】

対物レンズの実施形態は利点を生じるものであり、この実施形態は、回折素子が透過型格子、好ましくは透過型位相格子を備え、この格子の格子数が対物レンズの光軸から半径方向に外に向かって増大する。前記格子は、例えば環状の溝であり、これらの溝は光軸に対して同心円状であり、前記格子は平坦な表面上に形成されることが好ましい。この平坦表面は、第1光学群の平行平面板の表面または第1光学群のレンズの表面のいずれかとすることができる。前記格子を平坦表面上に設けることにより、その作製を簡易化することができる。

40

【0021】

もう一つ別の方法として、格子を第1光学群の回折素子の内の一つの曲面からなる有効面または曲面からなる有効界面の上に形成することもできる。この場合、光学素子の数をさらに減らすことが出来るという利点が生じるので、本発明による対物レンズの作製が一

50

層迅速、かつ、さらに経済的になるという効果が得られる。

【0022】

本発明による対物レンズにおいてはさらに有利なことに、回折素子を第1光学群の最大ビーム径の領域に配列する。何故なら、この領域は回折素子の大きな屈折力を最大限に有効に使用できる領域であるからである。また、散乱光（所望しない次数の光）は回折素子の後に続いて配列される実装レンズ群により大きく遮断され、或いは、（結像に使用される）有用な光の像点距離とは明らかに異なる像点距離を有する対物レンズから出て行くので、散乱光が非常に大きく拡大される。従って、結像性能がせいぜいほんの少しだけ劣化するだけである。

【0023】

特に有利な点は、格子はブレース格子として設けられるので、所望の次数の回折格子の集光効率が極めて高くなる。この次数の回折光は、本発明による対物レンズの光学素子により結像に寄与する有用な光であり、これらの光学素子は回折素子の後に続いて配列され、そして無色ビームとして対物レンズから出て行くと考えられる。

【0024】

ブレース格子がホログラフィックな定在波法により形成される場合、溝の端部は一様であり、ステップ関数で近似する必要は無いので、対物レンズの結像性能を劣化させる拡散散乱光が実際に現れないという利点がある。

【0025】

理論的に最適な回折効率に出来る限り近づけるために、本発明による対物レンズの回折素子の溝が、個々の溝の深さが、溝から中心までの半径方向の距離が長くなるにつれて浅くなるように形成する。

【0026】

しかしながら、別の方法として溝を、これらの溝の全てが同じ深さを有するようにも形成することができる。この場合、格子の作製が簡易化され、そして格子を、例えば半導体製造において公知の構造形成方法により形成することができる。

【0027】

一定の深さを有する格子においては、回折素子の端部領域の最適深さが全ての溝が有する深さとして選択される場合に、端部領域は格子の中央部に比べてその表面面積が大きいために集光に最も寄与するので、外側部分が開口に大きく寄与する。そしてその結果、対物レンズの解像度の大部分を決定することが特に好ましい。同じ理由により、異なる深さの溝を備える格子においては、溝が、最適な深さを有する端部領域にも形成されることが好ましい。

【0028】

本発明による対物レンズの特に好適な実施形態は、回折素子からの所定次数、好ましくは、正または負の1次の回折光のみが、無色にされ、かつ、屈折が強められた結像する光として使用され、そして、他の次数の回折光は使用してはならない散乱光または不適切な光とする構成である。

【0029】

本発明による対物レンズのさらに有利な実施形態においては、円形状の中央ストップ（stop）が回折素子上または近傍に設けられ、対物レンズの光軸に対して同心円状に配列され、そしてこのストップの直径が、回折素子の後に続いて配列される実装光学素子により遮断される0次の回折光が確実に遮断されるように選択されることが好ましい。このようにして、0次の回折光が本発明による対物レンズの結像性能を劣化させるといふ不具合が生じない。前記直径は、実際、第2光学群から出て行くビームの直径と同じ大きさになるように選択することもできる。これにより、0次の回折光が絶対に結像性能を劣化させないという優れた効果が得られる。

【0030】

さらに、本発明による対物レンズの好適な実施形態においては、第1光学群の全ての回折素子の各々が正の屈折力を有する。これにより、第1光学群が全体として、解像度が非

10

20

30

40

50

常に高くなるように大きな開口で非常に大きな正の屈折力を有することが可能となる。

【 0 0 3 1 】

さらに、第 2 光学群が負の屈折力を有する素子のみを備えることにより、第 2 光学群が容易に所望のビームを形成することができ、このビームは第 2 光学群から出て行くと考えられ、そして平行ビームであることが好ましい。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 3 2 】

図 1 に示す顕微鏡の光学構造のレンズ部から明らかなように、顕微鏡対物レンズ 1 及び対物レンズ 1 の後に続いて配置されるチューブレンズユニット 2 は、物体平面 3 に位置する被写体の拡大画像を画像平面 4（または中間画像平面）に結像させる。顕微鏡対物レン
10
ズ 1 は高性能の対物レンズであり、このレンズは、例えば半導体製造用マスクの制御に使用される顕微鏡に用いられる。ここに記載する顕微鏡対物レンズ 1 は 193 ± 0.5 ナノメートルのスペクトル範囲で色消しが行なわれる色消しレンズとし、そして 0.65 の開口数で 50 倍の倍率と、7.8 ミリメートルの動作距離を有する。この場合、被写体フィールド径は 0.1 ミリメートルであり、画像フィールド径は 5.0 ミリメートルである。

【 0 0 3 3 】

図 2 の拡大図から最も良くわかるように、顕微鏡対物レンズ 1 は正の屈折力（または正の効果）を有する被写体側第 1 光学群 5 と、第 1 光学群 5 の後に続いて配列され、負の屈折力（負の効果）を有する第 2 光学群 6 を備え、この顕微鏡対物レンズ 1 においては、光
20
学群 5 及び 6 双方の全ての光学素子が同じ材料、すなわちスプラシル（合成石英）から成る。

【 0 0 3 4 】

図 2 を左から右に眺めると、第 1 光学群 5 は第 1、第 2、第 3 及び第 4 レンズ 7, 8, 9 及び 10 とともに、回折光学素子 11 を有する。第 5、第 6、第 7 及び第 8 レンズ 12, 13, 14 及び 15 が第 2 光学群 6 を形成する。レンズ 7 ~ 10 及び 12 ~ 15 のデザインと、顕微鏡対物レンズ 1 の全光学素子 7 ~ 15 の配列が下の表 1 から明らかになる。

【 0 0 3 5 】

【表 1】

表1

表面から表面	距離 [mm]	表面	半径 [mm]	自由径[mm]
3-101	10.1	101	19.525 凹	14.9
101-102	3.7	102	10.442 凹	16.4
102-103	0.1	103	58.714 凹	19.3
103-104	3.3	104	19.248 凹	20.1
104-105	0.15	105	66.836 凸	21.5
105-106	3.2	106	57.874 凹	21.7
106-107	0.1	107	20.684 凸	21.5
107-108	4.3	108	97.407 凸	20.7
108-109	1.1	109	平坦	20.4
109-110	3.2	110	平坦	17.6
110-111	1.3	111	81.748 凹	16.1
111-112	2.6	112	73.387 凸	13.6
112-113	5.9	113	15.07 凹	7.6
113-114	2.0	114	81.748 凸	6.5
114-115	3.16	115	7.718 凹	4.8
115-116	0.9	116	8.292 凸	4.5
116-117	0.3	117	3.599 凸	4.6
117-118	2.06	118	2.973 凸	3.6

10

20

30

図 1 に示すように、チューブレンズ 2 はレンズ 1 6 , 1 7 及び 1 8 を有し、これらのレンズの構造及びデザインは次の表から明らかになる。

【 0 0 3 6 】

【表 2】

表2

表面から表面	距離 [mm]	表面	半径 [mm]
118-119	99.87	119	107.46 凸
119-120	5.7	120	42.17 凹
120-121	1.13	121	40.388 凹
121-122	3.8	122	281.84 凹
122-123	9.0	123	平坦
123-124	40.04	124	平坦
124- 4	120.65		

回折光学素子 1 1 は透過型位相格子であり、この格子においては対物レンズ 1 の光学軸 O A に対して同心円状に配置された環状溝が、物体平面 3 に対向する表面 1 0 9 に形成される。

【 0 0 3 7 】

この場合、回折光学素子 1 1 は、一方で第 1 光学群 5 に対して屈折増大効果（すなわち、正の効果の増大または正の屈折力の増大）を有し、他方で対物レンズ 1 の所定のスペクトル範囲（ 193 ± 0.5 ナノメートルの）で完全な色消しができるように設計され、この場合、正の 1 次回折光が結像に寄与する有用な光として使用される。他の次数の回折光は散乱光であり、この散乱光は可能であれば前記結像性能に関与させないで前記結像性能を劣化させないようにする。

【 0 0 3 8 】

この正の 1 次は 1 次回折光であり、この 1 次回折光においては、平行ビーム（対物レンズの光学軸 O A に平行なビーム）が光学軸 O A に向かって偏向される。他方、1 次回折光においては、平行ビームが光学軸 O A から離れる方向に偏向されるが、この 1 次回折光は負の 1 次回折光と呼ばれる。

【 0 0 3 9 】

正の 1 次回折光の偏向角度は回折光学素子 1 1 の格子数を通して調整される。実際、格子数は次の多項式 $p(r)$ に基づく最適化計算により算出される。

【 0 0 4 0 】

【数 1】

$$p(r) = \sum_{i=1}^N a_i r^{2i}$$

ここで、 r は位相格子の中心 M からの半径方向の距離であり、 N は 1 よりも大きい正の整数である。最適化のために係数 a_i を変える。位相多項式 $p(r)$ は半径方向の距離 r の関数としての位相シフトを示し、かつ、この位相多項式 $p(r)$ により、半径方向の距離 r に従って、位相多項式の微分を基にして回折素子の格子数を算出することができる。すると今度は、前記格子数により各入射ビームの出射角を求めることができ、続いて格子が備える色消し効果及び屈折増大効果を求めることができる。この最適化計算において、レンズ 7 ~ 10 及び 12 ~ 15 の他の収差（高次の球面収差のような）も続いて補正され、この場合、3 ~ 10 の値が N として選択されることが好ましい。

【 0 0 4 1 】

図3は、このようにして最適化された回折光学素子11の中心部の格子数の様子を示している。このとき、格子中心Mからの距離が横軸（一目盛が5ミリメートルに相当する）上にプロットされ、そして1ミリメートル当たりのライン（溝）の数が縦軸にプロットされ、この場合、ゼロ点は縦軸と横軸の交点に位置し、縦軸の各区分は1ミリメートル当たり500ラインに相当する。このように、図3は、中心Mからの距離が半径方向に増大すると、格子数が（中心Mで）1ミリメートル当たり0ラインから最大数の1ミリメートル当たり1841ラインに増える。

【 0 0 4 2 】

理論的に最適な回折効率には次のような格子において実現することができる。すなわち、個々の溝の深さが、中心からの溝の距離が半径方向に長くなるにつれて浅くなり、格子の端部領域における溝の深さが、より内側に位置する溝の深さよりも浅くなるように選択される。このような格子は、以下に記述するホログラフィックな定在波法を使用して有利な方法で容易に形成することができる。何故なら、この方法においては、所望の深さ分布も容易に実現するからである。もう一つ別の方法として、好ましくは溝の全てが同じ深さを有するように格子を形成し、前記深さが光学回折素子11の端部領域において最適値（例えば、300ナノメートル）に固定される。何故なら、端部領域の表面面積が中央部の中間領域と比較して広いために、端部領域が集光に最大限に寄与し、従って回折効率に対しても最大限に寄与する。さらに、端部領域が本発明による対物レンズの解像度に最も寄与する。一定の溝深さを有する格子及び変化する深さを有する格子は、半導体製造から転用される構造法により形成することができ、この場合、格子が形成される予定の基板に塗布される適切なラッカーコートが露光され（例えば、マスク露光または電子ビーム・リソグラフィにより）、構造化される。次に、ラッカーコートに形成された構造が公知の方法（リアクティブ・イオン・エッチングなど）により転写される。これにより所望の格子を要求精度で形成することができる。

【 0 0 4 3 】

上述したように、正の1次回折光を結像に使用することにより、他の次数の回折光が所望しない散乱光となる。前記散乱光が結像品質へ及ぼす影響をできる限り小さくするために、第1光学群5の回折光学素子11は最大ビーム径の領域に配置される。このようにして、散乱光の大部分は、後に続く実装レンズ12～15により容易に遮断することができ、この場合、ビーム径は図2に示すように相当小さくなる。さらに、回折光学素子11の後に続く実装レンズ12～15により遮断されない散乱光は、回折光学素子11の非常に多くのラインが原因で顕微鏡対物レンズ1から正の1次回折光とは明らかに異なる像点距離を有する形で出て行く。この場合散乱光は、顕微鏡対物レンズ1とチューブレンズ2との間に位置する中間画像へ向かう途中の散乱光の収束または発散拡大により大きく拡大されるので、実装チューブレンズ2によりその多くが遮断される。チューブレンズ2により遮断されない非常に小さな部分が大きく焦点ぼけした形でのみ画像に入射する程度であるので、画像は著しくは劣化しない。

【 0 0 4 4 】

さらに、回折光学素子11は、所定のスペクトル範囲で対物レンズ1の色消し特性を十分に発揮させるように設計されるので、顕微鏡対物レンズ1の全ての素子7～15を全く問題を生じることなく、同じ材料により構成することができる。このように、所望の波長に最も適する、例えば最良の伝送特性を有し、及び/又は、最も容易に動作する材料が選択される。

【 0 0 4 5 】

図4は本発明による顕微鏡対物レンズ1の断面図であり、ここには実装光学素子7～15も示される。図からすぐに明らかになるように、顕微鏡対物レンズ1は接着剤に触れない非常に小型の構造を有し、非常に少ない数の光学素子（7～15）と、開口数0.65で非常に長い7.8ミリメートルの動作距離Aを有する。顕微鏡対物レンズ1の非常に短い面間寸法により、顕微鏡対物レンズを特にモジュールの形でも既存の検査システムに組

10

20

30

40

50

み込むことができる。

【0046】

回折光学素子11の表面109の格子構造はホログラフィックに作製することができる。この目的のためには、ラッカーコート19を平行平板11'（スプラシル）の上表面に塗布し、次に図5に模式的に示すように、ホログラフィックな定在波法により露光する。ラッカーコート19は波長458ナノメートルで露光されるように設計され、200～500ナノメートルの厚さを有する。

【0047】

ホログラフィックな定在波法においては、2つの収束するコヒーレントな球面波（好ましくはレーザ照射）が重ね合わされてラッカーコート19に現れる干渉パターンにより所望の潜像格子構造が露光される。この場合、図5に示すように、第1球面波はポイント20に原点を有し、右に伝播する。第2球面波は第1球面波に対して向流となる形で伝播し、ポイント21に焦点を有する。ポイント20及び21からラッカーコート19までの距離d1、d2は、ラッカーコート19の所望の格子構造が露光されるように選択される。ポイント20からラッカーコート19の上表面までの距離d1は22.776ミリメートル、そしてポイント21からラッカーコート19の上表面までの距離d2は21.158ミリメートルである。

【0048】

ラッカーコート19を露光した後現像すると、ラッカーコート19が構造化されて所望の格子構造を示すようになる。次に、前記格子構造が平行平板11'の表面にリアクティブ・イオン・エッチング（RIE）により転写されることにより、所望の深さの溝を得ることができる。その後、エッチングしてもまだ残っている可能性のあるラッカーコート19の残留物をすべて除去すると、回折光学素子11が完成する。

【0049】

本発明による対物レンズの結像性能のさらなる改良は、中央ストップ（図示せず）を回折光学素子11の表面109または110に設けることにより達成され、この場合前記ストップは円形状であり、光軸OAに対して同心円状に配置される。前記中央ストップの直径は、第2光学群6から出て行くビームのビーム径と同じ大きさになるように選択することが好ましい。これにより、0次の回折光が光軸OA周りの中央領域から遮断され、そしてその結果、第2光学群に入射しないので、中央領域からの0次の回折光による対物レンズ1の結像性能の劣化を防止することができる。ストップにより捕捉されない0次の回折光は回折素子11の後に配列される実装レンズ12～15により遮断されるので、改良された結像性能がストップにより達成される。

【図面の簡単な説明】

【0050】

【図1】チューブレンズに本発明による顕微鏡対物レンズの光学構造のレンズ部を加えた構成を示す。

【図2】図1に示す顕微鏡対物レンズの拡大図を示す。

【図3】回折光学素子の格子数を示す図である。

【図4】本発明による顕微鏡対物レンズの断面を示す。

【図5】回折光学素子の作製を説明する模式図を示す。

10

20

30

40

【図 1】

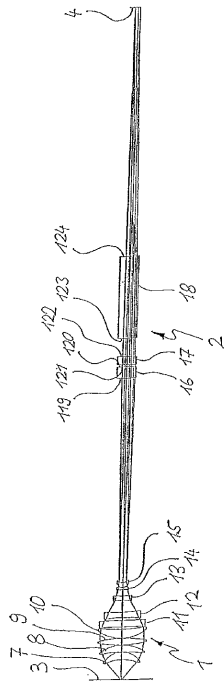


Fig. 1

【図 2】

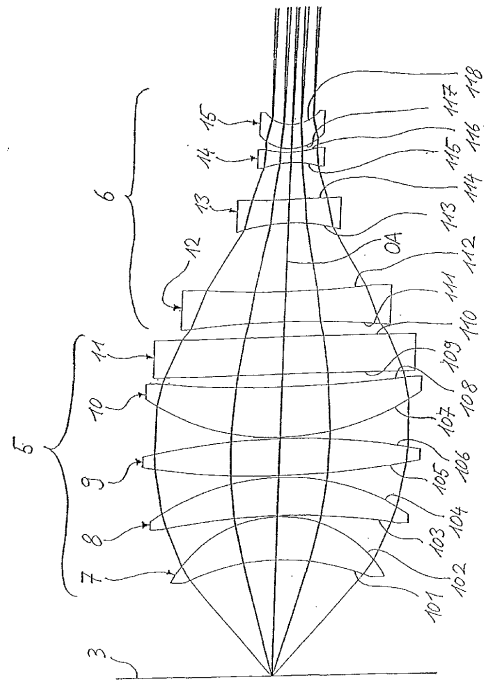


Fig. 2

【図 3】

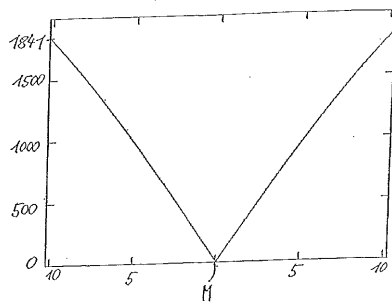


Fig. 3

【図 4】

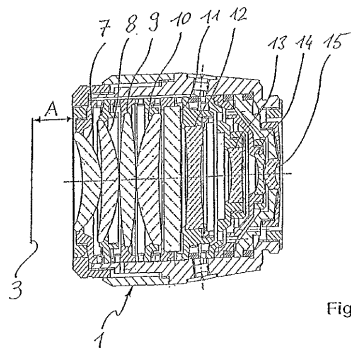


Fig. 4

【図 5】

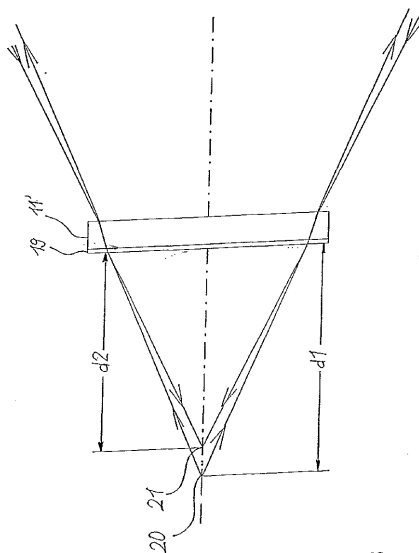


Fig. 5

フロントページの続き

(72)発明者 ハーゲ、クヌート

ドイツ連邦共和国 9 9 5 1 0 アポルダ ヴィルツブルガー シュトラーセ 3 1

(72)発明者 ドブシャル、ハンス - ユルゲン

ドイツ連邦共和国 9 9 5 1 0 クラインロムシュテット アム ケツショウアー ヴェーク 2
6 アー

(72)発明者 ルドルフ、クラウス

ドイツ連邦共和国 0 7 7 4 9 イェナ マルデルヴェーク 9

(72)発明者 シュタイナー、ラインハルト

ドイツ連邦共和国 0 7 6 4 6 シュタットローダ ホムベルガー リング 1 1 アー

審査官 原田 英信

(56)参考文献 特開平 0 8 - 0 6 2 5 0 4 (J P , A)

特開平 1 1 - 3 2 6 7 7 2 (J P , A)

特開平 0 8 - 2 8 6 1 1 3 (J P , A)

特開 2 0 0 1 - 3 0 5 4 3 1 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G02B 9/00 - 17/08

G02B 21/02 - 21/04

G02B 25/00 - 25/04