

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5693559号  
(P5693559)

(45) 発行日 平成27年4月1日(2015.4.1)

(24) 登録日 平成27年2月13日(2015.2.13)

(51) Int. Cl.		F 1			
<b>GO2B</b>	<b>21/00</b>	<b>(2006.01)</b>	GO2B	21/00	
<b>GO2F</b>	<b>1/13</b>	<b>(2006.01)</b>	GO2F	1/13	505
<b>G11B</b>	<b>7/135</b>	<b>(2012.01)</b>	G11B	7/135	A

請求項の数 10 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2012-501912 (P2012-501912)	(73) 特許権者	503360115
(86) (22) 出願日	平成23年2月24日 (2011.2.24)		独立行政法人科学技術振興機構
(86) 国際出願番号	PCT/JP2011/054819		埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(87) 国際公開番号	W02011/105618	(73) 特許権者	000001960
(87) 国際公開日	平成23年9月1日 (2011.9.1)		シチズンホールディングス株式会社
審査請求日	平成25年11月1日 (2013.11.1)		東京都西東京市田無町六丁目1番12号
(31) 優先権主張番号	特願2010-42763 (P2010-42763)	(74) 代理人	100099759
(32) 優先日	平成22年2月26日 (2010.2.26)		弁理士 青木 篤
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(74) 代理人	100092624
			弁理士 鶴田 準一
		(74) 代理人	100114018
			弁理士 南山 知広
		(74) 代理人	100133835
			弁理士 河野 努

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 顕微鏡装置、光ピックアップ装置及び光照射装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1の波長を持つ直線偏光を出力する第1の光源と、  
 液晶分子が含まれる液晶層を有し、前記直線偏光に当該液晶層を透過させることにより、前記直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光変換素子と、  
 前記ラジアル偏光を物体面に集光する対物レンズと、  
 前記物体面からの光を集光する集光レンズと、  
 前記集光レンズにより集光された光を受光し、当該光の強度に応じた信号を出力する受光素子と、

前記偏光変換素子が有する前記液晶層に前記第1の波長に応じた電圧を印加するコントローラと、  
 を有し、

前記偏光変換素子は、前記対物レンズの前記光源側に配置され、光軸に沿って配置された、入射光の一部の位相を反転する位相反転素子と、前記直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光面回転素子とを有し、

前記偏光面回転素子は、前記液晶層と、該液晶層を挟んで対向するように配置された二つの第1の透明電極とを有し、

前記液晶層は、前記偏光面回転素子と前記光軸との第1の交点を中心とする円周方向に沿って配置された複数の領域を有し、前記複数の領域のそれぞれに含まれる前記液晶分子の配向方向は互いに異なり、

10

20

前記液晶層の前記複数の領域のそれぞれは、前記二つの第1の透明電極間に前記第1の波長に応じた電圧が印加されることにより、前記直線偏光のうちの当該領域を透過した成分の偏光面を、当該領域に含まれる前記液晶分子の配向方向に応じて前記第1の交点を中心とする放射方向に平行となるように回転させ、

前記位相反転素子は、該位相反転素子と前記光軸との第2の交点を中心とした放射方向に沿って交互に配置された第1の輪帯部分及び第2の輪帯部分を有し、前記第1の輪帯部分に入射した前記直線偏光または前記ラジアル偏光の位相を、前記第2の輪帯部分に入射した前記直線偏光または前記ラジアル偏光の位相に対して反転させる、ことを特徴とする顕微鏡装置。

【請求項2】

前記複数の領域のそれぞれに含まれる前記液晶分子の配向方向は、前記偏光面回転素子に入射した直線偏光の偏光面となす角度が、前記第1の交点及び当該領域を通る所定の直線と前記偏光面との間の角度の1/2となる方向であり、

前記二つの第1の透明電極間に前記第1の波長に応じた電圧が印加されることにより、前記偏光面回転素子は、前記直線偏光のうち、前記複数の領域のそれぞれを透過した成分の偏光面を、前記直線偏光の偏光面と前記配向方向のなす角の2倍の角度回転させて前記所定の直線と平行にする、請求項1に記載の顕微鏡装置。

【請求項3】

前記複数の領域のそれぞれにおける前記所定の直線は、前記第1の交点を通り、かつ当該領域を2等分する線である、請求項2に記載の顕微鏡装置。

【請求項4】

前記複数の領域は、前記第1の交点を中心とする円周方向に沿って前記液晶層を等分割することにより得られ、前記複数の領域のうち、前記直線偏光の偏光面に平行でかつ前記光軸を通る面と交差する最大二つの領域の何れか一方を第1の領域とし、前記複数の領域の総数をNとしたときに該第1の領域に対して時計回りまたは反時計回りの順にn番目の領域における前記配向方向と、前記第1の領域に入射する前記直線偏光の偏光面とがなす角度が、

$$= 360^\circ \times (n-1) / (2N)$$

となるように、前記複数の領域のそれぞれにおける前記配向方向が設定され、ここでnは1からNの何れかの整数である、請求項1に記載の顕微鏡装置。

【請求項5】

前記位相反転素子は、液晶分子が含まれる第2の液晶層と、該第2の液晶層を挟んで対向するように配置された二つの第2の透明電極とを有し、前記二つの第2の透明電極のうち的一方は、前記第1の輪帯部分に対応した複数の輪帯電極であり、該輪帯電極と前記二つの第2の透明電極の他方との間に前記第1の波長に応じた電圧を印加することにより、前記第1の輪帯部分に入射する前記直線偏光または前記ラジアル偏光の位相を反転させる、請求項1～4の何れか一項に記載の顕微鏡装置。

【請求項6】

前記位相反転素子は、前記偏光面回転素子の入射側に配置され、前記第2の液晶層に含まれる液晶分子は、前記位相反転素子に入射する直線偏光の偏光面と平行な方向に沿って配向される、請求項5に記載の顕微鏡装置。

【請求項7】

前記位相反転素子は、前記偏光面回転素子の出射側に配置され、前記第2の液晶層に含まれる液晶分子は、前記第2の交点を中心とした放射状に配向される、請求項5に記載の顕微鏡装置。

【請求項8】

前記第1の波長と異なる第2の波長を持つ直線偏光を出力し、当該第2の波長を持つ直線偏光が前記偏光変換素子及び前記対物レンズを通過して前記物体面に集光されるように配置された第2の光源をさらに有し、

10

20

30

40

50

前記コントローラは、前記第1の光源及び前記第2の光源のうちの何れか一方を点灯させるとともに、当該点灯中の光源から出力される直線偏光の波長に応じた電圧を前記二つの第1の透明電極間及び前記二つの第2の透明電極間に印加する、請求項5～7の何れか一項に記載の顕微鏡装置。

【請求項9】

所定の波長を持つ直線偏光を出力する光源と、  
 液晶分子が含まれる液晶層を有し、当該液晶層を透過した前記直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光変換素子と、  
 前記ラジアル偏光を物体面に集光する対物レンズと、  
 前記物体面で反射された光を結像する結像レンズと、  
 前記結像レンズにより結像された光を受光し、当該光の強度に応じた信号を出力する受光素子と、

前記偏光変換素子が有する前記液晶層に前記所定の波長に応じた電圧を印加する駆動回路と、

前記信号が最大となるように前記駆動回路が出力する電圧を調節するコントローラと、を有し、

前記偏光変換素子は、前記対物レンズの前記光源側の瞳面に配置され、光軸に沿って配置された、入射光の一部の位相を反転する位相反転素子と、前記直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光面回転素子とを有し、

前記偏光面回転素子は、前記液晶層と、該液晶層を挟んで対向するように配置された二つの第1の透明電極とを有し、

前記液晶層は、前記偏光面回転素子と前記光軸との第1の交点を中心とする円周方向に沿って配置された複数の領域を有し、前記複数の領域のそれぞれに含まれる前記液晶分子の配向方向は互いに異なり、

前記液晶層の前記複数の領域のそれぞれは、前記二つの第1の透明電極間に前記所定の波長に応じた電圧が印加されることにより、前記直線偏光のうちの当該領域を透過した成分の偏光面を、当該領域に含まれる前記液晶分子の配向方向に応じて前記第1の交点を中心とする放射方向に平行となるように回転させ、

前記位相反転素子は、該位相反転素子と前記光軸との第2の交点を中心とした放射方向に沿って交互に配置された第1の輪帯部分及び第2の輪帯部分を有し、前記第1の輪帯部分に入射した前記直線偏光または前記ラジアル偏光の位相を、前記第2の輪帯部分に入射した前記直線偏光または前記ラジアル偏光の位相に対して反転させる、  
 ことを特徴とする光ピックアップ装置。

【請求項10】

所定の波長を持つ直線偏光を出力する光源と、  
 液晶分子が含まれる液晶層を有し、当該液晶層を透過した前記直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光変換素子と、

前記ラジアル偏光を物体面に集光する対物レンズと、

前記所定の波長に応じた電圧を前記液晶層に印加する駆動回路と、

を有し、

前記偏光変換素子は、前記対物レンズの前記光源側の瞳面に配置され、光軸に沿って配置された、入射光の一部の位相を反転する位相反転素子と、前記直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光面回転素子とを有し、

前記偏光面回転素子は、前記液晶層と、該液晶層を挟んで対向するように配置された二つの第1の透明電極とを有し、

前記液晶層は、前記偏光面回転素子と前記光軸との第1の交点を中心とする円周方向に沿って配置された複数の領域を有し、前記複数の領域のそれぞれに含まれる前記液晶分子の配向方向は互いに異なり、

前記液晶層の前記複数の領域のそれぞれは、前記二つの第1の透明電極間に前記所定の波長に応じた電圧が印加されることにより、前記直線偏光のうちの当該領域を透過した

10

20

30

40

50

成分の偏光面を、当該領域に含まれる前記液晶分子の配向方向に応じて前記第1の交点を中心とする放射方向に平行となるように回転させ、

前記位相反転素子は、該位相反転素子と前記光軸との第2の交点を中心とした放射方向に沿って交互に配置された第1の輪帯部分及び第2の輪帯部分を有し、前記第1の輪帯部分に入射した前記直線偏光または前記ラジアル偏光の位相を、前記第2の輪帯部分に入射した前記直線偏光または前記ラジアル偏光の位相に対して反転させる、  
ことを特徴とする光照射装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光変換素子を用いた顕微鏡装置、光ピックアップ装置及び光照射装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来より、照明光源としてレーザを用い、照明光源から出力されたレーザ光をサンプルに照射することにより、そのサンプルを観測する顕微鏡装置が利用されている。このような顕微鏡装置では、より解像度を高くするために、照明光源から照射され、サンプルに集光されるビームスポットの径が小さいほど望ましい。一般に、ビームスポットの最小径は、回折限界によって規定され、その最小径は波長に比例する。そのため、光源から照射される光の波長が短いほど、ビームスポットの径も小さくできる。

【0003】

しかし、波長が短い光を発する光源、例えば、紫色または紫外光を発するレーザは、それよりも長い波長、例えば、緑色または赤色光を発する光源よりも一般に高価である。また、一般に、紫色から紫外にわたる波長範囲では、波長が短くなるにつれて光学材料の透過率も低下する。そのため、紫色または紫外光に対して高い透過率を持つ光学材料の種類は限られてくる。

【0004】

そこで、ラジアル偏光が注目されている。ラジアル偏光は、光軸を中心として、直線偏光の偏光面が放射状に分布する偏光である。ラジアル偏光を集光レンズにより焦点を結ばせることにより、焦点面に集光された光がz偏光（すなわち、光の伝播方向と電界方向が同じとなる偏光）となり、XまたはY偏光の回折限界によるビームスポット径よりも小さいスポット径に光を集光させることが可能であることが報告されている。また、ラジアル偏光を用いることにより、光軸に沿ってビーム径が狭い範囲が長くなり、これにより焦点深度も深くなることも報告されている（例えば、特開2008-39882号公報、Chin-Cherng Sun、Chin-Ku Liu、“Ultras small focusing spot with a long depth of focus based on polarization and phase modulation”、OPTICS LETTERS、Optical Society of America、2003年、第28巻、第2号、p.99-101及びHAIFENG WANG等、“Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics”、Nature photonics、2008年、第2巻、p.501-505を参照）。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

このようなラジアル偏光を生成するために、例えば、光軸方向に対して直交する面において複数の半波長板が並び、かつ各半波長板の光学軸の方向が異なるように貼り合わせた偏光変換素子が用いられる。また、フォトリソグラフィを用いて、直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光変換素子も提案されている。

10

20

30

40

50

## 【0006】

しかし、半波長板及びフォトニック結晶では、入射する光の波長が変化すれば、常光線と異常光線との間に生じる位相差も変化する。そのため、半波長板またはフォトニック結晶を用いた偏光変換素子は、その偏光変換素子に入射する光線の波長が設計波長と異なると、入射光線をラジアル偏光に変換することができなくなる。

## 【0007】

そこで、本発明は、所定の波長域に含まれる何れの波長を持つ照明光を用いても、回折限界により規定される分解能よりも高い分解能を有する顕微鏡装置、光ピックアップ装置及び光照射装置を提供することを目的とする。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0008】

本発明の一つの側面によれば、顕微鏡装置が提供される。この顕微鏡装置は、第1の波長を持つ直線偏光を出力する光源と、液晶分子が含まれる液晶層を有し、直線偏光にその液晶層を透過させることにより、直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光変換素子と、ラジアル偏光を物体面に集光する対物レンズと、物体面からの光を集光する集光レンズと、集光レンズにより集光された光を受光し、受光した光の強度に応じた信号を出力する受光素子と、偏光変換素子が有する液晶層に第1の波長に応じた電圧を印加するコントローラとを有する。

偏光変換素子は、対物レンズの光源側に配置され、光軸に沿って配置された、入射光の一部の位相を反転する位相反転素子と、直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光面回転素子を有する。偏光面回転素子は、上記の液晶層と、その液晶層を挟んで対向するように配置された二つの透明電極とを有し、液晶層は偏光面回転素子と光軸との第1の交点を中心とする円周方向に沿って配置された複数の領域を有し、複数の領域のそれぞれに含まれる液晶分子の配向方向は互いに異なり、液晶層の複数の領域のそれぞれは、二つの第1の透明電極間に第1の波長に応じた電圧が印加されることにより、直線偏光のうちのその領域を透過した成分の偏光面を、その領域に含まれる液晶分子の配向方向に応じて第1の交点を中心とする放射方向に平行となるように回転させる。これにより、偏光面回転素子は直線偏光をラジアル偏光に変換する。

また位相反転素子は、その位相反転素子と光軸との第2の交点を中心とした放射方向に沿って交互に配置された第1の輪帯部分及び第2の輪帯部分を有し、第1の輪帯部分に入射した直線偏光またはラジアル偏光の位相を、第2の輪帯部分に入射した直線偏光またはラジアル偏光の位相に対して反転させる。

## 【0009】

複数の領域のそれぞれに含まれる液晶分子の配向方向は、偏光面回転素子に入射した直線偏光の偏光面となす角度が、第1の交点及びその領域を通る所定の直線と偏光面との間の角度の1/2となる方向であり、二つの第1の透明電極間に第1の波長に応じた電圧が印加されることにより、偏光面回転素子は、入射した直線偏光のうち、複数の領域のそれぞれを透過した成分の偏光面を、その直線偏光の偏光面と配向方向のなす角の2倍の角度回転させて所定の直線と平行にすることが好ましい。

## 【0010】

また、複数の領域のそれぞれにおける所定の直線は、第1の交点を通り、かつその領域を2等分する線であることが好ましい。

## 【0011】

さらに、複数の領域は、第1の交点を中心とする円周方向に沿って液晶層を等分割することにより得られ、複数の領域のうち、偏光面回転素子に入射する直線偏光の偏光面に平行でかつ光軸を通る面と交差する二つの領域の何れか一方を第1の領域とし、複数の領域の総数をNとしたときに第1の領域に対して時計回りまたは反時計回りの順にn番目の領域における配向方向と、第1の領域に入射する直線偏光の偏光面とがなす角度が、

$$= 360^\circ \times (n-1)/(2N)$$

となるように、複数の領域における配向方向が設定されることが好ましい。ただしnは、

10

20

30

40

50

1 から N までの何れかの整数である。

【 0 0 1 2 】

また、位相反転素子は、液晶分子が含まれる第 2 の液晶層と、第 2 の液晶層を挟んで対向するように配置された二つの第 2 の透明電極とを有し、二つの第 2 の透明電極のうち一方は、第 1 の輪帯部分に対応した複数の輪帯電極であり、輪帯電極と二つの第 2 の透明電極の他方との間に第 1 の波長に応じた電圧を印加することにより、位相反転素子は、第 1 の輪帯部分に入射する直線偏光またはラジアル偏光の位相を反転させることが好ましい。

【 0 0 1 3 】

この場合において、位相反転素子は、偏光面回転素子の入射側に配置され、第 2 の液晶層に含まれる液晶分子は、位相反転素子に入射する直線偏光の偏光面と平行な方向に沿って配向されることが好ましい。

10

【 0 0 1 4 】

あるいは、位相反転素子は、偏光面回転素子の出射側に配置され、第 2 の液晶層に含まれる液晶分子は、第 2 の交点を中心とした放射状に配向されることが好ましい。

【 0 0 1 5 】

また顕微鏡装置は、第 1 の波長と異なる第 2 の波長を持つ直線偏光を出力し、第 2 の波長を持つ直線偏光が偏光変換素子及び対物レンズを通して物体面に集光されるように配置された第 2 の光源をさらに有することが好ましい。この場合において、コントローラは、第 1 の光源及び第 2 の光源のうち何れか一方を点灯させるとともに、点灯中の光源から出力される直線偏光の波長に応じた電圧を二つの第 1 の透明電極間及び二つの第 2 の透明電極間に印加することが好ましい。

20

【 0 0 1 6 】

本発明の他の側面によれば、光ピックアップ装置が提供される。この光ピックアップ装置は、所定の波長を持つ直線偏光を出力する光源と、液晶分子が含まれる液晶層を有し、その液晶層を透過した直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光変換素子と、ラジアル偏光を物体面に集光する対物レンズと、物体面で反射された光を結像する結像レンズと、結像レンズにより結像された光を受光し、受光した光の強度に応じた信号を出力する受光素子と、偏光変換素子が有する液晶層に所定の波長に応じた電圧を印加する駆動回路と、受光した光の強度に応じた信号が最大となるように駆動回路が出力する電圧を調節するコントローラとを有する。

30

偏光変換素子は、対物レンズの光源側の瞳面に配置され、光軸に沿って配置された、入射光の一部の位相を反転する位相反転素子と、直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光面回転素子とを有する。偏光面回転素子は、上記の液晶層と、その液晶層を挟んで対向するように配置された二つの第 1 の透明電極とを有し、液晶層は、偏光面回転素子と光軸との第 1 の交点を中心とする円周方向に沿って配置された複数の領域を有し、複数の領域のそれぞれに含まれる液晶分子の配向方向は互いに異なる。液晶層の複数の領域のそれぞれは、二つの第 1 の透明電極間に所定の波長に応じた電圧が印加されることにより、直線偏光のうちその領域を透過した成分の偏光面を、その領域に含まれる液晶分子の配向方向に応じて第 1 の交点を中心とする放射方向に平行となるように回転させる。これにより、偏光面回転素子は直線偏光をラジアル偏光に変換する。

40

また位相反転素子は、位相反転素子と光軸との第 2 の交点を中心とした放射方向に沿って交互に配置された第 1 の輪帯部分及び第 2 の輪帯部分を有し、第 1 の輪帯部分に入射した直線偏光またはラジアル偏光の位相を、第 2 の輪帯部分に入射した直線偏光またはラジアル偏光の位相に対して反転させる。

【 0 0 1 7 】

本発明のさらに他の側面によれば、光照射装置が提供される。この光照射装置は、所定の波長を持つ直線偏光を出力する光源と、液晶分子が含まれる液晶層を有し、その液晶層を透過した直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光変換素子と、ラジアル偏光を物体面に集光する対物レンズと、光源から出力される直線偏光の波長に応じた電圧を液晶層に印加

50

する駆動回路とを有する。

偏光変換素子は、対物レンズの光源側の瞳面に配置され、光軸に沿って配置された、入射光の一部の位相を反転する位相反転素子と、直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光面回転素子とを有する。偏光面回転素子は、上記の液晶層と、その液晶層を挟んで対向するように配置された二つの第1の透明電極とを有し、液晶層は、偏光面回転素子と光軸との第1の交点を中心とする円周方向に沿って配置された複数の領域を有し、複数の領域のそれぞれに含まれる液晶分子の配向方向は互いに異なる。液晶層の複数の領域のそれぞれは、二つの第1の透明電極間に所定の波長に応じた電圧が印加されることにより、直線偏光のうちその領域を透過した成分の偏光面を、その領域に含まれる液晶分子の配向方向に応じて第1の交点を中心とする放射方向に平行となるように回転させる。これにより、偏光面回転素子は直線偏光をラジアル偏光に変換する。

10

また位相反転素子は、位相反転素子と光軸との第2の交点を中心とした放射方向に沿って交互に配置された第1の輪帯部分及び第2の輪帯部分を有し、第1の輪帯部分に入射した直線偏光またはラジアル偏光の位相を、第2の輪帯部分に入射した直線偏光またはラジアル偏光の位相に対して反転させる。

【発明の効果】

【0018】

本発明に係る顕微鏡装置、光ピックアップ装置及び光照射装置は、偏光変換素子が有する液晶に印加する電圧を調節することにより、所定の波長域に含まれる何れの波長を持つ照明光を用いても、回折限界により規定される分解能よりも高い分解能を有するという効果を奏する。

20

【図面の簡単な説明】

【0019】

図1は、本発明の一つの実施形態に係る顕微鏡装置の概略構成図である。

図2は、本発明の一つの実施形態に係る顕微鏡装置で用いられる偏光変換素子の概略正面図である。

図3(A)は、図2のXXの矢印で表された線における、電圧が印加されていないときの偏光変換素子の概略側面断面図であり、図3(B)は、図2のXXの矢印で表された線における、電圧が印加されたときの偏光変換素子の概略側面断面図である。

図4は、位相反転素子の透明電極の概略正面図である。

30

図5は、偏光面回転素子の液晶層の各領域における液晶の配向方向と、各領域を透過した直線偏光成分の偏光方向を示す図である。

図6は、偏光変換素子から出射したラジアル偏光の概略を示す図である。

図7は、偏光面回転素子の液晶層が互いに配向方向の異なる6個の領域を有する場合における、各領域における液晶の配向方向と、各領域を透過した直線偏光成分の偏光方向を示す図である。

図8は、偏光面回転素子が有する透明電極間の液晶層に印加される電圧とその液晶層により生じる常光線と異常光線の光路長差の一例を示す図である。

図9(A)及び図9(B)は、それぞれ、変形例による、位相反転素子に設けられた入射側の透明電極の概略正面図である。

40

図10(A)は第2の実施形態に係る偏光変換素子の概略背面図であり、図10(B)は図10(A)のYYの矢印で表された線における、第2の実施形態に係る偏光変換素子の概略側面断面図である。

図11(A)は、変形例による位相反転素子の一方の側の透明電極の構造を示す概略正面図であり、図11(B)は、変形例による位相反転素子の他方の側の透明電極の構造を示す概略背面図である。

図12は、他の実施形態による、偏光変換素子を利用した光照射装置の一例である光ピックアップ装置の概略構成図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

50

以下、図を参照しつつ、一つの実施形態による、顕微鏡装置について説明する。この顕微鏡装置は、対物レンズの入射瞳面に配置された、照明光である直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光変換素子を有する。これにより、この顕微鏡装置は、対物レンズの焦点面においてz偏光効果を生じさせることで、回折限界によって規定されるスポット径よりも小さいスポット径を持つように、照明光源からの光を集光する。また偏光変換素子が、照明光の偏光面を制御するための液晶層を有し、その液晶層に印加される電圧を調節することで、この顕微鏡装置は、所定の波長域に含まれる任意の波長の直線偏光である照明光を用いても、照明光をラジアル偏光にすることを可能とする。

#### 【0021】

図1は、本発明の一つの実施形態に係る顕微鏡装置の概略構成図である。図1に示されるように、顕微鏡装置100は、光源101と、コリメートレンズ102と、ビームスプリッタ103と、偏光変換素子104と、対物レンズ105と、集光レンズ106と、マスク板107と、受光素子108と、可動ステージ109と、アクチュエータ110と、コントローラ111とを有する。

受光素子108、マスク板107、集光レンズ106、ビームスプリッタ103及び対物レンズ105は、集光レンズ106と対物レンズ105によって規定される光軸OAに沿って一列に配置される。またビームスプリッタ103の側面には、光軸OAと直交する方向に沿って光源101とコリメートレンズ102と偏光変換素子104とが一列に配置される。

#### 【0022】

光源101から放射された直線偏光である照明光は、コリメートレンズ102を通った後、偏光変換素子104を透過する。そしてその照明光は、偏光変換素子104を透過することによってラジアル偏光に変換される。その後、ラジアル偏光となった照明光は、ビームスプリッタ103により反射され、対物レンズ105によって可動ステージ109上に配置されたサンプル120の表面または内部に設定された、観察対象となる物体面に焦点を結ぶ。物体面で反射または散乱され、若しくは蛍光発光した光は、再び対物レンズ105を通った後、ビームスプリッタ103を直進する。その後、物体面で反射または散乱され、若しくは蛍光発光した光は、集光レンズ106によって受光素子108上に集光される。そしてコリメートレンズ102、対物レンズ105及び集光レンズ106は、共焦点光学系を構成し、光源101からの光が物体面において焦点を結ぶ場合に、その焦点からの光が受光素子106においても集光される。

なお、理解を容易にするために図示していないが、顕微鏡装置1は、光路上に、球面収差用補償光学系など、各種の補償光学系を有していてもよい。

#### 【0023】

光源101は、直線偏光である照明光を出力する。そのために、光源101は、例えば、半導体レーザを有する。あるいは、光源101は、アルゴンイオンレーザといったガスレーザ、またはYAGレーザといった固体レーザを有していてもよい。光源101から出力される照明光が直線偏光でない場合、光源101とコリメートレンズ102の間に、照明光を直線偏光にするために検光子が配置されてもよい。

さらに、光源101は、所定の波長域、例えば、351nm~750nmの範囲に含まれる、互いに異なる波長の光を出力する複数の発光素子を有していてもよい。この場合、光源101は、コントローラ111からの制御信号に従って、何れか一つの発光素子に照明光を出力させる。

#### 【0024】

コリメートレンズ102は、光源101とビームスプリッタ103の間において、コリメートレンズ102の前側焦点に光源101が位置するように配置される。そしてコリメートレンズ102は、光源101から出力された照明光を平行光にする。平行光となった照明光は、偏光変換素子104へ入射する。

#### 【0025】

偏光変換素子104は、対物レンズ105の前側瞳面に配置されることが好ましい。特

10

20

30

40

50



に、本実施形態では、偏光変換素子104は、物体面からの光が偏光変換素子104を透過しないように、コリメートレンズ102とビームスプリッタ103の間に配置される。そして偏光変換素子104は、液晶層を有し、その液晶層を透過した照明光の偏光方向を変化させることにより、直線偏光を持つ照明光をラジアル偏光に変換する。なお、偏光変換素子104は、物体面からの光も偏光変換素子104を透過するように、ビームスプリッタ103と対物レンズ105の間に配置されてもよい。

なお、偏光変換素子104の詳細については後述する。

#### 【0026】

ビームスプリッタ103は、対物レンズ105と集光レンズ106の間に配置される。そしてビームスプリッタ103は、コリメートレンズ102から入射した照明光を対物レンズ105へ向けて反射する。一方、ビームスプリッタ103は、光軸OAに沿って入射した光を直進させる。

10

#### 【0027】

対物レンズ105は、偏光変換素子104から出射し、ビームスプリッタ103にて反射されたラジアル偏光に、物体面上に焦点を結ばせる。この場合、焦点近傍では、対物レンズ105により集光された光はz偏光となる。そのため、焦点近傍における光のスポット径は、回折限界により規定されるスポット径よりも小さくすることができる。例えば、本実施形態によるスポット径は、回折限界により規定されるスポット径の約1.5~約1.7分の1となる。また、集光された光の焦点深度も大きくすることができる。

#### 【0028】

20

さらに、対物レンズ105には、焦点位置を調節するためのアクチュエータ110が取り付けられている。アクチュエータ110が、図中の矢印Zの方向、すなわち光軸OAに平行な方向に沿って対物レンズ105を移動させることによって、照明光の焦点位置が光軸OA方向に移動する。またアクチュエータ110は、コントローラ111と接続され、コントローラ111からの制御信号に応じて対物レンズ105を移動させる。

#### 【0029】

物体面において反射または散乱された光は、再度対物レンズ105を透過して平行光となる。そしてその光は、ビームスプリッタ103を透過し、集光レンズ106に入射する。そして集光レンズ106に入射した光は、受光素子108によって受光される。

#### 【0030】

30

マスク板107は、集光レンズ106と受光素子108の間で、集光レンズ106の焦点近傍に配置される。そしてマスク板107には、光軸OAに沿ってピンホール107aが形成されている。これにより、対物レンズ105の焦点位置近傍から反射または散乱され、若しくは蛍光発光した光は、平行光として集光レンズ106に入射し、集光レンズ106によってピンホール107aの近傍で焦点を結ぶので、ピンホール107aを通過して受光素子108に達することができる。一方、対物レンズ105の焦点位置から外れた位置からの光は、マスク板107によって遮られ、受光素子108に達しない。そのため、顕微鏡装置100は、コントラストの高いサンプル120の像を得ることができる。

#### 【0031】

受光素子108は、例えば、アレイ状に配列された複数のCCDまたはC-MOSなどの半導体受光素子を有する。そして各半導体受光素子は、受光した光の強度に応じた電気信号を出力する。そして受光素子108は、各半導体受光素子が出力した電気信号を平均し、その平均値に相当する電気信号を、受光した光の強度を表す光強度信号としてコントローラ111へ伝達する。あるいは、受光素子108は、光電子増倍管を有していてもよい。そして受光素子108は、光電子増倍管が受光し多光の強度に応じた電気信号を生成し、その電気信号を受光した光の強度を表す光強度信号としてコントローラ111へ伝達する。

40

#### 【0032】

可動ステージ109は、サンプル120を載置するためのステージである。また可動ステージ109は、例えば、いわゆるXYステージとすることができ、光軸OAに対して直

50

交する面内において、互いに直交する2方向に移動可能となっている。なお、以下では、便宜上、可動ステージ109が移動可能な一方の方向をX軸、X軸と直交する方向をY軸とする。そして可動ステージ109は、コントローラ111と通信可能に接続されている。そして可動ステージ109は、図示しないアクチュエータを有し、コントローラ111から受信した制御信号に従って、X軸方向またはY軸方向に所定距離だけ移動する。

【0033】

コントローラ111は、例えば、プロセッサと、メモリと、コントローラ111を顕微鏡装置100の各部と接続するためのインターフェース回路とを有する。そしてコントローラ111は、光源101、偏光変換素子104、可動ステージ109及びアクチュエータ110を制御する。そしてコントローラ111は、光源101に対して所定の電力を供給することにより、光源101に照明光を出力させる。また光源101が複数の発光素子を有する場合、コントローラ111は、例えば、図示しないユーザインターフェースを介したユーザの操作に従って、複数の発光素子のうちの何れか一つの発光素子に照明光を出力させる制御信号を光源101へ送信する。

10

【0034】

またコントローラ111は、対物レンズ105を光軸OAに沿って所定距離だけ移動させる制御信号をアクチュエータ110へ送信する。アクチュエータ110は、コントローラ111からその制御信号を受信すると、対物レンズ105をその制御信号によって指示された距離だけ移動させる。

【0035】

コントローラ111は、受光素子108から受信した光強度信号からサンプル120の表面または内部に設定された物体面の画像を生成する。そのために、コントローラ111は、可動ステージ109を所定位置へ移動させる制御信号を、可動ステージ109へ送信することにより、可動ステージ109を光軸OAに直交する面内で移動させる。

20

そしてコントローラ111は、物体面上に2次元状に等間隔で設定された複数の測定点のそれぞれが、照明光のスポットに位置するように、可動ステージ109を移動させつつ、受光素子108から各測定点での光強度信号を受信する。そしてコントローラ111は、例えば、各測定点の光強度信号を一つの画素の値として画像を生成することにより、サンプル120の物体面における2次元画像を得ることができる。

また変形例によれば、画像取得のためにサンプル120をXYステージのような可動ステージで動かす代わりに、顕微鏡装置は、ガルバノミラー等を用いて光源101から発したレーザビームの向きを変えることにより、そのビームでサンプルを走査してもよい。

30

【0036】

さらにコントローラ111は、図示しない駆動回路を有し、その駆動回路を介して偏光変換素子104に印加する電圧を調節することにより、偏光変換素子104が所定の波長を持つ直線偏光をラジアル偏光に変換できるように、偏光変換素子104を制御する。

そのために、コントローラ111は、光源101から出力される光の波長に応じた印加電圧が偏光変換素子104の各液晶層に印加されるように、駆動回路を制御する。

特に、光源101が、互いに波長の異なる光を出力する複数の発光素子を有している場合、コントローラ111は、発光させる発光素子に応じて、偏光変換素子104が有する液晶層に印加される電圧を調節する。

40

なお、駆動回路から偏光変換素子104が有する液晶層に対して印加される駆動電圧は、例えば、パルス高さ変調(PHM)またはパルス幅変調(PWM)された交流電圧であってもよい。

【0037】

また、光源101から出力される光の波長が、例えば、発光素子の温度に応じて変動することもある。そこでコントローラ111は、サンプル120の物体面における画像に基づいて、偏光変換素子104が有する液晶層に印加する電圧を調節してもよい。例えば、コントローラ111は、偏光変換素子104の液晶層に印加する電圧を変えて、可動ステージ109を2次元に移動させつつ、受光素子108からの光強度信号を取得することに

50

より、印加した電圧に応じた物体面におけるサンプル 120 の画像を複数生成する。そしてコントローラ 111 は、電圧値と画像を対応付けて内蔵するメモリに記憶する。そして、コントローラ 111 は、画像が最も鮮明となる電圧値を決定し、その電圧を駆動回路を介して偏光変換素子 104 の液晶層に印加する。

【0038】

なお、最も鮮明な画像を決定するために、コントローラ 111 は、例えば、得られた各画像を周波数変換してそれぞれ周波数画像を作成する。そしてコントローラ 111 は、各周波数画像を解析することにより、高周波数成分が最も高くなる周波数画像を特定し、特定された周波数画像に対応する画像を最も鮮明な画像と判定する。

【0039】

以下、偏光変換素子 104 について説明する。

図 2 は、偏光変換素子 104 の概略正面図である。また図 3 (A) 及び図 3 (B) は、それぞれ、図 2 に示された矢印 X、X で示された線における偏光変換素子 104 の概略側面断面図である。このうち、図 3 (A) は、偏光変換素子 104 に電圧が印加されていないときの偏光変換素子 104 に含まれる液晶分子の状態を表し、図 3 (B) は、偏光変換素子 104 に電圧が印加されたときの偏光変換素子 104 に含まれる液晶分子の状態を表す。

【0040】

図 2 及び図 3 (A) に示すように、この偏光変換素子 104 は、位相反転素子 2 と、光軸 OA に沿って位相反転素子 2 に隣接して配置された偏光面回転素子 3 とを有する。

なお、偏光変換素子 104 に入射する照明光は、直線偏光であり、位相反転素子 2 側から入射する。そしてその直線偏光は、位相反転素子 2 及び偏光面回転素子 3 を透過することによってラジアル偏光に変換され、偏光面回転素子 3 から出射する。

また、説明の便宜上、偏光変換素子 104 に入射する照明光の偏光面は、図 2 の矢印 A に示されるように、図 2 が表された面に直交し、かつ縦方向の面にあるものとする。

【0041】

位相反転素子 2 は、入射した直線偏光のうち、光軸 OA を中心とする少なくとも一つの輪帯状の部分の位相を他の部分の位相に対して反転させる。そのために、位相反転素子 2 は、液晶層 20 と、光軸 OA に沿って液晶層 20 の両側に略平行に配置された透明基板 21、22 を有する。そして液晶層 20 に含まれる液晶分子 27 は、透明基板 21 及び 22 と、シール部材 28 との間に封入されている。また位相反転素子 2 は、透明基板 21 と液晶層 20 の間に配置された透明電極 23 と、液晶層 20 と透明基板 22 の間に配置された透明電極 24 とを有する。なお、透明基板 21、22 は、例えば、ガラスまたは樹脂など、所定の波長域に含まれる波長を持つ光に対して透明な材料により形成される。また透明電極 23、24 は、例えば、ITO と呼ばれる、酸化インジウムに酸化スズを添加した材料により形成される。透明電極 23 と液晶層 20 の間に配向膜 25 が配置される。また透明電極 24 と液晶層 20 の間に配向膜 26 が配置される。これら配向膜 25、26 は、液晶分子 27 を所定の方向に配向させる。なお、液晶分子 27 が、光配向など、配向膜を用いない方法によって配向される場合、配向膜 25、26 は省略されてもよい。

さらに、各基板、各透明電極及び各配向膜の外周には鏡枠 29 が配置され、この鏡枠 29 が、各基板を保持している。

【0042】

図 3 (A) に示されるように、液晶層 20 に封入された液晶分子 27 は、例えば、ホモジニアス配向となり、かつ、入射する直線偏光の偏光面と略平行な方向に配向されている。すなわち、液晶分子 27 の長軸方向が、図 2 に示された矢印 A と略平行に、液晶分子が配向される。

【0043】

図 4 は、入射側に配置される位相反転素子 2 に設けられた透明電極 23 の概略正面図である。一方、透明電極 24 は、液晶層 20 全体を覆うように形成される。なお、透明電極 24 も、図 4 に示された透明電極 23 の形状と同様の形状を有してもよく、あるいは、透

10

20

30

40

50

明電極 24 が図 4 に示された電極形状を有し、透明電極 23 が液晶層 20 全体を覆うように形成されてもよい。

【0044】

透明電極 23 は、光軸 OA と位相反転素子 2 の交点  $c_0$  を中心とする、同心円状の少なくとも一つの輪帯状の電極を有する。本実施形態では、透明電極 23 は、4 個の輪帯状電極 23a ~ 23d を有する。これにより、液晶層 20 には、輪帯状電極 23a ~ 23d の何れかと透明電極 24 に挟まれた第 1 の輪帯状部分と、一方の側にのみ透明電極 24 が存在する第 2 の輪帯状部分とが、同心円状に交互に形成される。なお、輪帯状電極 23d の外周が、図 2 に示された領域 2a の外周に対応する。

【0045】

図 3 (B) に示されるように、これら輪帯状電極 23a ~ 23d と、液晶層 20 を挟んで対向して配置された透明電極 24 との間に、コントローラ 111 によって電圧が印加されると、それら第 1 の輪帯状部分 20a に含まれる液晶分子の長軸方向が、光軸 OA に直交する方向から光軸 OA に平行な方向に近づくように液晶分子が傾く。一方、透明電極間に挟まれていない第 2 の輪帯状部分 20b に含まれる液晶分子は、その長軸が光軸 OA に直交する方向を向いたままとなる。

【0046】

一般に、液晶分子の長軸方向に平行な偏光成分（すなわち、異常光線）に対する屈折率  $n_o$  は、液晶分子の短軸方向に平行な偏光成分（すなわち、常光線）に対する屈折率  $n_e$  よりも高い。ここで、透明電極 23 と 24 との間に電圧が印加されたときの、第 1 の輪帯状部分 20a に含まれる液晶分子の長軸方向と、電圧が印加された方向、すなわち光軸 OA の方向とがなす角を  $\theta$  とすれば、液晶層 20 を透過する光は、液晶分子 27 の長軸方向に対して角  $\theta$  をなす。このとき、液晶分子 27 が配向された方向と平行な偏光成分に対する液晶分子の屈折率を  $n$  とすると、 $n = n_o \cos^2 \theta + n_e \sin^2 \theta$  となる。そのため、液晶層 20 に含まれる液晶分子 27 がホモジニアス配向されており、液晶層 20 の厚さが  $d$  であると、液晶層 20 のうち、輪帯状電極 23a ~ 23d と透明電極 24 間に挟まれた第 1 の輪帯部分 20a を通る偏光成分と、第 2 の輪帯部分 20b を通る偏光成分との間に、光路長差  $n d (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$  が生じる。そしてそれら二つの偏光成分間に生じる位相差は、 $2\pi n d (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) / \lambda$  となる。なお、 $\lambda$  は、液晶層 20 に入射する光線の波長である。

【0047】

このように、コントローラ 111 が透明電極 23 と透明電極 24 との間に印加する電圧を調節することにより、位相反転素子 2 は、液晶層 20 を透過する光の位相を変調することができる。従って、透明電極 23 と透明電極 24 との間に入射光の波長に応じた所定の電圧が印加されると、位相反転素子 2 は、第 1 の輪帯部分 20a を通る光の位相を、第 2 の輪帯部分 20b を通る光の位相に対してだけずらすことができる。

【0048】

偏光面回転素子 3 は、位相反転素子 2 を透過した後に入射した直線偏光を、光軸 OA と偏光面回転素子 3 との交点  $c_1$  を中心とした、放射状の直線偏光分布を持つラジアル偏光に変換する。そのために、偏光面回転素子 3 は、液晶層 30 と、光軸 OA に沿って液晶層 30 の両側に略平行に配置された透明基板 31、32 を有する。なお、透明基板 31 と位相反転素子 2 の透明基板 22 のうちの何れか一方が省略されてもよい。この場合、例えば、透明基板 22 の一方の面に液晶層 20 が形成され、透明基板 22 の他方の面に液晶層 30 が形成される。

【0049】

また偏光面回転素子 3 は、透明基板 31 と液晶層 30 の間に配置された透明電極 33 と、液晶層 30 と透明基板 32 の間に配置された透明電極 34 とを有する。そして液晶層 30 に含まれる液晶分子 37 は、透明基板 31 及び 32 と、シール部材 38 との間に封入されている。なお、透明基板 31、32 は、例えば、ガラスまたは樹脂など、所定の波長域に含まれる波長を持つ光に対して透明な材料により形成される。また透明電極 33、34 は、例えば、ITO により形成される。さらに、透明電極 33 と液晶層 30 の間に配向膜

10

20

30

40

50

35が配置される。また透明電極34と液晶層30の間に配向膜36が配置される。これら配向膜35、36は、液晶分子37を所定の方向に配向させる。なお、液晶分子37が、光配向など、配向膜を用いない方法によって配向される場合、配向膜35、36は省略されてもよい。

さらに、各基板、各透明電極及び各配向膜の外周には鏡枠39が配置され、この鏡枠39が、各基板を保持している。なお、鏡枠29と鏡枠39とは、一体的に形成されてもよい。

#### 【0050】

液晶層30に封入された液晶分子37は、例えば、ホモジニアス配向される。また液晶層30は、交点 $c_1$ を中心として、光軸OAに直交する面内で円周方向に沿って配置された複数の扇形領域を含む。そして各扇形領域に含まれる液晶分子37は、入射する直線偏光の偏光面が、光軸OAを中心とした放射方向に略平行となるようにその偏光面を回転させるように配向される。

10

#### 【0051】

図5は、液晶層30の各扇形領域における液晶の配向方向と、各扇形領域を透過した直線偏光の偏光方向を示す液晶層30の概略正面図である。

本実施形態では、液晶層30は、時計回りに配置され、互いに配向方向が異なる8個の扇形領域30a~30hを有し、各扇形領域30a~30hの中心角は等しくなるように設定される。また図5において、矢印40a~40hは、それぞれ、各扇形領域30a~30hに含まれる液晶分子の配向方向を表す。また、矢印50a~50hは、それぞれ、各扇形領域30a~30hから出射する直線偏光の偏光面を表す。なお、矢印50a~50hのうち、矢印の先端が反対方向を向いている二つの矢印は、それら矢印で表される直線偏光の位相が互いにだけずれていることを表す。

20

なお、交点 $c_1$ を通過して扇形領域を2等分する直線を、その扇形領域の中心線と呼ぶ。

#### 【0052】

各扇形領域30a~30hの配向方向は、例えば、各扇形領域を透過した後の直線偏光成分の偏光面が、その透過した扇形領域の中心線と平行となるように決定される。そこで、光軸OAと液晶層30との交点 $c_1$ を通り、入射する直線偏光の偏光面Aに平行な面と交差する扇形領域30aを1番目の領域とし、扇形領域30aから時計回りまたは反時計回りに第n番目の扇形領域について、その扇形領域の配向方向と、扇形領域30aを通る偏光成分の偏光面Aとがなす角は次式に従って設定される。

30

$$= 360^\circ \times (n - 1) / (2N) \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

ただし、Nは扇形領域の総数であり、本実施形態ではN=8である。

#### 【0053】

例えば、 $n=1$ である扇形領域30aでは、 $=0$ となる。すなわち、扇形領域30aでは、入射する直線偏光の偏光面が回転することなく直線偏光が透過するように、液晶分子の配向方向は、入射する直線偏光の偏光面Aと略平行に設定される。

#### 【0054】

また、第n番目の扇形領域を、扇形領域30aを1番目の領域として時計回りにn番目の領域としたとき、各扇形領域30b~30hの配向方向と扇形領域30aを通る偏光成分の偏光面Aとがなす角は、それぞれ、時計回りを正として、 $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $112.5^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $157.5^\circ$ となるように、各扇形領域30b~30hの配向方向は設定される。

40

#### 【0055】

あるいは、第n番目の扇形領域を、扇形領域30aから反時計回りにn番目の領域としたとき、各扇形領域30b~30hの配向方向と扇形領域30aを通る偏光成分の偏光面Aとがなす角は、それぞれ、時計回りを正として、 $-157.5^\circ$ 、 $-135^\circ$ 、 $-112.5^\circ$ 、 $-90^\circ$ 、 $-67.5^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、 $-22.5^\circ$ となるように、各扇形領域30b~30hの配向方向は設定される。

#### 【0056】

50

透明電極 33、34 は、液晶層 30 全体を挟んで対向するように配置される。そして透明電極 33 と 34 との間に、所定の波長域に含まれる波長に対して液晶層 30 の扇形領域 30a ~ 30h が半波長板として機能するように、コントローラ 111 によって所定の電圧が印加される。

ここで、透明電極 33 と 34 との間に電圧が印加されると、液晶分子がその電圧に応じて電圧が印加された方向に対して平行になる方向に傾く。液晶分子の長軸方向と、電圧が印加された方向とがなす角を  $\theta$  とすれば、液晶層 30 を透過する光は、長軸方向に対して角  $\theta$  をなす。このとき、上記のように、液晶分子が配向された方向と平行な偏光成分に対する液晶分子の屈折率を  $n_{\parallel}$  とすると、 $n_{\parallel} = n_o \cos^2 \theta + n_e \sin^2 \theta$  となる。ただし、 $n_o$  は液晶分子の長軸方向に直交する偏光成分に対する屈折率であり、 $n_e$  は液晶分子の長軸方向に平行な偏光成分に対する屈折率である。

10

【0057】

そのため、液晶層 30 に含まれる液晶分子がホモジニアス配向されており、液晶層 30 の厚さが  $d$  であると、液晶分子の配向方向に平行な偏光成分と液晶分子の配向方向に直交する偏光成分との間に、光路長差  $\Delta n d (= n_{\parallel} d - n_o d)$  が生じる。したがって、透明電極 33 と 34 との間に印加する電圧を調節することにより、液晶分子の配向方向に平行な偏光成分と、液晶分子の配向方向に直交する偏光成分との光路長差を調節できる。そのため、コントローラ 111 が透明電極 33 と 34 との間に印加する電圧を調節することにより、光源 101 から出力される直線偏光が持つ波長に対して、扇形領域 30a ~ 30h がそれぞれ半波長板として機能する。

20

【0058】

各扇形領域 30a ~ 30h が半波長板として機能する場合、液晶分子 37 の配向方向に対して角度  $\theta$  をなす偏光面を有する直線偏光がそれら扇形領域を透過すると、その偏光面は、透過した扇形領域の配向方向に対して角度  $2\theta$  をなすように回転する。すなわち、偏光面は、配向方向を中心として、角度  $2\theta$  だけ回転する。

【0059】

図 5 に示した例では、各扇形領域 30a ~ 30h における液晶分子の配向方向は、扇形領域 30a に入射する直線偏光の偏光面 A に対する角度が、各扇形領域の中心線と液晶層 30 の扇形領域 30a に入射する直線偏光の偏光面 A との角度の  $1/2$  となるように設定されている。そのため、交点  $c_1$  から入射直線偏光の偏光面 A に沿って上方を向く方向を基準とし、時計回り方向を正とすると、各扇形領域 30a ~ 30h を透過した直線偏光成分の偏光面の角度は、それぞれ、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $315^\circ$  となる。このように、偏光面回転素子 3 から出射する光線は、光軸 OA を中心として放射状の直線偏光成分を持つ。

30

【0060】

図 6 は、偏光変換素子 104 から出射するラジアル偏光 61 の概略を示す図である。図 6 において、各矢印 61a ~ 61h は、それぞれ、直線偏光成分を表す。また、各矢印のうち、矢印の先端が反対方向を向いている二つの矢印は、それら矢印で表される直線偏光の位相が互いに  $180^\circ$  だけずれていることを表す。さらに、輪帯状の領域 62a ~ 62d は、それぞれ、位相反転素子 2 の第 1 の輪帯部分を透過した偏光成分を表す。また輪帯状の領域 62e ~ 62g は、それぞれ、位相反転素子 2 の第 2 の輪帯部分を透過した偏光成分を表す。

40

【0061】

図 6 に示されるように、このラジアル偏光 61 は、光軸 OA に対して放射状に偏光面を持つ 8 種類の直線偏光成分 61a ~ 61h を有する。そして各直線偏光成分 61a ~ 61h は、放射方向に沿って、位相反転素子 2 の透明電極 23、24 間に挟まれた第 1 の輪帯部分を透過した成分 62a ~ 62d と、透明電極に挟まれていない第 2 の輪帯部分を透過した成分 62e ~ 62g に対応して 7 つに区分され、隣接する区分間で位相が  $180^\circ$  ずれる。

【0062】

なお、各扇形領域 30a ~ 30h を透過した偏光成分の偏光面は、交点  $c_1$  を中心とし

50

た放射状に分布すればよく、その偏光面は、透過した扇形領域の中心線と平行でなくてもよい。各扇形領域 30 a ~ 30 h の配向方向は、各扇形領域 30 a ~ 30 h を透過した偏光の偏光面が当該扇形領域及び交点  $c_1$  を通る所定の直線と平行となるように設定されればよい。例えば、各扇形領域 30 a ~ 30 h の配向方向と、扇形領域 30 a に入射した直線偏光の偏光面 A とのなす角が、上記の (1) 式で求められる値に所定のオフセット値を加えた値となるように、各扇形領域 30 a ~ 30 h の配向方向が設定されてもよい。この場合、所定のオフセット値は、各扇形領域 30 a ~ 30 h の中心線と偏光面 A とのなす角にそのオフセット値の 2 倍を加算した角度（すなわち、扇形領域を透過した偏光成分の偏光面と扇形領域 30 a に入射する直線偏光の偏光面とがなす角）が、隣接する扇形領域との境界が偏光面 A となす角度を超えないように、例えば、 $\pm 5^\circ$  に設定される。

10

#### 【0063】

また、偏光面回転素子 3 の液晶層 30 が有する、配向方向の異なる領域の数は、8 個に限られない。液晶層 30 が有する配向方向が異なる領域の数は、ラジアル偏光による効果が得られるために必要な数であればよい。例えば、液晶層 30 は、4、5、6 あるいは 16 個の互いに配向方向が異なる領域を有していてもよい。

#### 【0064】

図 7 は、液晶層 30 が 6 個の扇形領域 30 i ~ 30 n を含むときの各扇形領域における液晶の配向方向と、各領域を透過した直線偏光の偏光方向を示す概略正面図である。なお、この変形例においても、透明電極 33、34 は、液晶層 30 全体を挟んで対向するように配置される。

20

この変形例において、矢印 40 i ~ 40 n は、それぞれ、各扇形領域 30 i ~ 30 n に含まれる液晶分子の配向方向を表す。また、矢印 50 i ~ 50 n は、それぞれ、各扇形領域 30 i ~ 30 n から出射する直線偏光の偏光面を表す。なお、矢印 50 i ~ 50 n のうち、矢印の先端が反対方向を向いている二つの矢印は、それら矢印で表される直線偏光の位相が互いに だけずれていることを表す。

#### 【0065】

各扇形領域 30 i ~ 30 n のうち、光軸 OA と液晶層 30 の交点  $c_1$  の上方に位置する扇形領域 30 i では、入射する直線偏光の偏光面 A と、扇形領域 30 i の中心線とが一致する。そのため、扇形領域 30 i を 1 番目の領域とする。このとき、時計回り方向に n 番目の扇形領域の配向方向は、例えば、その配向方向と偏光面 A とがなす角が上記の (1) 式に従って算出される角度となるように設定される。

30

この場合、各扇形領域 30 i ~ 30 n の配向方向と扇形領域 30 a を通る偏光成分の偏光面 A とがなす角は、それぞれ、時計回りを正として、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$  となる。

#### 【0066】

この場合も、各扇形領域 30 i ~ 30 n を透過した直線偏光に対して液晶層 30 が半波長板として機能するように、扇形領域 30 i ~ 30 n を挟む透明電極 33、34 間には入射光の波長に応じた電圧が印加される。

これにより、交点  $c_1$  から入射直線偏光の偏光面に沿って上方を向く方向を基準とし、時計回り方向を正とすると、各扇形領域 30 i ~ 30 n を透過した直線偏光成分の偏光面の角度は、それぞれ、 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $240^\circ$ 、 $300^\circ$  となる。このように、偏光面回転素子 3 から出射する光線は、光軸 OA を中心として放射状の直線偏光成分を持つ。

40

#### 【0067】

上記のように、位相反転素子 2 が入射光の一部の位相を反転させるために、一部の液晶分子 27 の長軸方向を光軸 OA 方向に傾ける角度と、偏光面回転素子 3 が、直線偏光をラジアル偏光に変換するために、透明電極 33 と 34 間に印加された電圧によって、液晶分子 37 の長軸方向を光軸 OA 方向に傾ける角度が等しくなるよう設定する。よって、コントローラ 111 は、各々適切な駆動電圧を用いて、液晶層 20 及び液晶層 30 を駆動することができる。

50

## 【 0 0 6 8 】

図 8 は、透明電極 3 3、3 4 間の液晶層 3 0 に印加される電圧と液晶層 3 0 により生じる常光線と異常光線の光路長差の一例を示す図である。

図 8 において、横軸は液晶層 3 0 に印加される電圧を表し、縦軸は光路長差を表す。グラフ 8 0 1 は、波長 4 5 0 nm を持つ光について、印加電圧と光路長差の関係を表す。グラフ 8 0 2 は、波長 5 5 0 nm を持つ光について、印加電圧と光路長差の関係を表す。グラフ 8 0 3 は、波長 7 8 0 nm を持つ光について、印加電圧と光路長差の関係を表す。

## 【 0 0 6 9 】

例えば、波長 4 5 0 nm を持つ光に対して液晶層 3 0 を半波長板として機能させるために、透明電極 3 3、3 4 間には、4 5 0 nm の整数倍に 2 2 5 nm を加えた光路長差が生じる電圧が印加されればよい。そこでグラフ 8 0 1 を参照すると、透明電極 3 3、3 4 間に、光路長差 1 1 2 5 nm に相当する約 1 . 4 V r m s の電圧が印加されればよい。

また、例えば、波長 5 5 0 nm を持つ光に対して液晶層 3 0 を半波長板として機能させるために、透明電極 3 3、3 4 間には、5 5 0 nm の整数倍に 2 7 5 nm を加えた光路長差が生じる電圧が印加されればよい。そこでグラフ 8 0 2 を参照すると、透明電極 3 3、3 4 間に、光路長差 1 3 7 5 nm に相当する約 1 V r m s の電圧が印加されればよい。

さらに、例えば、波長 7 8 0 nm を持つ光に対して液晶層 3 0 を半波長板として機能させるために、透明電極 3 3、3 4 間には、7 8 0 nm の整数倍に 3 9 0 nm を加えた光路長差が生じる電圧が印加されればよい。そこでグラフ 8 0 3 を参照すると、透明電極 3 3、3 4 間に、光路長差 1 1 7 0 nm に相当する約 1 . 1 V r m s の電圧が印加されればよい。

## 【 0 0 7 0 】

以上説明してきたように、本発明の一つの実施形態に係る顕微鏡装置は、ラジアル偏光をサンプル上に焦点を結ばせるので、z 偏光効果によりその焦点近傍におけるスポット径を回折限界により規定されるスポット径よりも小さくできる。そのため、この顕微鏡装置は、サンプルの表面に平行な方向について、回折限界により規定される分解能よりも高い分解能を有することができる。また、この顕微鏡装置は、サンプル近傍における焦点深度を大きくすることができるので、サンプルの深さ方向について所望の位置に焦点を合わせることが容易である。

さらに顕微鏡装置に組み込まれた偏光変換素子が、輪帯状に、ラジアル偏光を形成する各直線偏光の一部の位相を他の部分の位相に対して反転させることができるので、そのラジアル偏光を集光することにより、効率的に z 偏光効果を生じさせることができる。

## 【 0 0 7 1 】

さらに、顕微鏡装置に組み込まれた偏光変換素子は、液晶層によって入射した光の偏光面を制御するので、コントローラが液晶層に印加する電圧を調節することにより、光源が所定の波長域内の何れの波長を持つ直線偏光である照明光を出力する場合でも、偏光変換素子は照明光をラジアル偏光にできる。そのため、この顕微鏡装置は、所定の波長域内の何れの波長を持つ照明光を用いても、回折限界により規定される分解能よりも高い分解能を持つことができる。

## 【 0 0 7 2 】

なお、本発明は上記の実施形態に限られない。例えば、位相反転素子 2 の液晶層 2 0 について、第 2 の輪帯部分に含まれる液晶分子 2 7 を、光軸 O A に平行な方向に配向させてもよい。この場合において、液晶層 2 0 と液晶層 3 0 の厚さが同一であり、液晶層 2 0 に含まれる液晶分子の光学特性及び電気特性と、液晶層 3 0 に含まれる液晶分子の光学特性及び電気特性とが同一とすることができる。このように液晶分子 2 7 が配向された場合、所定の波長に対して液晶層 2 0、3 0 の所定の領域が半波長板となる電圧は同一となるので、コントローラ 1 1 1 は、同一の波形及び振幅を持つ駆動電圧を用いて、液晶層 2 0 及び液晶層 3 0 を駆動することができる。

## 【 0 0 7 3 】

また、液晶層 2 0 に印加する電圧を液晶層 3 0 に印加する電圧と同一とする場合には、

10

20

30

40

50



第1の輪帯部分では液晶分子27の長軸方向が、第2の輪帯部分では液晶分子27の短軸方向が、位相反転素子2に入射する直線偏光の偏光面と平行となるように、液晶分子27を配向してもよい。

【0074】

また他の変形例によれば、位相反転素子2の第1の輪帯部分を透過する光と第2の輪帯部分を透過する光の間に、透明電極による光路長差が生じないように、第2の輪帯部分についても、液晶層20の両側に透明電極が形成されてもよい。

【0075】

図9(A)及び図9(B)は、それぞれ、この変形例による、位相反転素子2の入射側に設けられた透明電極23の概略正面図である。なお、透明電極24は、上記の実施形態と同様に、液晶層20全体を覆うように基板全面に形成される。なお、透明電極24も、図9(A)または図9(B)に示された透明電極23の形状と同様の形状を有してもよく、あるいは、透明電極24が図9(A)または図9(B)に示された電極形状を有し、透明電極23が液晶層20全体を覆うように形成されてもよい。

10

【0076】

透明電極23は、光軸OAと位相反転素子2の交点 $c_0$ を中心とする、円状の電極23aと、同心円状の少なくとも一つの輪帯状の電極とを有する。この変形例では、透明電極23は、円状の電極23aの周囲に、5個の輪帯状電極23b~23fを有する。また、各電極間の隙間は小さい方が好ましい。なお、輪帯状電極23fの外周が、図2に示された領域2aの外周に対応する。

20

【0077】

図9(A)に示した例では、各輪帯電極は独立に制御可能なように、各輪帯電極から配線がそれぞれ引き出されており、その配線が駆動回路と接続されている。また図9(B)に示した例では、円状の電極23aから順に偶数番目の輪帯状電極同士、及び奇数番目の輪帯状電極同士がそれぞれ同一の配線で電氣的に接続され、偶数番目の輪帯状電極と接続された配線及び奇数番目の輪帯状電極と接続された配線がそれぞれ駆動回路と接続される。これにより、偶数番目の各輪帯状電極は同一の電位で駆動可能となっている。同様に、奇数番目の各輪帯状電極も同一の電位で駆動可能となっている。また図9(B)では、奇数番目の輪帯状電極群と偶数番目の輪帯状電極群のうち、一方の電極群は電氣的に制御されなくてもよい。この場合、他方の電極群と透明電極24との間に電圧を印加することで、その他方の電極群と透明電極24との間に挟まれた液晶層により、光の位相を反転可能である。なお、輪帯状電極も厚さがあるので、輪帯状電極を通った光の位相は、輪帯状電極を透過しない光の位相に対してずれる。そこで、図9(A)及び図9(B)に示されるように、電圧制御に利用される輪帯状電極だけでなく、電圧制御が不要な輪帯状電極も配置することで、位相反転素子2は、液晶層20に電圧が印加されない場合に位相反転素子2を透過する光束のほぼ全体を同位相にすることができる。

30

【0078】

さらに、電氣的に制御する必要がない偶数番目、あるいは奇数番目の輪帯状電極群の電位を、その輪帯状電極群と対向する側の透明基板に設けられた透明電極24と同一の基準電位、あるいは液晶層20内の液晶分子が動作しない電位の最大値である閾値電位に設定することが好ましい。閾値電位は、一般には実効電圧で約1V~2Vである。このように電氣的に制御する必要がない輪帯状電極群の電位を設定することで、位相反転素子2は、液晶層20の電位を一定に制御できるので、静電気等のノイズにより液晶層20の液晶が誤動作することを防止できる。また電氣的に制御する必要がない輪帯状電極群の電位を閾値電位とすることで、液晶層20の熱揺らぎも抑制できる。

40

【0079】

さらに、偏光変換素子104について、位相反転素子の位置と、偏光面回転素子の位置を入れ換えてもよい。

図10(A)は、位相反転素子の位置と偏光面回転素子の位置を入れ替えた、偏光変換素子104'の概略背面図である。図10(B)は、図10(A)に示された矢印Y、Y

50

で示された線における偏光変換素子 104' の概略側面断面図である。図 10(A) 及び図 10(B) において、この偏光変換素子 104' の各構成要素に対して、図 2 及び図 3 に示された第 1 の実施形態に係る偏光変換素子 104 の対応する構成要素と同様の参照番号を付した。

【0080】

この偏光変換素子 104' は、偏光面回転素子 3 と、光軸 OA に沿って偏光面回転素子 3 に隣接して配置され、ラジアル偏光に含まれる、光軸 OA を中心として放射状に分布した各直線偏光成分の一部の位相を反転する位相反転素子 2' とを有する。

このうち、偏光面回転素子 3 の構成は、上記の実施形態による偏光面回転素子 3 の構成と同様である。偏光変換素子 104' に入射する光は、直線偏光であり、偏光面回転素子 3 側から入射する。そしてその直線偏光は、偏光面回転素子 3 により、ラジアル偏光に変換された後、位相反転素子 2' へ入射する。位相反転素子 2' は、入射したラジアル偏光に含まれる各直線偏光成分の一部の位相を反転する。

【0081】

ここで、図 10(A) 及び図 10(B) に示されるように、位相反転素子 2' は、液晶層 20 と、光軸 OA に沿って液晶層 20 の両側に配置された透明基板 21、22 を有する。そして液晶層 20 に含まれる液晶分子 27 は、透明基板 21 及び 22 と、シール部材 28 との間に封入されている。また位相反転素子 2' は、透明基板 21 と液晶層 20 の間に配置された透明電極 23 と、液晶層 20 と透明基板 22 の間に配置された透明電極 24 とを有する。さらに、透明電極 23 と液晶層 20 の間に配向膜 25 が配置される。また透明電極 24 と液晶層 20 の間に配向膜 26 が配置される。これら配向膜 25、26 は、液晶分子 27 を所定の方向に配向させる。

さらに、各基板、各透明電極及び各配向膜の外周には鏡枠 29 が配置され、この鏡枠 29 が、各基板を保持している。

【0082】

図 10(A) に、液晶層 20 に封入された液晶分子の配向方向を示す。液晶層 20 に封入された液晶分子は、例えば、ホモジニアス配向される。また、液晶層 20 は、光軸 OA と液晶層 20 との交点  $c_0$  を中心として、円周方向に配置される複数の扇形領域  $20a \sim 20h$  を有する。

矢印は  $21a \sim 21h$  は、各扇形領域に含まれる液晶分子の配向方向を示す。矢印  $21a \sim 21h$  に示されるように、各扇形領域  $20a \sim 20h$  に封入された液晶分子は、その長軸方向が、交点  $c_0$  を中心とした放射方向を向くように配向される。そのため、偏光面回転素子 3 から出射した光の偏光面は、各扇形領域  $20a \sim 20h$  を透過しても回転しない。

【0083】

各扇形領域  $20a \sim 20h$  は、それぞれ、図 5 に示される、偏光面回転素子 3 の液晶層 30 の各扇形領域  $30a \sim 30h$  と光軸 OA 方向に投影した位置が等しくなるように設定されることが好ましい。この場合、扇形領域  $30a$  を透過し、交点  $c_1$  に対して放射状の偏光成分を持つ直線偏光は、扇形領域  $20a$  を透過する。同様に、扇形領域  $30b \sim 30h$  を透過した直線偏光は、それぞれ、扇形領域  $20b \sim 20h$  を透過する。

【0084】

また、透明電極 23 は、交点  $c_0$  を中心とした同心円状に配置された少なくとも 1 本の輪帯状の電極を有する。例えば、透明電極 23 は、図 4、図 9(A) または図 9(B) に示された透明電極と同様の構造を有する。一方、透明電極 24 は、液晶層 20 全体を覆うように配置される。そして透明電極に挟まれた第 1 の輪帯部分  $20a$  を透過する光の位相が、透明電極に挟まれていない第 2 の輪帯部分  $20b$  を透過する光の位相と だけずれるように、透明電極 23、24 間に所定の電圧が印加される。

【0085】

これにより、位相反転素子 2' を透過したラジアル偏光において、そのラジアル偏光に含まれる各直線偏光成分のうち、第 1 の輪帯部分を透過した成分の位相が第 2 の輪帯部分

10

20

30

40

50

を透過した成分の位相に対して反転する。したがって、この偏光変換素子も、入射した直線偏光を、図6に示されるような偏光面の分布と位相分布を持つラジアル偏光に変換できる。

【0086】

また、偏光変換素子104'では、位相反転素子2'の液晶分子が、光軸と位相反転素子2'の交点を中心とした放射状に配向されているので、偏光変換素子に入射する直線偏光の偏光面と位相反転素子2'の液晶分子の配向方向を合わせる必要がない。また、入射する直線偏光の偏光面と、偏光面回転素子3の基準となる扇形領域(例えば、図5における領域30a)の中心線とがずれていても、偏光面回転素子3は入射する直線偏光をラジアル偏光に変換できる。そのため、この偏光変換素子は、光学系への組み込みの際のアライメント調節を簡単化できる。

10

【0087】

なお、液晶層20に印加する電圧を液晶層30に印加する電圧と同一とする場合には、第1の輪帯部分では液晶分子27の長軸方向が交点 $c_0$ を中心とした放射方向を向くように、かつ、第2の輪帯部分では液晶分子27の長軸方向が交点 $c_0$ を中心とする円周方向を向くように、液晶分子27を配向してもよい。

【0088】

また、上記の実施形態による顕微鏡装置において、コントローラ111は、サンプル120の深さ方向、すなわち、光軸OAに沿った方向の解像度を高くするために、偏光変換素子104または104'の各液晶層20及び30に印加する駆動電圧を、偏光変換素子104または104'が入射する直線偏光をラジアル偏光に変換しない電圧としてもよい。例えば、コントローラ111は、サンプル120の深さ方向の解像度を高くする場合、液晶層20の各領域において常光線に対する光路長と異常光線に対する光路長の差が、光源101から出力される光の波長の整数倍となるように、液晶層20に印加する駆動電圧を調節する。また、コントローラ111は、液晶層30の第1の輪帯部分を透過する光の光路長と第2の輪帯部分を透過する光の光路長との差が光源101から出力される光の波長の整数倍となるように、液晶層30に印加する駆動電圧を調節する。この場合、サンプル120の表面に平行な方向、すなわち、光軸OAに直交する方向の解像度は、回折限界により規定される解像度となる。

20

【0089】

一方、サンプル120の表面に平行な方向、すなわち、光軸OAに直交する方向の解像度を回折限界により規定される解像度よりも高くする場合には、上記のように、コントローラ111は、偏光変換素子104または104'が入射した直線偏光をラジアル偏光に変換できるように偏光変換素子104または104'の各液晶層20及び30に駆動電圧を印加する。ただしこの場合には、直線偏光がサンプル120の物体面に集光されるときよりも、サンプル120の物体面に集光される光のスポット径が小さい範囲が深さ方向に長くなる。そのため、ラジアル偏光がサンプル120の物体面に集光されるときに深さ方向の解像度は、直線偏光がサンプル120の物体面に集光されるときに深さ方向の解像度よりも低下する。

30

【0090】

このように、上記の実施形態による顕微鏡装置は、偏光変換素子の各液晶層に印加する駆動電圧を調節することで、ラジアル偏光をサンプルへ集光させてサンプルの表面に平行な方向の解像度を向上させるか、あるいは非ラジアル偏光をサンプルへ集光させて深さ方向の解像度を向上させることができる。

40

さらに、この顕微鏡装置は、上記のようなサンプルへ集光させる光を切り替えるために、各液晶層に対する駆動電圧を変更するだけなので、例えば、フォトニック結晶のような偏光面の回転量を調節できない素子を用いて作成された偏光変換素子が用いられる場合と異なり、機械的に顕微鏡装置の一部または全てを移動させる必要がない。そのため、この顕微鏡装置は、その光の切り替えの際に焦点位置がずれることを防止できる。

【0091】

50

また、顕微鏡装置が有する光学系は共焦点光学系でなくてもよい。この場合、上記の実施形態による顕微鏡装置からマスク板が省略され、受光素子が集光レンズの焦点面に配置される。

あるいは、他の実施形態によれば、顕微鏡装置は、照明光学系と別個に観測光学系を有していてもよい。この場合には、例えば、照明光学系はサンプルの一方の面側に配置され、光源と、コリメートレンズと、偏光変換素子と、対物レンズとを有する。そして上記の実施形態と同様に、光源から出力された、直線偏光である照明光は、コリメートレンズによって平行光とされた後、偏光変換素子を通してラジアル偏光に変換される。そしてラジアル偏光となった照明光が対物レンズによって対物レンズの焦点近傍に配置されたサンプルの表面または内部に設定された物体面上に集光される。なお、この場合も、偏光変換素子は、対物レンズの入射瞳面に配置される。これにより、照明光学系は、対物レンズの焦点面近傍において $z$ 偏光効果を生じさせることができるので、照明光は、物体面上に回折限界により規定されるスポット径よりも小さなスポット径を持つように集光される。

一方、観測光学系は、サンプルの他方の面側に配置され、対物レンズと集光レンズとを有する。そして観測光学系は、照明光学系によって照明されたサンプルの像を受光素子に集光する。

#### 【0092】

さらに、顕微鏡装置に組み込まれる対物レンズは交換可能なものであってもよい。この場合、対物レンズによって瞳径が異なることがある。そこで、異なる瞳径の対物レンズが用いられても同様の超解像効果が得られるように、偏光変換素子の位相反転素子は、対物レンズの瞳径によらず、位相反転素子を透過した光束に光軸を中心とする同心円状の所定数の輪帯状部分を形成させ、隣接する輪帯状部分同士で位相を反転させることが好ましい。なお、所定数は2以上の整数であり、例えば3以上8以下の整数である。

なお、上記の実施形態による偏光面回転素子は、その構造上、瞳径の異なる様々な対物レンズにもそのまま適用可能である。

#### 【0093】

図11(A)は、このような課題を解決する変形例による位相反転素子の光の入射側の透明電極23'の構造を示す概略正面図であり、図11(B)は、変形例による位相反転素子の光の出射側の透明電極24'の構造を示す概略背面図である。なお、図11(A)及び図11(B)において、透明電極23'のサイズと透明電極24'のサイズが異なることを理解し易くするために、位相反転素子の液晶層内のシール部材の内側境界281が示される。透明電極以外の位相反転素子の構造は、上記の実施形態の何れかによる位相反転素子の構造と同様とすることができる。そのため、ここでは、透明電極についてのみ説明する。

#### 【0094】

この変形例では、透明電極23'は、光軸OAと位相反転素子の交点 $c_0$ を中心とする、同心円状の7本の輪帯状の電極231a~231gを有する。そして各輪帯電極により、交点 $c_0$ を中心とする半径 $r_1$ (すなわち、交点 $c_0$ から透明電極23'の最外周の輪帯電極231gの外縁までの距離)の円形領域のほぼ全体が覆われている。この半径 $r_1$ は、例えば、相対的に大きな瞳径を持つ対物レンズが使用された場合に位相反転素子を透過する光束の半径と略等しくなるように設定される。

#### 【0095】

同様に、透明電極24'も、交点 $c_0$ を中心とする、同心円状の7本の輪帯状の電極241a~241gを有する。また各輪帯電極により、交点 $c_0$ を中心とする半径 $r_2$ (すなわち、交点 $c_0$ から透明電極24'の最外周の輪帯電極241gの外縁までの距離)の円形領域のほぼ全体が覆われている。この半径 $r_2$ は、例えば、相対的に小さな瞳径を持つ対物レンズが使用された場合に位相反転素子を透過する光束の半径と略等しくなるように設定される。すなわち、半径 $r_2$ は、半径 $r_1$ よりも小さな値に設定される。

なお、透明電極23'、24'の何れについても、隣接する二つの輪帯電極同士は、それら輪帯電極の幅よりも狭い間隔を空けて配置され、互いに絶縁されている。

## 【 0 0 9 6 】

瞳径が相対的に大きい対物レンズが使用される場合、透明電極 2 4 ' が有する全ての輪帯電極に等電位となるよう通電され、一方、透明電極 2 3 ' については、輪帯電極 1 本おきに通電される。例えば、輪帯電極 2 3 1 a、2 3 1 c、2 3 1 e 及び 2 3 1 g に通電され、輪帯電極 2 3 1 b、2 3 1 d 及び 2 3 1 f には通電されない。透明電極 2 3 ' のうちの通電された輪帯電極と透明電極 2 4 ' 間の電圧を適切に調節することにより、その電極間に挟まれた液晶層を透過する光線の位相は、透明電極 2 3 ' 中の通電されていない輪帯電極と透明電極 2 4 ' との間に挟まれた液晶層を透過する光線の位相に対して だけずれる。

## 【 0 0 9 7 】

また、瞳径が相対的に小さい対物レンズが使用される場合、透明電極 2 3 ' が有する全ての輪帯電極に等電位となるよう通電され、一方、透明電極 2 4 ' については、輪帯電極 1 本おきに通電される。例えば、輪帯電極 2 4 1 a、2 4 1 c、2 4 1 e 及び 2 4 1 g に通電され、輪帯電極 2 4 1 b、2 4 1 d 及び 2 4 1 f には通電されない。透明電極 2 4 ' のうちの通電された輪帯電極と透明電極 2 3 ' 間の電圧を適切に調節することにより、その電極間に挟まれた液晶層を透過する光線の位相は、透明電極 2 4 ' 中の通電されていない輪帯電極と透明電極 2 3 ' との間に挟まれた液晶層を透過する光線の位相に対して だけずれる。

## 【 0 0 9 8 】

ここで、透明電極 2 3 ' が有する輪帯電極の数と透明電極 2 4 ' が有する輪帯電極の数は等しく、両透明電極の半径は異なる。そのため、この変形例による位相反転素子は、瞳径の異なる二つの対物レンズの何れが使用される場合にも、光束中に、隣接する部分同士で位相が反転している、光軸を中心とする同心円状の輪帯状部分を同数だけ形成させることができる。

## 【 0 0 9 9 】

なお、各透明電極が有する輪帯電極の数は、互いに異なっていてもよい。例えば、透明電極 2 4 ' は、透明電極 2 3 ' の半径と透明電極 2 4 ' の半径が等しくなるように、輪帯電極 2 4 1 g の外側にさらに 1 本以上の輪帯電極を有してもよい。

## 【 0 1 0 0 】

位相反転素子のさらに他の変形例によれば、位相反転素子の液晶層の一方に設けられる透明電極は、図 3 ( A ) に示された透明電極 2 4 のように、液晶層全体を覆うように配置され、液晶層の他方に設けられる透明電極は、図 1 1 ( A ) に示された透明電極 2 3 ' のように、液晶層のほぼ全体を覆うように設けられた同心円状の複数の輪帯電極を有してもよい。ただしこの変形例では、各輪帯電極の幅は、透明電極 2 3 ' の輪帯電極の幅よりも狭く、例えば、透明電極 2 3 ' の輪帯電極の幅の略 1 / 1 0 ~ 略 1 / 2 に設定されることが好ましい。この場合、隣接する複数の輪帯電極を一つの組として、光軸との交点を中心とした放射方向に沿って、交互に通電する輪帯電極の組と通電しない輪帯電極の組が配置される。これにより、光束中に、隣接する部分同士で位相が反転している輪帯状部分が形成される。そして対物レンズの瞳径に応じて通電される輪帯電極の組を適切に選択することで、その瞳径によらず、所定数の輪帯状部分が形成される。

## 【 0 1 0 1 】

なお、上述した偏光変換素子は、顕微鏡に限らず、様々な光照射装置に組み込んで利用することができる。例えば、偏光変換素子は、光照射装置の一例である光ピックアップ装置に組み込むことができる。

図 1 2 は、偏光変換素子を有する光ピックアップ装置の概略構成図である。図 1 2 に示されるように、光ピックアップ装置 2 0 0 は、光源 2 0 1 と、コリメートレンズ 2 0 2 と、ビームスプリッタ 2 0 3 と、対物レンズ 2 0 4 と、結像レンズ 2 0 5 と、受光素子 2 0 6 と、偏光変換素子 2 0 7 と、コントローラ 2 0 8 と、アクチュエータ 2 0 9 とを有する。

## 【 0 1 0 2 】

10

20

30

40

50

光源 201、コリメートレンズ 202、偏光変換素子 207、ビームスプリッタ 203 及び対物レンズ 204 は、光軸 OA に沿って一列に配置される。そしてコリメートレンズ 202、偏光変換素子 207、ビームスプリッタ 203 及び対物レンズ 204 は、光源 201 から放射された光を記録媒体 210 上に焦点を結ばせる。一方、結像レンズ 205 及び受光素子 206 は、ビームスプリッタ 203 の側面において光軸 OA と直交する方向に配置される。そして、記録媒体 210 により反射または散乱された光は、対物レンズ 204 を通った後、ビームスプリッタ 203 により反射され、結像レンズ 205 によって受光素子 206 上に結像される。なお、理解を容易にするために図示していないが、光ピックアップ装置 200 は、光路上に、球面収差用補償光学系など、各種の補償光学系を有していてもよい。

10

#### 【0103】

光源 201 は、例えば半導体レーザを有し、直線偏光を出力する。

コリメートレンズ 202 は、その前側焦点に光源 201 が位置するように配置され、光源 201 から出力された直線偏光を平行光にする。

偏光変換素子 207 は、上記の実施形態またはその変形例の何れかによる偏光変換素子であり、対物レンズ 204 の前側瞳面に配置される。本実施形態では、偏光変換素子 207 は、コリメートレンズ 202 とビームスプリッタ 203 の間に配置される。そして偏光変換素子 207 は、コリメートレンズ 202 を透過した後に偏光変換素子 207 に入射した直線偏光をラジアル偏光に変換する。偏光変換素子 207 は、例えば、直線偏光をラジアル偏光に変換する偏光面回転素子が有する液晶層の各領域のうち、直線偏光の偏光面を回転させない領域（例えば、図 5 に示した扇形領域 30a）に含まれる液晶分子の配向方向が、偏光変換素子 207 に入射する直線偏光の偏光面と略一致し、他の領域の液晶分子の配向方向と入射する直線偏光の偏光面との間の角が、偏光面を回転させる角度の  $1/2$  となるように配置されることが好ましい。

20

#### 【0104】

対物レンズ 204 は、偏光変換素子 207 から出射したラジアル偏光に、記録媒体 210 上に焦点を結ばせる。この場合、焦点近傍では、対物レンズ 204 により集光された光は z 偏光となる。そのため、焦点近傍における光のスポット径は、回折限界により規定されるスポット径よりも小さくすることができる。例えば、本実施形態によるスポット径は、回折限界により規定されるスポット径の約  $1.5 \sim 1.7$  分の 1 となる。また、この光ピックアップ装置 200 は、集光された光の焦点深度も大きくすることができる。

30

さらに、対物レンズ 204 には、トラッキング用のアクチュエータ 209 が取付けられている。アクチュエータ 209 が、図中の矢印 Z の方向に対物レンズ 204 を移動させることによって、対物レンズ 204 によって集光される光ビームが、記録媒体 210 のトラックに正確に追従する。またアクチュエータ 209 は、コントローラ 208 と接続され、コントローラ 208 からの制御信号に応じて対物レンズ 204 を移動させる。

#### 【0105】

記録媒体 210 により反射または散乱された光は、記録媒体 210 のトラック面上に記録されている情報（ピット）によって振幅変調されている。この光は、再度対物レンズ 204 を透過して平行光となる。そしてその光は、ビームスプリッタ 203 により反射され、結像レンズ 205 に入射する。そして結像レンズ 205 は、入射した光を受光素子 206 上に結像する。

40

#### 【0106】

受光素子 206 は、例えば、アレイ状に配列された複数の CCD または C-MOS などの半導体受光素子を有する。そして各半導体受光素子は、受光した光の強度に応じた電気信号を出力する。そして受光素子 206 は、各半導体受光素子が出力した電気信号を平均し、その平均値に相当する電気信号を、受光した光の強度を表す光強度信号としてコントローラ 208 へ伝達する。

#### 【0107】

コントローラ 208 は、受光素子 206 から受信した光強度信号から記録情報を読み出

50

す。またコントローラ208は、偏光変換素子207及びアクチュエータ209を制御する。そのために、コントローラ208は、偏光変換素子207が有する駆動回路と接続される。またコントローラ208は、受光素子206と接続され、受光素子206から光強度信号を受信する。そしてコントローラ208は、偏光変換素子207が光源201から出力された直線偏光をラジアル偏光に変換できるように、偏光変換素子207の各液晶層に印加する電圧を調節する。具体的には、コントローラ208は、偏光変換素子207が有する駆動回路へ出力する電圧調整信号を変えることにより、偏光変換素子207の各液晶層に印加する電圧を調節しながら、光強度信号を取得し、電圧値と光強度信号値を対応付けて内蔵するメモリに記憶する。そして、コントローラ208は、メモリに記憶した光強度信号及び電圧値から、光強度信号が最大値となる電圧値を決定し、その電圧に応じた電圧調整信号を偏光変換素子207の駆動回路へ送信する。そして偏光変換素子207の駆動回路は、コントローラ208から受信した電圧調整信号に応じた駆動電圧を、各液晶層に印加する。

10

#### 【0108】

以上説明してきたように、偏光変換素子を用いた光ピックアップ装置は、ラジアル偏光に記録媒体上に焦点を結ばせるので、 $z$ 偏光効果によりその焦点近傍におけるスポット径を回折限界により規定されるスポット径よりも小さくできる。そのため、この光ピックアップ装置は、回折限界により規定される分解能よりも高い分解能を有することができる。したがって、この光ピックアップ装置は、回折限界により規定される分解能で決められた記録密度よりも高い記録密度を持つ記録媒体に記録された情報を読み取ることができる。また、この光ピックアップ装置は、記録媒体近傍における焦点深度を大きくすることができるので、記録媒体と光ピックアップ装置間の距離変動による読取エラーの発生を抑制することができる。

20

#### 【0109】

ピックアップ装置は、互いに波長が異なる光を出力する複数の光源を有してもよい。例えば、光ピックアップ装置200は、光源201とは別個に第2の光源(図示せず)と、各光源から出力された光を偏光変換素子207へ向ける第2のビームスプリッタ(図示せず)をさらに有していてもよい。この場合、光源201から出力された光が記録媒体210に集光されるだけでなく、第2の光源から出力された光も、第2のビームスプリッタによって反射された後、ビームスプリッタ203、偏光変換素子207及び対物レンズ204を介して記録媒体210に集光されるように、例えば、コリメートレンズ202とビームスプリッタ203の間に第2のビームスプリッタが配置され、その第2のビームスプリッタの側方に、第2の光源が配置される。

30

#### 【0110】

コントローラ208は、光源または第2の光源の何れか一方に出力させるとともに、図8で説明したように、光を出力中の光源に応じた電圧調整信号を偏光変換素子207の駆動回路へ送信することにより、偏光変換素子207がその光源からの光をラジアル偏光に変換することを可能にする。これにより、光ピックアップ装置は、複数の光源の何れから出力された光も、回折限界により規定されるスポット径よりも小さいスポット径を持つように記録媒体210上に集光できる。

40

また、偏光変換素子207は、記録媒体210で反射または散乱された光も透過するように、ビームスプリッタ203と対物レンズ204との間に配置されてもよい。

#### 【0111】

なお、偏光変換素子を用いた光照射装置は、レーザメス、レーザ加工機といった光を用いて対象物を加工する光加工装置であってもよい。この場合、偏光変換素子は、上記の光ピックアップ装置と同様に、直線偏光を出力する光源と、光を集光する対物レンズの間、特に、対物レンズの光源側の瞳面に配置される。これにより、対物レンズの焦点近傍において、集光された光は $z$ 偏光となる。そのため、偏光変換素子を用いた光加工装置は、加工可能な最小サイズを回折限界よりも小さくすることができる。

さらに、偏光変換素子を用いた光照射装置は、干渉計といった、光を用いての形状を測

50

定する装置であってもよい。この場合も、偏光変換素子は、直線偏光を出力する光源と、光を集光する対物レンズの間、特に、対物レンズの光源側の瞳面に配置される。

【0112】

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。

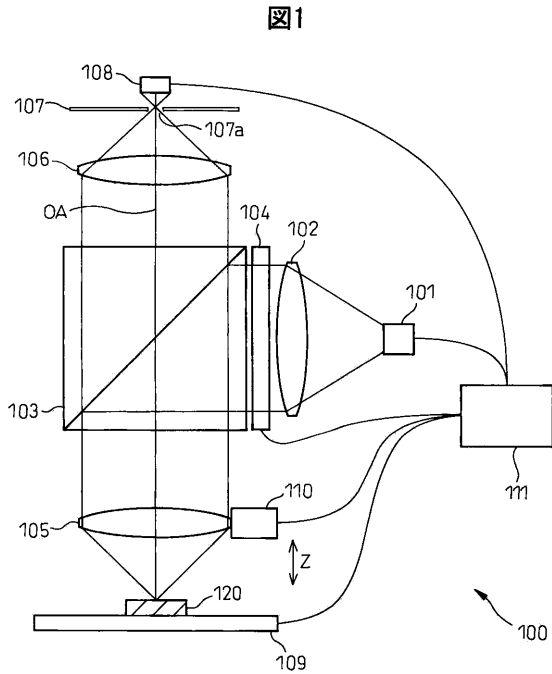
【符号の説明】

【0113】

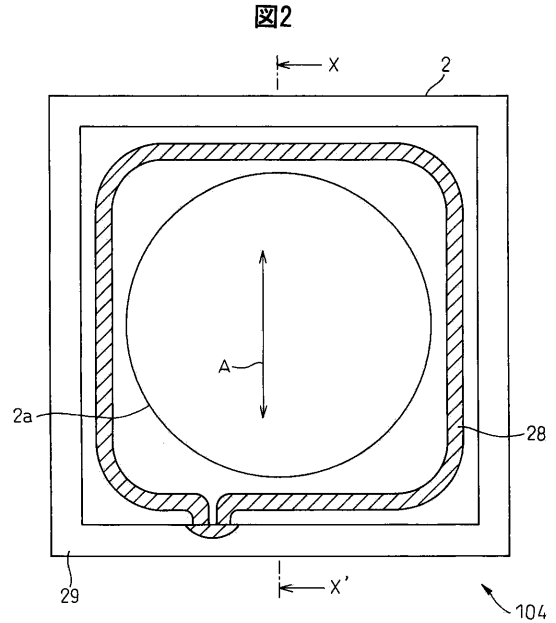
100	顕微鏡装置	
101	光源	
102	コリメートレンズ	10
103	ビームスプリッタ	
104、104'	偏光変換素子	
105	対物レンズ	
106	集光レンズ	
107	マスク板	
108	受光素子	
109	可動ステージ	
110	アクチュエータ	
111	コントローラ	
2、2'	位相反転素子	20
3	偏光面回転素子	
20、30	液晶層	
20a~20h、30a~30n	扇形領域	
21、22、31、32	透明基板	
23、24、33、34、23'、24'	透明電極	
25、26、35、36	配向膜	
27、37	液晶分子	
28、38	シール材	
29、39	鏡枠	
200	光ピックアップ装置	30
201	光源	
202	コリメートレンズ	
203	ビームスプリッタ	
204	対物レンズ	
205	結像レンズ	
206	受光素子	
207	偏光変換素子	
208	コントローラ	
209	アクチュエータ	
210	記録媒体	40



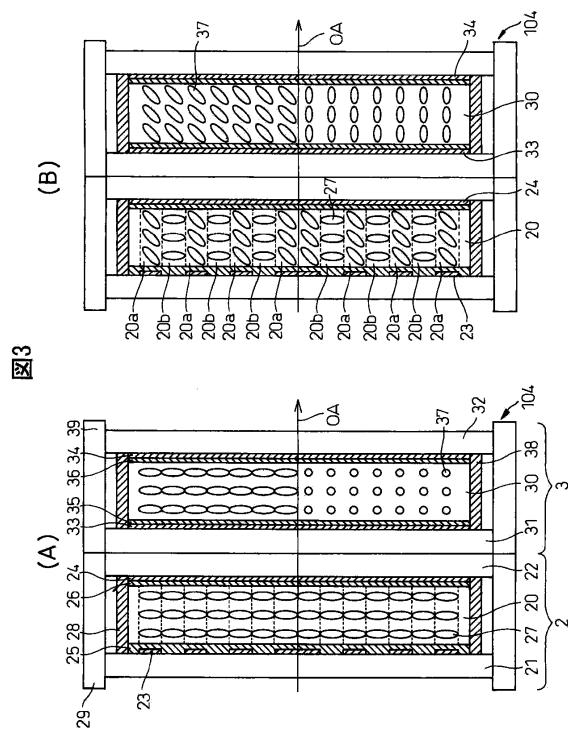
【 図 1 】



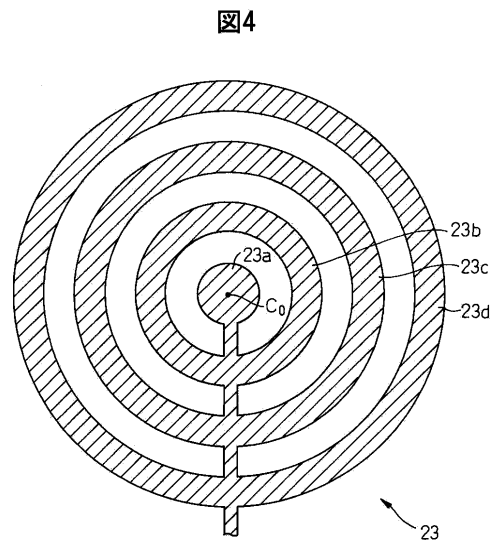
【 図 2 】



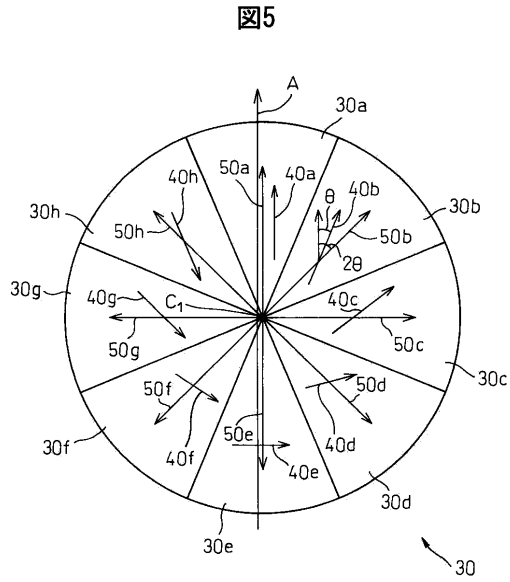
【 図 3 】



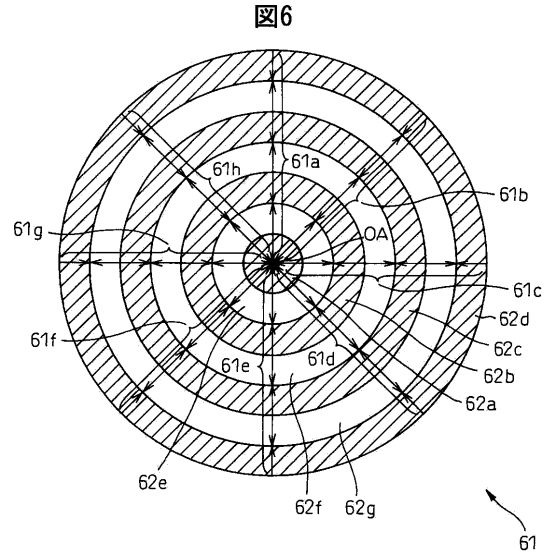
【 図 4 】



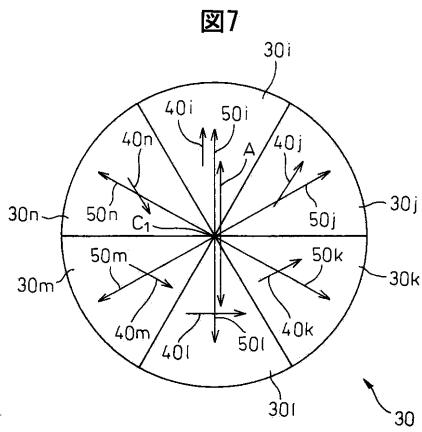
【 図 5 】



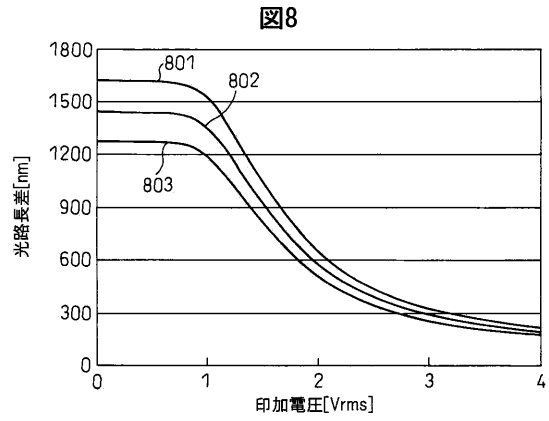
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】

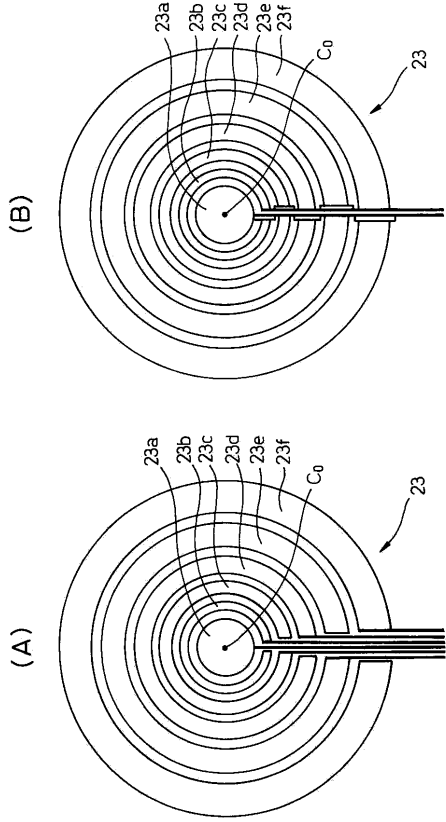


図9

【 図 1 1 】

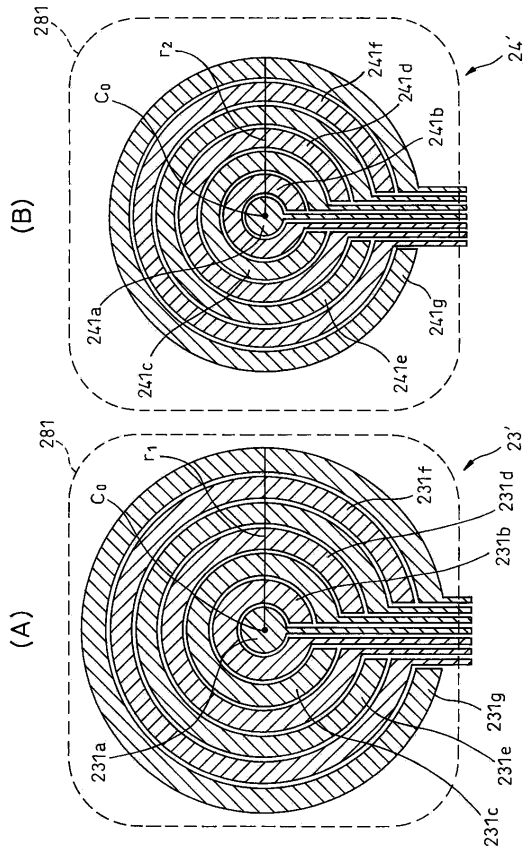


図11

【 図 1 0 】

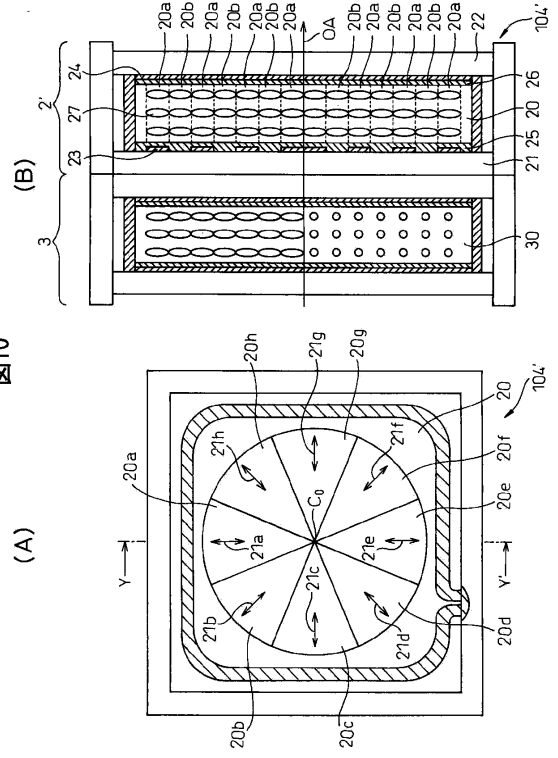


図10

【 図 1 2 】

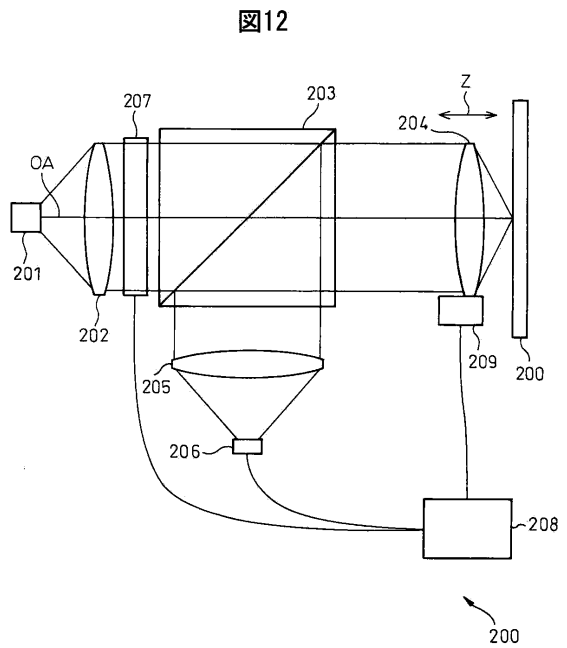


図12

## フロントページの続き

- (72)発明者 佐藤 俊一  
宮城県仙台市青葉区赤坂 2 - 1 4 - 1 5
- (72)発明者 小澤 祐市  
宮城県仙台市太白区西の平 1 - 2 3 - 1 2 - B - 3 0 2
- (72)発明者 横山 弘之  
宮城県仙台市青葉区川内元支倉 3 5 - 1 - 2 0 6
- (72)発明者 根本 知己  
北海道札幌市北区北七条西 9 丁目 1 5 中央第二宿舍 5 号棟 3 0 8 号室
- (72)発明者 日比 輝正  
北海道札幌市北区北 2 1 条西 7 丁目 2 番地 2 8 - 3 0 3 号
- (72)発明者 橋本 信幸  
東京都西東京市田無町六丁目 1 番 1 2 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 6 6 6 3 番地の 2 シチズンセイミツ株式会社内

審査官 森内 正明

- (56)参考文献 特開 2 0 1 0 - 1 9 6 3 0 ( J P , A )  
特開 2 0 0 7 - 1 9 3 0 2 5 ( J P , A )  
特表 2 0 0 9 - 5 4 1 7 4 2 ( J P , A )

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 0 2 B	2 1 / 0 0	-	2 1 / 3 6
G 0 2 F	1 / 1 3	-	1 / 1 4 1
G 1 1 B	7 / 1 2	-	7 / 2 2