

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6157364号
(P6157364)

(45) 発行日 平成29年7月5日(2017.7.5)

(24) 登録日 平成29年6月16日(2017.6.16)

(51) Int. Cl.		F I			
GO2F	1/01	(2006.01)	GO2F	1/01	D
GO2F	1/13	(2006.01)	GO2F	1/01	B
GO2B	21/00	(2006.01)	GO2F	1/13	505
			GO2B	21/00	

請求項の数 11 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2013-556524 (P2013-556524)	(73) 特許権者	000001960
(86) (22) 出願日	平成25年2月1日(2013.2.1)		シチズン時計株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2013/052390		東京都西東京市田無町六丁目1番12号
(87) 国際公開番号	W02013/115383	(74) 代理人	100099759
(87) 国際公開日	平成25年8月8日(2013.8.8)		弁理士 青木 篤
審査請求日	平成27年11月4日(2015.11.4)	(74) 代理人	100092624
(31) 優先権主張番号	特願2012-21665 (P2012-21665)		弁理士 鶴田 準一
(32) 優先日	平成24年2月3日(2012.2.3)	(74) 代理人	100114018
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		弁理士 南山 知広
(31) 優先権主張番号	特願2012-150194 (P2012-150194)	(74) 代理人	100133835
(32) 優先日	平成24年7月4日(2012.7.4)		弁理士 河野 努
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(72) 発明者	松本 健志
			東京都西東京市田無町六丁目1番12号
			シチズンホールディングス株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 位相変調デバイス及びレーザ顕微鏡

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

コヒーレント光源から出射されるコヒーレント光の光束の光路中に配置された対物レンズを含む光学系により生じる波面収差を補正する位相変調デバイスであって、

複数の電極が形成され、該複数の電極のそれぞれに印加された電圧に応じて前記対物レンズを透過する前記光束の位相を変調する位相変調素子と、

前記複数の電極に印加する電圧を制御する制御回路とを有し、

前記波面収差の位相分布をZernike多項式で分解したときの、3次球面収差と5次球面収差との比と前記対物レンズの開口数の関係式に従って定められる前記位相分布の逆極性を有する位相変調プロファイルに従った位相変調量を前記光束に与えるように、前記制御回路が、前記複数の電極に印加する電圧を制御し、

前記対物レンズは水浸用対物レンズであり、前記関係式が次式で表され、

【数 1】

$$1.91NA - 1.87 - \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \leq \frac{B}{A} \leq 1.91NA - 1.87 + \sqrt{\frac{1.4}{A^2}}$$

かつ、

$$1.15 \leq NA \leq 1.27$$

ここで、Aは3次元球面収差の成分を表し、Bは5次元球面収差の成分を表し、NAは前記対物レンズの開口数を表す、
位相変調デバイス。

【請求項 2】

コヒーレント光源から出射されるコヒーレント光の光束の光路中に配置された対物レンズを含む光学系により生じる波面収差を補正する位相変調デバイスであって、

複数の電極が形成され、該複数の電極のそれぞれに印加された電圧に応じて前記対物レンズを透過する前記光束の位相を変調する位相変調素子と、

前記複数の電極に印加する電圧を制御する制御回路とを有し、

前記波面収差の位相分布をZernike多項式で分解したときの、3次球面収差と5次球面収差との比と前記対物レンズの開口数の関係式に従って定められる前記位相分布の逆極性を有する位相変調プロファイルに従った位相変調量を前記光束に与えるように、前記制御回路が、前記複数の電極に印加する電圧を制御し、

前記対物レンズは水浸用対物レンズであり、前記関係式が次式で表され、

【数 2】

$$1.37NA - 1.21 - \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \leq \frac{B}{A} \leq 1.37NA - 1.21 + \sqrt{\frac{1.4}{A^2}}$$

かつ、

$$1.05 \leq NA \leq 1.27$$

ここで、Aは3次元球面収差の成分を表し、Bは5次元球面収差の成分を表し、NAは前記対物レンズの開口数を表す、
位相変調デバイス。

【請求項 3】

コヒーレント光源から出射されるコヒーレント光の光束の光路中に配置された対物レンズを含む光学系により生じる波面収差を補正する位相変調デバイスであって、

複数の電極が形成され、該複数の電極のそれぞれに印加された電圧に応じて前記対物レンズを透過する前記光束の位相を変調する位相変調素子と、

前記複数の電極に印加する電圧を制御する制御回路とを有し、

前記波面収差の位相分布をZernike多項式で分解したときの、3次球面収差と5次球面収差との比と前記対物レンズの開口数の関係式に従って定められる前記位相分布の逆極性を有する位相変調プロファイルに従った位相変調量を前記光束に与えるように、前記制御回路が、前記複数の電極に印加する電圧を制御し、

前記対物レンズはドライ用対物レンズであり、前記関係式が次式で表され、

【数 3】

$$1.06NA - 0.64 - \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \leq \frac{B}{A} \leq 1.06NA - 0.64 + \sqrt{\frac{1.4}{A^2}}$$

かつ、

$$0.75 \leq NA \leq 0.95$$

ここで、A は 3 次元球面収差の成分を表し、B は 5 次元球面収差の成分を表し、NA は前記対物レンズの開口数を表す、
位相変調デバイス。 10

【請求項 4】

前記光学系の光軸上の位相変調量と、前記位相変調素子の光束を位相変調できる領域であるアクティブ領域の端部の位相変調量が等しくなるように、前記位相変調プロファイルが決定される、請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の位相変調デバイス。

【請求項 5】

前記位相変調プロファイルの 2 乗平均平方根値が最小となるように、前記位相変調プロファイルが決定される、請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の位相変調デバイス。

【請求項 6】

前記位相変調素子は、液晶素子である請求項 1 ~ 5 の何れか一項に記載の位相変調デバイス。 20

【請求項 7】

前記制御回路は、前記コヒーレント光の波長に応じて前記位相変調プロファイルを調節する請求項 6 に記載の位相変調デバイス。

【請求項 8】

前記複数の電極は、前記光学系の光軸を中心とする同心円状の複数の輪帯電極を持つ請求項 1 ~ 6 の何れか一項に記載の位相変調デバイス。

【請求項 9】

前記複数の輪帯電極は、それぞれ抵抗子によって接続され、前記制御回路は、前記位相変調プロファイルにおける位相変調量が最大となる位置及び最小となる位置に対応する前記輪帯電極に、それぞれ、前記位相変調量の最大値及び最小値が発生するように電圧を印加し、他の位置に対応する各輪帯電極の電圧は、前記位相変調量が最大となる輪帯電極に印加される電圧と、前記位相変調量が最小となる輪帯電極に印加される電圧との差が各輪帯電極間に接続された前記抵抗子が持つ抵抗値によって分割されることにより決定される請求項 8 に記載の位相変調デバイス。 30

【請求項 10】

前記位相変調量が最大となる位置及び最小となる位置に対応する前記輪帯電極とともに、前記制御回路は、最外周の輪帯電極にも電圧を印加する請求項 9 に記載の位相変調デバイス。 40

【請求項 11】

コヒーレント光を照射するコヒーレント光源と、
前記コヒーレント光の光束の光路中に配置され、前記光束を試料に集光する対物レンズを含む第 1 の光学系と、

前記試料から発生した前記試料の情報を含んだ光束を検出器に伝送する第 2 の光学系と、
を有し、

請求項 1 ~ 10 の何れか一項に記載の位相変調デバイスとを有し、

前記コヒーレント光源と前記対物レンズの間に、前記位相変調デバイスの位相変調素子が配置されることを特徴とするレーザー顕微鏡。 50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、対物レンズを備えコヒーレント光源を用いた装置において、試料を照射する光束を位相変調し、試料または種々の条件に応じて発生する収差を補償し、より高分解能な情報を取得する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

共焦点レーザー顕微鏡は、レーザー光を対物レンズにより試料上に集光し、試料より発生する反射光、散乱光または蛍光を光学系で伝送し、試料上の集光点と光学的に共役な位置に配置したピンホールを透過した光束を検出器で受光している。ピンホールを配置することにより、試料上の集光点以外から発生する光をフィルタリングできるので、共焦点レーザー顕微鏡は、SN比の良好な画像を取得することができる。

10

【0003】

また、共焦点レーザー顕微鏡は、レーザー光を光軸と垂直な面に沿った、互いに直交する二方向(X方向、Y方向)に沿って試料をスキャンすることにより、試料の平面画像を取得する。一方、共焦点レーザー顕微鏡は、対物レンズと試料の光軸方向(Z方向)の間隔を変えることで、Z方向の複数の断層像が得られ(Zスタック)、これにより試料の3D画像を構築している。

【0004】

20

生体試料を観察する場合、培養液に浸した状態でカバーガラス越しに観察することが多い。また一般に、対物レンズは、カバーガラス直下で結像性能が最も良くなるように設計されている。生体試料内部を観察する場合、培養液または生体組織を透過した奥行きを持つ観察位置の画像を取得する必要があるため、カバーガラス直下から観察位置までの距離に比例して収差が発生し、その結果として解像度が低下する。

【0005】

さらに、カバーガラスの厚さも設計値(例えば0.17mm)から公差の範囲でばらつきを持っており、カバーガラス屈折率1.525と生体試料屈折率1.38~1.39の差により、設計厚さからのカバーガラスの実際の厚さの差に比例して収差が発生する。また、対物レンズが水浸レンズの場合、同様に生体試料屈折率と水の屈折率(1.333)の違いにより、観察位置までの生体深さに比例して収差が発生する。そのため、生体深部を観察するときに解像度が低下する。

30

【0006】

この欠点を解決する手段の一つに補正環がある。補正環は、対物レンズに設けられたリング状の回転部材で、補正環を回すことにより、対物レンズを構成するレンズ群の間隔が変更される。これにより、カバーガラスの厚さの誤差または生体深部を観察する場合に発生する収差がキャンセルされる。補正環には、目盛りが振ってあり、例えば、カバーガラス厚さについて、0, 0.17, 0.23の様に大まかに数値が示されている。そして、実際に使用するカバーガラスの厚さに合わせて補正環の目盛りを合わせることで、その厚さにおいて最適化されるようにレンズ群の間隔が調整される(例えば、特許文献1を参照)。

40

【0007】

また、波面変換素子により、発生する収差を補償することも知られている。この技術は、顕微鏡の光路中にマトリクス駆動可能な形状可変ミラー素子を配置し、その形状可変ミラー素子により、事前に測定した波面変換データに基づいて波面形状を変調し、変調した光波を試料に入射することで、収差の補正された結像性能の高い画像を取得する(例えば、特許文献2を参照)。

【0008】

波面変換素子としては、電氣的に反射面形状が制御可能な形状可変ミラー素子が用いられ、平面波が形状可変ミラー素子に入射した場合、形状可変ミラー素子が凹形状であれば

50

、入射した平面波も凹形状の波面（凹形状の振幅は2倍）に変換される。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献1】特許第3299808号（第4 - 6頁、図1）

【特許文献2】特許第4149309号（第3 - 5頁、図1）

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

しかし、補正環の操作は、対物レンズについているリング状の調整機構を手で回転することで行われる。そのため、その調整機構を調整することによるフォーカスのズレまたは視野のズレが生じる。また、対物レンズの最適位置を決定するためには、補正環の調整とフォーカシングを繰り返す必要があり、最適化のためのプロセスが煩雑であるという問題がある。プロセスが煩雑であるため、最適位置への調整に手間取り、蛍光色素が褪色してしまうという問題もある。蛍光色素の褪色は、励起光を当て続けることにより、発生する蛍光強度が弱くなってしまいう問題である。

10

【0011】

また、補正環の調整はデリケートであり、その調整結果の判断は画像を目視した人が判断しているのが現状で、最適位置かどうかの判断が非常に難しい。特に、Zスタックの撮影においては、この作業を奥行き方向の取得画像数分繰り返す必要があり、非常に煩雑である。そのため、補正環を十分に生かしているユーザーは少ないという現状がある。さらに、試料によっては、手を触れることによる振動が観察位置に影響を与えてしまうため、手を触れずに自動で補正環を調整することが望まれている。

20

【0012】

また、波面変換素子による収差の補償技術においては、波面変換素子が反射型であることから、顕微鏡光学系が複雑化、及び大型化する。さらに、最適な補償波面を得るために、事前に収差を測定することが必要であり、最適な波面を形成するように補正量を収束させるプロセスが必須なため、この技術は、なかなか実用に到っていない。

【0013】

そこで、本発明は上記課題を解決し、既存の光学系に大掛かりな変更を加えずに、対物レンズに手を触れることなく、試料または観察条件により発生する収差を補正する位相変調デバイスを提供することを目的とする。また本発明の他の目的として、結像性能の高い画像を取得できる、位相変調デバイスを用いたレーザ顕微鏡を提供する。

30

【課題を解決するための手段】

【0014】

上述した課題を解決し、目的を達成するため、コヒーレント光源から出射されるコヒーレント光の光束の光路中に配置された対物レンズを含む光学系により生じる波面収差を補正する位相変調デバイスは下記記載の構成を採用するものである。

【0015】

位相変調デバイスは、複数の電極が形成され、それら電極に印加される電圧に応じて対物レンズを透過する光束の位相を変調する位相変調素子と、複数の電極に印加する電圧を制御する制御回路とを有する。そして制御回路は、光学系により生じた波面収差の位相分布をZernike多項式で分解したときの、3次球面収差と5次球面収差との比と対物レンズの開口数の関係式に従って定められる、波面収差の位相分布の逆極性を有する位相変調プロファイルに従った位相変調量を光束に与えるように、複数の電極に印加する電圧を制御する。

40

【0016】

この位相変調デバイスにおいて、3次球面収差と5次球面収差との比と対物レンズの開口数の関係式は次式で表されることが好ましい。

【数 1】

$$1.91NA - 1.87 - \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \leq \frac{B}{A} \leq 1.91NA - 1.87 + \sqrt{\frac{1.4}{A^2}}$$

【0017】

あるいは、この位相変調デバイスにおいて、3次球面収差と5次球面収差との比と対物レンズの開口数の関係式は次式で表されることが好ましい。

【数 2】

10

$$1.37NA - 1.21 - \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \leq \frac{B}{A} \leq 1.37NA - 1.21 + \sqrt{\frac{1.4}{A^2}}$$

【0018】

あるいはまた、この位相変調デバイスにおいて、3次球面収差と5次球面収差との比と対物レンズの開口数の関係式は次式で表されることが好ましい。

【数 3】

20

$$1.06NA - 0.64 - \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \leq \frac{B}{A} \leq 1.06NA - 0.64 + \sqrt{\frac{1.4}{A^2}}$$

なお、上記の関係式において、Aは3次球面収差成分を表し、Bは5次球面収差成分を表す。そしてNAは、対物レンズの開口数を表す。

【0019】

また、この位相変調デバイスにおいて、光軸上の位相変調量と、位相変調素子の光束を位相変調できる領域であるアクティブ領域の端部の位相変調量が等しくなるように、位相変調プロファイルが決定されることが好ましい。

30

【0020】

あるいは、この位相変調デバイスにおいて、位相変調プロファイルの2乗平均平方根値が最小となるように、位相変調プロファイルが決定されることが好ましい。

【0021】

また、この位相変調デバイスにおいて、位相変調素子は、液晶素子であることが好ましい。

【0022】

さらに、この位相変調デバイスにおいて、制御回路は、コヒーレント光の波長に応じて位相変調プロファイルを調節することが好ましい。

40

【0023】

さらに、この位相変調デバイスにおいて、複数の電極は、光軸を中心とする同心円状の複数の輪帯電極を持つことが好ましい。

【0024】

さらに、この位相変調デバイスにおいて、複数の輪帯電極は、それぞれ抵抗子によって接続され、制御回路は、位相変調プロファイルにおける位相変調量が最大となる位置及び最小となる位置に対応する輪帯電極に、それぞれ、位相変調量の最大値及び最小値が発生するように電圧を印加し、他の位置に対応する各輪帯電極の電圧は、位相変調量が最大となる輪帯電極に印加される電圧と、位相変調量が最小となる輪帯電極に印加される電圧との差が各輪帯電極間に接続された抵抗子が持つ抵抗値によって分割されることにより決定

50

されることが好ましい。

【0025】

さらに、この位相変調デバイスにおいて、位相変調量が最大となる位置及び最小となる位置に対応する輪帯電極とともに、制御回路は、最外周の輪帯電極にも電圧を印加することが好ましい。

【0026】

また、本発明の他の側面によれば、レーザ顕微鏡が提供される。このレーザ顕微鏡は、コヒーレント光を照射するコヒーレント光源と、コヒーレント光の光束の光路中に配置され、光束を試料に集光する対物レンズを含む第1の光学系と、試料から発生したその試料の情報を含んだ光束を検出器に伝送する第2の光学系と、上記の何れかの位相変調デバイスとを有し、コヒーレント光源と対物レンズの間に、その位相変調デバイスの位相変調素子が配置される。

10

【発明の効果】

【0027】

本発明によれば、位相変調デバイス及びその位相変調デバイスを用いたレーザ顕微鏡は、生体試料の深部を観察するとき、またはカバーガラス越しに試料を観察するときカバーガラス厚さの設計値からのずれにより発生する収差を補償し、試料をより高分解能で観察できるようにする。特に、位相変調デバイスは、対物レンズに手を触れることなく、電気的に収差を補償できるため、補正環の調整のような煩わしさが無くて済む。そのため、この位相変調デバイス及びレーザ顕微鏡は、対物レンズの位置の最適化を自動で行う、Zスタック時の観察深さに同期した調整ができる等のメリットがある。また、この位相変調デバイス及びレーザ顕微鏡は、調整に必要な位相補正量を最小にすることができる。さらに、NAの異なる対物レンズを1つの位相変調デバイスで収差補正することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0028】

【図1】図1は、本発明の一つの実施形態に係るレーザ顕微鏡の概略構成図である。

【図2A】図2Aは、試料表面を観察する場合と深さDの試料内部を観察する場合に発生する収差を説明するための図である。

【図2B】図2Bは、試料表面を観察する場合と深さDの試料内部を観察する場合に発生する収差を説明するための図である。

30

【図3A】図3Aは、3次球面収差の位相分布を示す図である。

【図3B】図3Bは、5次球面収差の位相分布を示す図である。

【図4】図4は、RMS値が最小となる複合収差の位相分布断面プロファイルを示す図である。

【図5】図5は、位相変調量PV値が最小となる複合収差の位相分布断面プロファイルを示す図である。

【図6】図6は、本発明の一つの実施形態に係るレーザ顕微鏡で用いられる位相変調デバイスを説明する概略図である。

【図7】図7は、位相変調デバイスとして機能する、ホモジニアス配向の液晶デバイスの断面模式図である。

40

【図8】図8は、本発明の一つの実施形態に係る位相変調デバイスの輪帯電極構造を決定する方法を説明する図である。

【図9A】図9Aは、本発明の一つの実施形態に係る位相変調デバイスにおいて、輪帯電極間の接続方法と輪帯電極への電圧印加方法について説明する概略図である。

【図9B】図9Bは、本発明の一つの実施形態に係る位相変調デバイスにおいて、輪帯電極間の接続方法と輪帯電極への電圧印加方法について説明する概略図である。

【図10A】図10Aは、対物レンズの開口数NAが1.15～1.27の範囲に含まれ、かつ、対物レンズが水浸用である場合における、開口数NAと比(Z25/Z13)の関係を表す図である。

【図10B】図10Bは、対物レンズの開口数NAが1.05～1.27の範囲に含まれ

50

、かつ、対物レンズが水浸用である場合における、開口数 NA と比 ($Z25/Z13$) の関係を表す図である。

【図 10C】図 10C は、対物レンズの開口数 NA が $0.75 \sim 0.95$ の範囲に含まれ、かつ、対物レンズがドライ用である場合における、開口数 NA と比 ($Z25/Z13$) の関係を表す図である。

【図 11A】図 11A は、開口数 NA が 1.0 の対物レンズにより発生する球面収差の位相分布断面プロファイルを示す図である。

【図 11B】図 11B は、開口数 NA が 1.2 の対物レンズにより発生する球面収差の位相分布断面プロファイルを示す図である。

【図 11C】図 11C は、開口数 NA が 0.8 の対物レンズにより発生する球面収差の位相分布断面プロファイルを示す図である。

10

【図 12】図 12 は、液晶デバイスのレーザー光の波長による波長分散について示した図である。

【発明を実施するための形態】

【0029】

以下に添付図面を参照して、この発明にかかる位相変調デバイス、また、位相変調デバイスを用いたレーザー顕微鏡の好適な実施の形態を詳細に説明する。

【0030】

図 1 は、本発明の一つの実施形態に係るレーザー顕微鏡の概略構成図を示している。コヒーレント光源であるレーザー光源 1 から出射した光束は、コリメート光学系 2 により平行光に調整され、その平行光は位相変調デバイス 3 を透過した後、対物レンズ 4 によって試料 5 上に集光される。試料 5 により反射または散乱した光束もしくは試料により発生した蛍光等、試料の情報を含んだ光束は、光路を逆にたどり、ビームスプリッター 6 で反射され、第 2 の光学系であるコンフォーカル光学系 7 で再び共焦点ピンホール 8 上に集光される。そして、共焦点ピンホール 8 が、試料の焦点位置以外からの光束をカットするので、検出器 9 で SN 比の良好な信号が得られる。

20

【0031】

ここで、対物レンズ 4 は、レンズ系内部だけでなく、レンズ先端から観察面までの光路の屈折率と間隔、例えばカバーガラスの厚さまたはカバーガラスの有無を想定し、それらの想定値で結像性能が最適化されるように、対物レンズは設計されている。そのため、観察対象となる生体試料の深さ、またはカバーガラスの製造誤差による厚さのずれ等により収差が発生し、その収差が結像性能の低下をもたらしている。そこで、光路長の設計値からのずれに応じて、対物レンズ 4 を含む、レーザー光源 1 から光束の集光位置までの光学系により発生する波面収差を見積もり、その波面収差をキャンセルするような位相分布を位相変調プロファイルとして位相変調デバイス 3 に表示することで、このレーザー顕微鏡は、結像性能を向上させる。

30

【0032】

一般的に、スペースの関係から位相変調デバイスを対物レンズの入射瞳位置に配置することができないため、リレーレンズを用いて入射瞳と共役な位置に位相変調デバイス 3 は配置される。また、レーザー光源 1 から出射した光束は、位相変調デバイス 3 を往路と復路との 2 回通過するので、位相変調デバイス 3 は、往路、復路ともに光束の位相を補正する。一方で、顕微鏡の対物レンズは、一般的に、無限系で設計されており、対物レンズに入射する光束は平行光となっている。したがって、位相変調デバイス 3 は、対物レンズ 4 の光源側、なるべく対物レンズ 4 の近傍に配置されることが好ましく、このように位相変調デバイス 3 を配置することで、レーザー顕微鏡は補正の効果をより効果的に得ることができる。

40

【0033】

発生する収差について、より詳細に説明する。図 2 A 及び図 2 B は、観察する試料の深さにより発生する収差を模式的に示した図である。説明を簡略化するため、対物レンズは、一様な屈折率の媒質を観察する場合に最適になるように設計されるとしている。図 2 A

50

は、設計で用いた一様な屈折率の媒質を観察する場合の光束200を示している。光束200が収差無く1点に集光していることが示されている。これに対し図2Bは、試料深さDの面を観察している場合の光束210を示している。対物レンズに接している媒質と試料との境界面211において、光束210は屈折し、発生する収差により光束210は1点に集光していない。

【0034】

このように試料表面でなく試料内部を観察するときに収差が発生する。レーザ顕微鏡は、発生する収差を対物レンズ4の入射瞳位置における波面収差として表し、その波面収差をキャンセルするような位相分布を、対物レンズ入射瞳位置に配置した位相変調デバイス3の電極に電圧を印加することで発生させる。これにより、レーザ顕微鏡は、レーザ光源1からの光束を試料表面または試料内部に設定される観察位置において1点に集光させることができる。同様に、試料より発生した光束も光路を逆にたどるので、レーザ顕微鏡は、その光束を平面波に変換することができる。

10

【0035】

波面収差は、収差を各成分に分解し、各成分の和として表現できる。このとき、波面収差をZernike多項式のような直交関数に分解し、各関数の和として波面収差を表現することが一般的に行われている。したがって、波面収差の補正量も、Zernike多項式の各関数の位相分布として表現し、各関数の相対的な位相変調量を変化させることで求める方法が考えられる。例えば、収差を標準Zernike多項式で分解したとき、13番目の係数(Z_{13})は、3次球面収差を表し、25番目の係数(Z_{25})は、5次球面収差を表しておりそれぞれの係数に対応する補正量の位相分布を適切に調節することにより、位相変調デバイス3は、3次と5次の球面収差を補正することができる。

20

【0036】

試料深部を見る場合などに発生する収差は、デフォーカスまたは低次、高次の球面収差が複合的に発生した収差であり、位相変調デバイス3が、例えば、 Z_{13} のみを補正しても、結像性能の向上は十分でない。また、Zernike多項式には、多数の項があり、緻密な補正を行うためには、それぞれの項に対応した位相変調プロファイルを作成し、位相変調デバイス3にその位相変調プロファイルを表示させる必要が生じる。その場合には、複数の位相変調プロファイルの表示を実施できるように、複数の収差補正素子が重ねられた素子を光束内に配置して、その収差補正素子の少なくとも何れかを用いることが好ましい。

30

【0037】

しかし、実際のところは、デフォーカスは、試料深さZにより非常に敏感に変わるため、試料の観察位置で決まり、また、Zernike多項式における Z_{13} 、 Z_{25} 以外の収差は、非常に小さく無視することができる。従って、3次球面収差に対応する Z_{13} と5次球面収差に対応する Z_{25} の項を補正することで、結像性能の向上が図れる。さらに、デフォーカスと3次球面収差、5次球面収差、場合によっては7次球面収差までを考慮すれば、充分満足できる収差補正が可能である。よって、複数の収差補正素子を重ねることで発生するデメリット、例えば各収差補正素子の境界での反射による透過率の低下等を考慮すると、Zernike多項式の全ての項目に対応できるように、収差補正素子を複数重ねて行う補正は必ずしも必要ではない。

40

【0038】

3次球面収差と5次球面収差を補正するには、それぞれに対応する2パターンの位相分布より位相変調プロファイルを作成する必要がある。図3Aは、3次球面収差の位相分布を表した曲線300を表し、図3Bは、5次球面収差の位相分布を表した曲線301を表す。ここで考えている収差は、点対称性の位相分布を持っており、それぞれの曲線は、位相分布の断面図を示している。また、縦軸は位相差の正の最大値を「1」として位相差を正規化した値を表し、横軸は有効径の最大値を「1」として有効径を正規化した値を表す。すなわち、横軸における「0」の位置は、光軸上であることを表す。

【0039】

実際に発生する収差位相分布は、これらの線形和と考えられる。そこで、球面収差成分

50

を3次球面収差の成分と5次球面収差の成分の和とし、この位相分布に適当なデフォーカスによる位相分布成分を足した位相分布を求める。そして、その位相分布をキャンセルするように、得られた位相分布を逆極性化したプロファイル有位相変調プロファイルとする。例えば、開口数NAが1.0の対物レンズの場合、発生する3次球面収差と5次球面収差の比は、おおよそ4対1になり、これら球面収差の線形和にデフォーカスによる位相成分を加えた位相分布の逆極性となるプロファイル有位相変調プロファイルとすることができる。

【0040】

前述したように、補正環により収差を補正する場合は、補正環の調整とフォーカシングを繰り返す必要があり、最適化のプロセスが長く複雑になっていた。しかし、フォーカシングにより残留する位相分布(デフォーカス成分)有位相変調プロファイルとして位相変調デバイス3で補正することを考えれば、最適化のための繰り返しプロセスを無くすことができ、効率良く収差補正を行うことができる。

10

【0041】

また、位相変調デバイス3による補正対象となる収差成分は、デフォーカスと球面収差に限定されない。発生した様々な、例えば、さらに高次の収差、またはコマ収差等の球面対称ではない収差等も、補正対象とすることが可能である。その際、各収差は、それぞれ打ち消しあう量もあるので、n種の収差の和からなる複合収差におけるトータルの位相変調量は、各収差補正量のn倍にはならず、その複合収差を補正対象とすることには、光束にその複合収差のトータルの位相変調量よりも十分に小さい変調量を位相変調デバイス3が与えれば済むという利点もある。

20

【0042】

次に、位相変調デバイス3が実際に収差補正を行うために用いる位相変調プロファイルについて、例を挙げてより詳細に説明する。フォーカシングにより残留する位相分布は、その波面の2乗平均平方根(RMS)値が最小になる形状と一致すると考えることができる。よって、例えば、RMS収差が最小となるように、デフォーカス項を加えた複合収差の位相分布を求め、その位相分布から位相変調プロファイルを設定する方法がある。

図4に示される曲線400は、開口数NAが1.0の対物レンズで発生する球面収差と、そのRMS収差が最小となるようにデフォーカス成分を加えた場合における複合収差の位相分布を表す。

30

【0043】

また、デフォーカス成分の加え方として、位相分布の位相変調量(以下、PV値とする)が最小となるようにし、最小となる位相変調量に対応する位相分布有位相変調プロファイルとすることもできる。図5に示される曲線500は、PV値が最小となるようにデフォーカス成分を加えた複合収差の位相分布を表す。PV値が最小となるようにした場合は、位相変調レンジ(位相変調量の幅)が小さくてすむ。そのため、位相変調デバイスが有する位相変調素子として液晶素子が用いられる場合には、液晶素子の液晶層が薄くてすむ。また、一般的に、液晶素子の応答時間は、液晶層の厚さの2乗に比例するので、位相変調レンジが小さければ応答速度が向上するというメリットがある。また、液晶層の厚さが薄いほど、面精度が向上するというメリットもある。

40

【0044】

さらに、フォーカシングにより残留する位相分布は、用いる顕微鏡または画像処理ソフトの仕様により異なることが考えられ、それぞれの固有の残収差パターン有位相変調デバイスの位相変調プロファイルを合わせ込んで行くことで最適な収差補正が可能となる。

【0045】

次に位相変調素子として、液晶素子を採用し、波面収差をキャンセルするような位相分布有位相変調プロファイルとして液晶素子の電極に電圧を印加する位相変調デバイス3について、図6~図9A、及び図9Bを用いてより詳細に説明する。

【0046】

図6は、位相変調デバイス3が有する位相変調素子11の平面図である。位相変調素子

50

11の液晶層は、透明基板21、22で挟まれており、シール部材23で、液晶が漏れないように周辺部が封止されている。透明基板21、22の互いに対向する側の面における、液晶を駆動するアクティブ領域24、すなわち、透過する光束の位相を変調できる領域には、光軸を中心とする同心円状の透明な輪帯電極が複数形成されている。なお、透明基板21、22の一方については、アクティブ領域24全体を覆うように透明電極が形成されていてもよい。アクティブ領域24は、対物レンズ瞳径に合わせて決定されたサイズを有する。そして位相変調デバイス3が有する制御回路12が、透明な輪帯状の輪帯電極に印加する電圧を制御することで、位相変調素子11を透過する光束に所望の位相分布を与えることができる。なお、制御回路12は、例えば、プロセッサと、プロセッサからの駆動信号に応じて出力する電圧を変更可能な駆動回路とを有する。

10

【0047】

図7は、図6の位相変調素子11のアクティブ領域24の一部における断面模式図を示している。位相変調素子11では、透明基板21、22間に液晶分子34が挟まれている。透明基板21、22の互いに対向する側の表面には透明電極33、33a、33bが形成されている。図7では、右側半分の電極33aと電極33の間に電圧が印加され、一方、左側半分の電極33bと電極33の間には電圧が印加されていない状態が示されている。液晶分子34は、細長い分子構造を持ち、ホモジニアス配向されている。すなわち、2枚の基板21、22に挟まれた液晶分子34は、その長軸方向がお互いに平行となり、かつ、基板21、22と液晶層の界面と平行に並んでいる。液晶分子34は、その長軸方向における屈折率と長軸方向に直交する方向における屈折率とが異なり、一般に、液晶分子34の長軸方向に平行な偏光成分（異常光線）に対する屈折率 n_e は、液晶分子の短軸方向に平行な偏光成分（常光線）に対する屈折率 n_o よりも高い。そのため、液晶分子34をホモジニアス配向させた位相変調素子11は、1軸性の複屈折素子として振舞う。

20

【0048】

液晶分子は、誘電率異方性を持ち、一般に液晶分子長軸が電界方向に倣う方向に力が働く。つまり、図7で示したように、液晶分子を挟む2枚の基板に設けられた電極間に電圧が印加されると、液晶分子の長軸方向は、基板に平行な状態から、電圧に応じて基板の表面に直交する方向に傾いてくる。このとき、液晶分子長軸に平行な偏光成分の光束を考えると、液晶分子の屈折率 n は、 $n = n_o \cos^2 \theta + n_e \sin^2 \theta$ （ n_o は常光の屈折率、 n_e は異常光の屈折率）となる。そのため、液晶層の厚さが d であると、液晶層のうち、電圧が印加された領域と印加されていない領域を通る光束の間に、光路長差 $\Delta n d (= n d - n_o d)$ が生じる。位相差は、 $2\pi \Delta n d / \lambda$ となる。なお、 λ は、液晶層に入射する光束の波長である。

30

【0049】

次に、液晶素子として構成された位相変調素子11を透過する光束に所望の位相分布を与える方法について詳細に述べる。まずは、表示したい位相変調プロファイルを決めて、それを等位相間隔で分割し、各輪帯電極に印加する電圧を決定する。

図8は、位相変調プロファイルに合わせた電圧印加状態を決める様子を示した図である。上側が示された曲線800は、光軸を通る面に対応する位相変調プロファイルの断面図を表し、下側には、位相変調プロファイルに合わせて印加電圧値を決定した輪帯電極810を示す。図中の太線が輪帯電極間のスペースを示しており、引き出し電極等は、簡略化して図示していない。位相変調素子11が透過する光束に与える位相変調量と印加電圧の特性がほぼ二乗な電圧範囲内で、隣接する輪帯電極間の電圧差が同一ステップとなるように、制御回路12が各輪帯電極に電圧を印加することで、位相変調デバイス3は、所望の位相分布の量子化したプロファイルを表示することができる。

40

【0050】

隣接する輪帯電極間の電圧の差が同一ステップとなるように、各輪帯電極に電圧を印加するために、位相変調プロファイルから、位相変調量が最大となる位置及び最小となる位置に対応する輪帯電極が決定される。そして制御回路12が、最大位相変調量となる印加電圧と最低相変調量となる印加電圧を、それぞれに対応する輪帯電極に加える。また、複

50

数の輪帯電極は、それぞれ隣接する輪帯電極間を同一の電気抵抗を持つ電極（抵抗子）によって接続されているため、抵抗分割により隣接する輪帯電極間の電圧差は同一ステップとなる。また、このように印加電圧を制御することで、各輪帯電極に印加する電圧を独立に制御する際の回路よりも、制御回路 1 2 を単純な構成とすることができるというメリットがある。

【 0 0 5 1 】

図 9 A と図 9 B は、位相変調デバイス 3 が n 個の輪帯電極を有する場合の、各輪帯電極と印加される電圧との関係を示す図である。中心電極を輪帯電極 1、最外周の輪帯電極を輪帯電極 n 、最大電圧を印加する輪帯電極を輪帯電極 m とする。

【 0 0 5 2 】

図 9 A は、2 レベル駆動の場合に制御回路 1 2 が電圧を印加する輪帯電極を示す。中心の輪帯電極 1 番目と最外周の輪帯電極 n 番目に同一の電圧 V_1 が、輪帯電極 m 番目に電圧 V_2 が印加される。発生した波面収差の位相分布における中心及び端部の位相変調量が等しくなるように、デフォーカス値を選ぶことで、中心電極での位相変調量と最外周電極での位相変調量が一致する。その結果として、中心電極に印加される電圧が最外周の輪帯電極 n に印加される電圧値と同一となる。また、このように電圧を印加すれば、 PV 値を最小にすることができる。このように、2 レベル駆動の例では、印加される電圧 V_1 と V_2 の差で、位相変調プロファイルの相対比を変えずに位相変調量の振幅が可変される。また、この駆動方法では、制御回路 1 2 が輪帯電極に直接印加する電圧値のレベルが 2 種類と少なくともすむが、位相変調プロファイルが単一の形状に固定されてしまうという特徴がある。

【 0 0 5 3 】

これに対して、図 9 B は、3 レベル駆動の場合に制御回路が電圧を印加する輪帯電極を示す。各輪帯電極の電圧が抵抗分割で決定される点は、2 レベル駆動の場合における各輪帯電極の電圧の決定方法と同じである。ただし、この構成では、最外周の輪帯電極 n 番目に制御回路 1 2 から与えられる電圧 V_3 は、輪帯電極 1 番目に与えられる電圧 V_1 とは異なってもよい。このように、最外周の輪帯電極 n 番目にも任意の位相変調量が発生するように、中心電極と最外周の電極に独立に電圧を印加することで、開口数 NA の異なる対物レンズが用いられた場合でも、位相変調デバイス 3 は、開口数 NA に応じた位相変調プロファイルを表示し、収差を高精度に補償することができる。このように、3 レベル駆動を用いることで、位相変調素子 1 1 に表される位相変調プロファイルの自由度が広がり、上述のように、位相変調デバイス 3 は、同一瞳径の開口数 NA の異なる対物レンズに対応することができる。また、3 レベル駆動を用いることで、同一開口数 NA で、異なる瞳径への位相変調プロファイルの近似等、位相変調プロファイルの形状を柔軟に変えることができ、位相変調デバイス 3 は、より残留収差の少なくなるような収差補償をすることが可能となる。

【 0 0 5 4 】

次に、開口数 NA が異なる複数の対物レンズに対応して、位相変調デバイス 3 が表示する位相変調プロファイルを可変する方法について詳細に説明する。

最初に開口数 NA によって発生する球面収差の定量的な検討を行い、開口数 NA ごとのそれぞれの最適な位相変調プロファイルを求める。開口数 NA が 1 . 2 の場合の、3 次の球面収差係数 Z_{13} と 5 次の球面収差係数 Z_{25} には、概ね 2 . 4 対 1 の関係がある。

【 0 0 5 5 】

図 10 A は、レーザ顕微鏡の対物レンズの開口数 NA が 1 . 15 ~ 1 . 27 の範囲に含まれ、かつ、対物レンズが水浸用である場合、開口数 NA と Z_{13} と Z_{25} の比 (Z_{25}/Z_{13}) の関係を表す図である。直線 1000 は、開口数 NA と比 (Z_{25}/Z_{13}) の関係の近似直線である。また図 10 B は、水浸用の対物レンズについて、レーザ顕微鏡の対物レンズの開口数 NA の範囲を 1 . 05 ~ 1 . 27 にまで広げた場合における、開口数 NA と Z_{13} と Z_{25} の比 (Z_{25}/Z_{13}) の関係を表す図である。直線 1001 は、開口数 NA と比 (Z_{25}/Z_{13}) の関係の近似直線である。さらに、図 10 C は、レーザ顕微鏡の対物レンズの開口数 NA が 0 . 75 ~

10

20

30

40

50

0.95の範囲に含まれ、かつ、対物レンズがドライ用である場合、開口数NAと Z_{13} と Z_{25} の比(Z_{25}/Z_{13})の関係を表す図である。直線1002は、開口数NAと比(Z_{25}/Z_{13})の関係の近似直線である。なお、図10A～図10Cにおいて、横軸は開口数NAを表し、縦軸は、比(Z_{25}/Z_{13})を表す。

【0056】

曲線1000～1002は、それぞれ、下記の数式(1)～(3)で表される。

【数4】

$$\frac{Z_{25}}{Z_{13}} = 1.91 \times NA - 1.87 \quad (1) \quad 10$$

$$\frac{Z_{25}}{Z_{13}} = 1.37 \times NA - 1.21 \quad (2)$$

$$\frac{Z_{25}}{Z_{13}} = 1.06 \times NA - 0.64 \quad (3)$$

発生する球面収差を補償する位相分布は、上述した比でのそれぞれの収差の線形和とすることが好ましい。 20

【0057】

光学撮像系の性能を表す指数の一つに、ストレールレシオ (Strehl ratio)がある。ストレールレシオは、ある光学系における点光源からの光の撮像面におけるピーク輝度と、回折限界光学系におけるピーク輝度の比であり、1に近いほど結像性能の高い光学系といわれる。一般に、ストレールレシオが0.8以上であれば、残収差による結像性能への影響を無視することができる(例えば、岸川利郎著、「ユーザエンジニアのための光学入門」、オプトロニクス社、P.198を参照)。ストレールレシオと波面収差(、RMS値)には、下記の数式(4)に示される関係がある。また、波面収差(RMS値)とそれぞれの波面収差係数の関係は、数式(5)で表される。ここで、波面収差係数は、rad単位で表した値としている。 30

【0058】

【数5】

$$\text{Strehl} = \frac{1}{\exp(\sigma^2)} \cong 1 - \sigma^2 \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{Z_{13}}{\sqrt{5}} \quad \sigma = \frac{Z_{25}}{\sqrt{7}} \quad (5)$$

$$\left(\frac{x A_{13}}{\sqrt{7}} \right)^2 = 0.2 \quad x = \sqrt{\frac{1.4}{A_{13}^2}} \quad (6)$$

10

20

【0059】

したがって、例えば開口数NAが、1.2の水浸用対物レンズにおいて、 A_{13} の3次球面収差が発生したとすると、5次球面収差は、 $0.45 A_{13}$ だけ発生すると考えられる。このとき、5次球面収差の値をxだけずれた状態で収差補正を行ったとすると、5次の収差として、数式(5)より、 $(x \cdot A_{13}) / (7^{1/2})$ (RMS値)が残存する。

上記のように、ストレーンレシオが0.8以上であれば、残収差の結像性能への影響を無視できるので、ストレーンレシオの許容値を0.8とすると、ずれ量xの最大値は、数式(6)で表される。よって、開口数NAの違いを考慮すると、比(A_{25}/A_{13})は、以下の数式で表される関係を満たすことが好ましい。

【数6】

$$1.91NA - 1.87 - \sqrt{\frac{1.4}{A_{13}^2}} \leq \frac{A_{25}}{A_{13}} \leq 1.91NA - 1.87 + \sqrt{\frac{1.4}{A_{13}^2}} \quad (\text{水浸用対物レンズ、} 1.15 \leq NA \leq 1.27)$$

$$1.37NA - 1.21 - \sqrt{\frac{1.4}{A_{13}^2}} \leq \frac{A_{25}}{A_{13}} \leq 1.37NA - 1.21 + \sqrt{\frac{1.4}{A_{13}^2}} \quad (\text{水浸用対物レンズ、} 1.05 \leq NA \leq 1.27)$$

$$1.06NA - 0.64 - \sqrt{\frac{1.4}{A_{13}^2}} \leq \frac{A_{25}}{A_{13}} \leq 1.06NA - 0.64 + \sqrt{\frac{1.4}{A_{13}^2}} \quad (\text{ドライ用対物レンズ、} 0.75 \leq NA \leq 0.95)$$

30

40

【0060】

一例として、カバーガラスの有無にかかわらずに試料を観察できるという条件において、ストレーンレシオ0.8を満たすxの範囲を検討する。

ここでカバーガラスの有無により発生する球面収差は、一般的なカバーガラスの厚さが

50

0.17 mmであることから、3次球面収差係数で5.2程度となる。ニュートラルな位置から、位相変調デバイス3は、上記の収差を補正できることが好ましいので、レンジで10程度の補正量が必要である。上記の数式(6)より、例えば波長488 nmのときに、xの値は、0.23弱となり、3次の球面収差に対する5次の球面収差の比は、 0.42 ± 0.23 程度が好ましい。

【0061】

以上により、対物レンズの開口数NAで発生する位相分布をZernike多項式で分解したとき、3次球面収差と5次球面収差の成分の比をA:Bとすると、開口数NAとB/Aの関係は、以下の数式で表すことができる。

【0062】

【数7】

$$1.91NA - 1.87 - \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \leq \frac{B}{A} \leq 1.91NA - 1.87 + \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \quad (\text{水浸用対物レンズ、} 1.15 \leq NA \leq 1.27)$$

$$1.37NA - 1.21 - \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \leq \frac{B}{A} \leq 1.37NA - 1.21 + \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \quad (\text{水浸用対物レンズ、} 1.05 \leq NA \leq 1.27)$$

$$1.06NA - 0.64 - \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \leq \frac{B}{A} \leq 1.06NA - 0.64 + \sqrt{\frac{1.4}{A^2}} \quad (\text{ドライ用対物レンズ、} 0.75 \leq NA \leq 0.95)$$

【0063】

また、実際の対物レンズは、瞳径、開口数NAともに多種多様である。よって、瞳径及び開口数NAの様々な組み合わせのそれぞれに対応して位相変調プロファイルを作成することが好ましい。この場合には、位相変調素子11の液晶層を駆動するための電極の構成は、瞳径及び開口数NAによらずに共通化されることが好ましい。そして制御回路12が各輪帯電極に任意の電圧を印加できるように、各輪帯電極同士は絶縁されることが好ましい。これにより、制御回路12が、各輪帯電極に印加する電圧を独立に制御することによって位相変調素子11に瞳径及び開口数NAに応じた位相変調プロファイルを表示させることができる。

【0064】

対物レンズの開口数NAの違いによる収差位相分布の違いを図11A、図11B、図11Cに図示する。図11Aに示される曲線1100、図11Bに示される曲線1101、図11Cに示される曲線1102は、それぞれ、開口数NAが1.0、1.2、0.8の場合の複合収差の位相分布を示している。なお、図11A～図11Cにおいて、縦軸は位相差の正の最大値を「1」として位相差を正規化した値を表し、横軸は有効径の最大値を「1」として有効径を正規化した値を表す。

【0065】

ここで、デフォーカス値は、それぞれの開口数NAに対して同一としている。このように、収差の位相分布が対物レンズによって異なる場合には、制御回路12は、様々な位相変調プロファイルを再現できるように、各輪帯電極に印加する電圧を、前述した図9Bに示されるような3レベル駆動によって制御する。対物レンズを交換する度に、収差の位相分布がキャンセルされるよう、輪帯電極1、輪帯電極m、輪帯電極nに印加する電圧V1、V2、V3の比が予め求められる。なお、制御回路12が有する記憶部に、対物レンズ

10

20

30

40

50

の瞳径及び開口数 NA と対応づけて、各電圧間の比が予め記憶されてもよい。そして制御回路 12 は、記憶部から、対物レンズに応じた電圧 V_1 、 V_2 、 V_3 の比を読み込み、その比に応じて各輪帯電極に印加する電圧を決定してもよい。なお、最終的な電圧の調整（電圧 V_1 、 V_2 、 V_3 ）は、例えば、ユーザが像を見ながら、図示しないユーザインターフェースを介して手動で行ってもよく、もしくは、制御回路 12 が、像から得られるコントラスト等の情報をフィードバックしながら、コントラストが最大になるように、自動で設定してもよい。

【0066】

以上、2レベル駆動と3レベル駆動の例を説明したが、本発明は、これに限定されるものではない。例えば、電圧レベル数は多くなるが、個々の輪帯電極にそれぞれ異なる電圧が印加できるように各輪帯電極に配線を施してもよい。その場合には、対物レンズが変更されても、制御回路は、位相変調素子 11 に対物レンズに応じた最適な位相変調プロファイルを表示させることができ、その結果として、レーザ顕微鏡 1 は、良好な画像を得ることができる。

【0067】

また、前述したように、位相差は、液晶層に入射する光の波長に依存する。一般的なレーザ顕微鏡のレーザ光源 1 は、レーザ光の複数の波長のなかから選択された波長のレーザ光を照射することができる。しかしながら、使用するレーザ光の波長によって、必要な位相変調量が異なるため、位相変調デバイス 3 の制御回路 12 は、位相変調素子 11 による位相変調量を補正することが必要となる。制御回路は、波長の違いによる位相変調量のずれを、位相変調デバイス 3 の液晶層に印加する電圧を変化させることで補正することができる。さらに、制御回路 12 は、温度変化等による位相変調量のずれも、位相変調素子 11 の液晶層に印加する電圧を調整することでキャンセルすることができる。

【0068】

ここで、レーザ光の波長の違いによる最適な位相変調量を得る方法について説明する。図 12 に示される曲線 1200 は、上述した実施例における位相変調デバイス 3 の液晶層に封入された液晶の波長分散特性を示している。横軸は波長を表し、縦軸は位相変調デバイス 3 の位相差（ nd ）を、550 nm 時の位相差の値が 1 となるよう正規化した値を示している。曲線 1200 に示されるように、例えば 488 nm のレーザ光では、波長分散の度合いは 1.057 であり、405 nm のレーザ光では、波長分散の度合いは 1.200 となる。これは、液晶層の厚さ d が一定値であるため、 $n (= n_e - n_o)$ が、レーザ光の波長により異なることを示している。したがって、図 1 に図示した同じ試料 5 の同じ位置を観察しても、使用するレーザ光源 1 の波長によって、最適な位相変調プロファイルは異なる。そこで、位相変調素子 11 が、最適な位相変調プロファイルを透過する光束に与えるには、その波長に最適な、波長分散の度合いをパラメータとして、位相変調プロファイルの算出式に加味して、位相変調プロファイルを最適化することが好ましい。

【0069】

具体的には、使用するレーザ光源 1 の波長をパラメータとして位相変調プロファイルの作成に用いることが必要である。つまり、前述のように作成した位相変調プロファイルに、図 12 で図示したように波長分散の度合いを係数として乗じれば、レーザ光源からのレーザ光の波長を考慮した最適化された位相変調プロファイルが得られる。そして、制御回路 12 は、最適化された位相変調プロファイルに基づいて、位相変調素子 11 の各電極に印加する電圧を調整すればよい。

【0070】

また、上記の実施形態では、位相変調デバイスの位相変調素子として液晶素子を用いたが、位相変調素子は、液晶素子に限られない。例えば、ポッケルス効果に代表される電気光学効果を持つ光学結晶素子を、位相変調素子として用いることもできる。この場合にも、液晶素子が利用される場合と同様に、光軸を中心とする複数の輪帯電極が、平板上の光学結晶素子の一方の面に取り付けられ、光学結晶素子の他方の面には、その面全体を覆うように電極が取り付けられる。各電極は、上記の実施形態と同様に、透明電極とすること

10

20

30

40

50

が好ましい。この変形例でも、上記の実施形態と同様に、制御回路は、各輪帯電極に印加する電圧を調節することで、対物レンズを含む光学系の収差を補正する位相変調プロファイルが光学結晶素子に表示させ、光学結晶素子を透過する光束にその位相変調プロファイルに応じた位相分布を与えることができる。

また他の変形例では、反射型になるというデメリットはあるが、デフォーダブルミラーを、位相変調素子として用いてもよい。この場合には、デフォーダブルミラーに、光軸を中心とする複数の輪帯電極が取り付けられる。そして制御回路は、各輪帯電極に印加する電圧を調節することで、対物レンズを含む光学系の収差を補正する位相変調プロファイルをデフォーダブルミラーで表し、デフォーダブルミラーにより反射される光束に、その位相変調プロファイルに応じた位相分布を与えることができる。

10

【0071】

また、以上の実施例では、レーザ顕微鏡を例に説明したが、本発明の位相変調デバイスはこれに限定して用いられるものではない。本発明は対物レンズを備え、コヒーレント光源を採用する光学機器であれば、いずれにも用いることが可能であり、例えば、光干渉断層計（OCT:Optical Coherence Tomography）等にも適用できる。

【0072】

以上のように、当業者は、本発明の範囲内で、実施される形態に合わせて様々な変更を行うことができる。

【符号の説明】

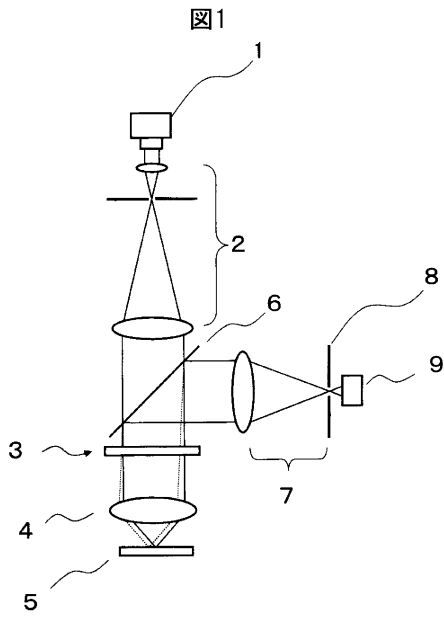
【0073】

- 1 レーザ光源
- 2 コリメート光学系
- 3 位相変調デバイス
- 4 対物レンズ
- 5 試料
- 6 ビームスプリッター
- 7 コンフォーカル光学系
- 8 共焦点ピンホール
- 9 検出器
- 1 1 位相変調素子
- 1 2 制御回路
- 2 1、2 2 透明基板
- 2 3 シール
- 3 3 透明電極
- 3 4 液晶分子

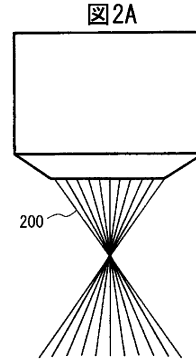
20

30

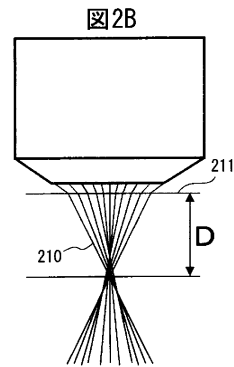
【 図 1 】



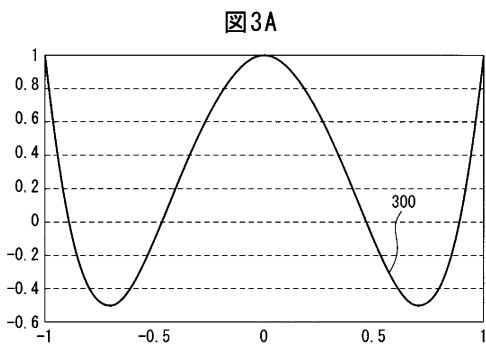
【 図 2 A 】



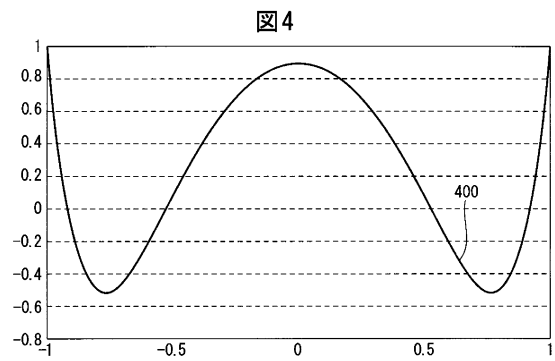
【 図 2 B 】



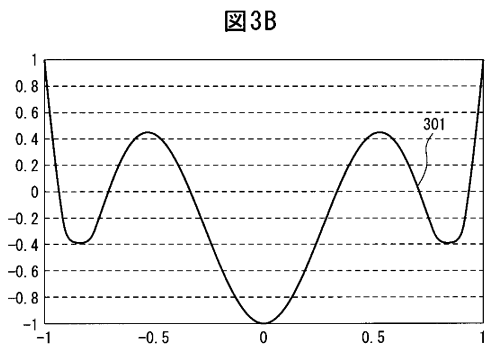
【 図 3 A 】



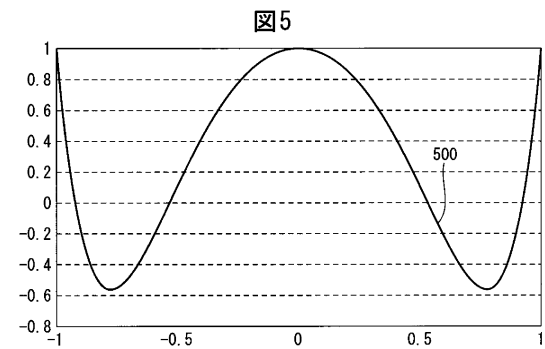
【 図 4 】



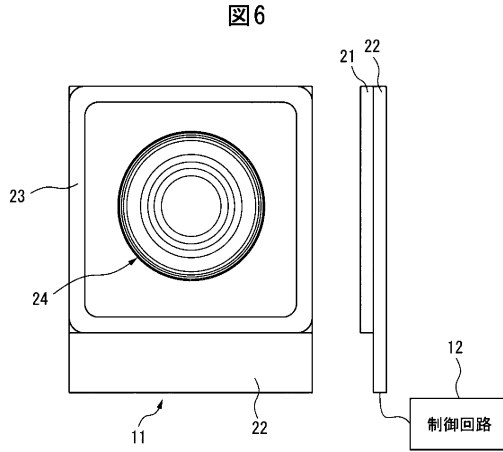
【 図 3 B 】



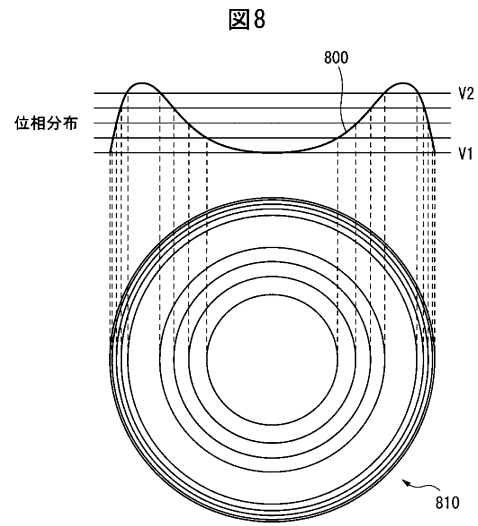
【 図 5 】



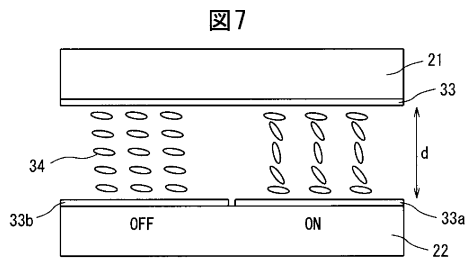
【 図 6 】



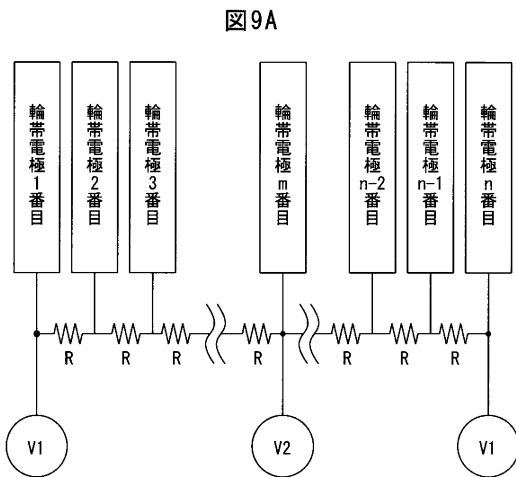
【 図 8 】



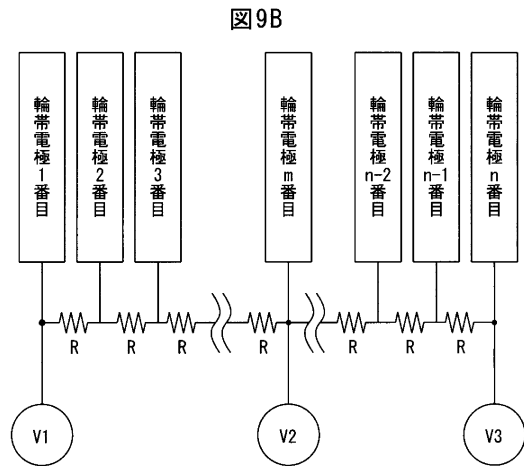
【 図 7 】



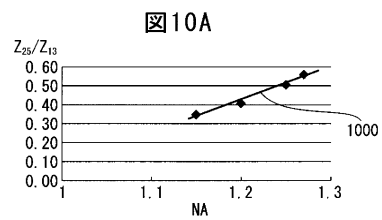
【 図 9 A 】



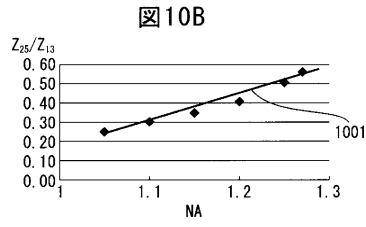
【 図 9 B 】



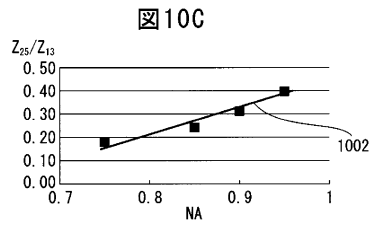
【 図 10 A 】



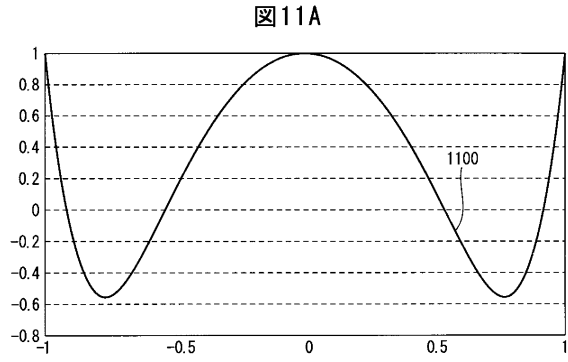
【図10B】



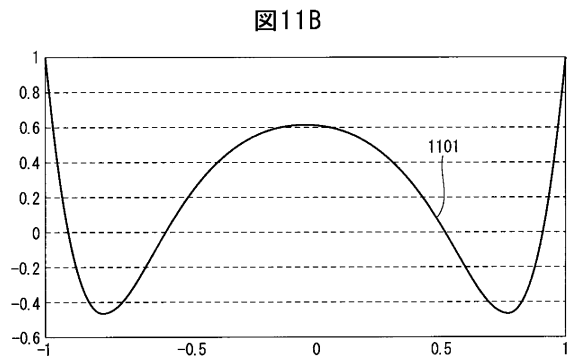
【図10C】



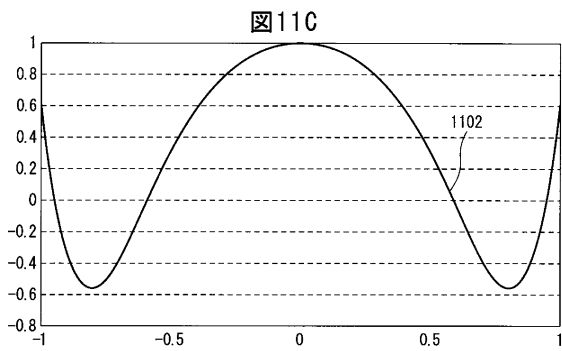
【図11A】



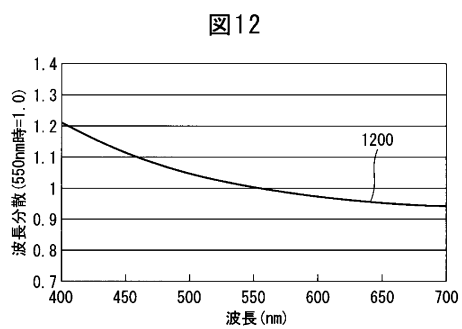
【図11B】



【図11C】



【図12】



フロントページの続き

- (72)発明者 田辺 綾乃
東京都西東京市田無町六丁目1番12号 シチズンホールディングス株式会社内
- (72)発明者 横山 正史
東京都西東京市田無町六丁目1番12号 シチズンホールディングス株式会社内
- (72)発明者 橋本 信幸
東京都西東京市田無町六丁目1番12号 シチズンホールディングス株式会社内
- (72)発明者 栗原 誠
山梨県南都留郡富士河口湖町船津6663番地の2 シチズンセイミツ株式会社内

審査官 佐藤 宙子

- (56)参考文献 特開2006-330089(JP,A)
特開2005-267756(JP,A)
特開2007-134023(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/00 - 1/29
G02B 3/12 - 3/14
G02B 21/00