(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2014 年 6 月 5 日(05.06.2014)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2014/084007 A1

(51) 国際特許分類:
*G02B 21/06* (2006.01) *G02F 1/1335* (2006.01)
*G02B 5/18* (2006.01) *G02F 1/13363* (2006.01)
*G02B 5/30* (2006.01) *G02F 1/1347* (2006.01)
*G02F 1/13* (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2013/079919

(22) 国際出願日: 2013 年 11 月 5 日(05.11.2013)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2012-261599 2012 年 11 月 29 日(29.11.2012) JP

(71) 出願人: シチズンホールディングス株式会社 (CITIZEN HOLDINGS CO., LTD.) [JP/JP]; 〒1888511 東京都西東京市田無町六丁目１番１２号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 松本　健志 (MATSUMOTO, Kenji); 〒1888511 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 Tokyo (JP). 橋本　信幸 (HASHIMOTO, Nobuyuki); 〒1888511 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 Tokyo (JP). 栗原　誠 (KURIHARA, Makoto); 〒4010395 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 Yamanashi (JP). 横山　正史 (YOKOYAMA, Masafumi); 〒1888511 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 Tokyo (JP). 田辺　綾乃 (TANABE, Ayano); 〒1888511 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 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 青木　篤, 外 (AOKI, Atsushi et al.); 〒1058423 東京都港区虎ノ門三丁目５番１号　虎ノ門３７森ビル青和特許法律事務所 Tokyo (JP).

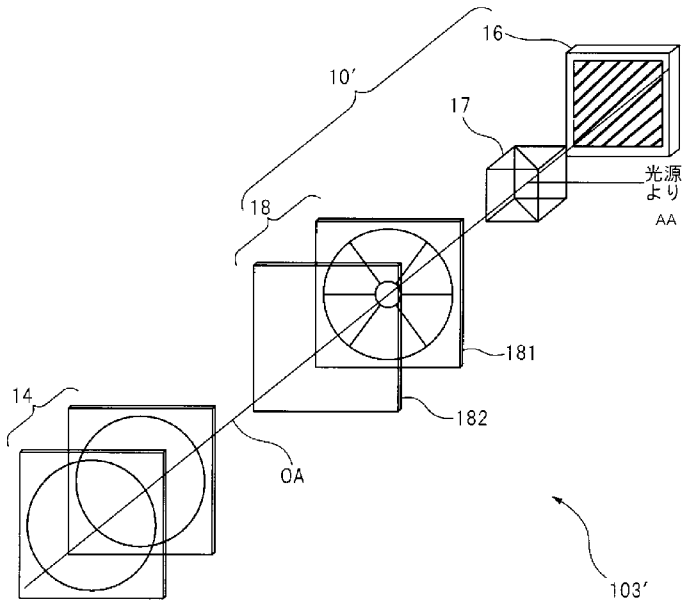
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES,

[続葉有]

(54) **Title**: LIGHT MODULATION ELEMENT

(54) 発明の名称 : 光変調素子

図9




AA From light source

(57) **Abstract**: A light modulation element (103) comprises: a select diffraction element (10, 10') which causes illumination light, which is linear polarized light having a polarized light plane along a first polarized light direction, to be diffracted along one of any of a plurality of directions to generate diffracted light of a plurality of orders, and causes phase differences to arise between the diffracted light of the plurality of orders; and a polarized light plane rotation element (14) which rotates the polarized light plane of each order of the diffracted light in a direction which is orthogonal to a radiation direction from an optical axis.

(57) 要約: 光変調素子１０３は、第１の偏光方向に沿った偏光面を持つ直線偏光である照明光を、複数の方向のうちの何れか一つの方向に沿って回折させて複数の次数の回折光を生成し、前記複数の次数の回折光間に位相差を生じさせる選択回折素子（１０、１０'）と、各次数の回折光の偏光面を光軸からの放射方向に対して直交する方向に回転させる偏光面回転素子１４とを有する。

WO 2014/084007 A1

FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

# 明　細　書

## 発明の名称 ： 光変調素子

## 技術分野

[0001] 本発明は、構造化照明光を対象物に投影する照明装置において使用される光変調素子に関する。

## 背景技術

[0002] 近年、構造化照明光としての干渉縞を試料に投影し、その干渉縞と試料の構造により生じるモアレ縞を撮影した画像を解析することによって、対物レンズの解像限界よりも高い解像度で試料の構造を解析可能とする顕微鏡装置が開発されている（例えば、特許文献１及び２、及び非特許文献１を参照）。

[0003] 係る先行技術では、顕微鏡装置は、光源からの光を、互いに異なる３方向に回折させ、そのうちの１方向の＋１次の回折光と－１次の回折光とをシャッタにより選択して、それぞれＳ偏光にした上で試料上で干渉させることにより、試料上に干渉縞を生じさせる。また、モアレ縞の画像を解析して、対物レンズの解像限界よりも高い解像度を持つ試料の超解像画像を得るために、試料上で、＋１次の回折光と－１次の回折光間の位相差を変えつつ、複数回の撮影が行われる。

## 先行技術文献

## 特許文献

[0004] 特許文献1：特開２００６－２６８００４号公報

特許文献2：国際公開第２００９－０３１４１８号公報

## 非特許文献

[0005] 非特許文献1：大内、「構造化照明を利用した超解像顕微鏡N-SIM」、O PLUS E、アドコム・メディア、2012年、第34巻、第9号、p.827-833

## 発明の概要

## 発明が解決しようとする課題

[0006] 上記の顕微鏡装置では、＋１次の回折光とー１次の回折光との間の位相差を調節するために、例えば、光束が透過する領域によってその光束に対する光路長が異なるように構成された円板状の位相板が用いられる。そしてこの位相板を光軸を中心として回転させることにより、上記の３方向の１次回折光の組のうちの何れかに対して所定の位相差が付与される。あるいは、＋１次の回折光及びー１次の回折光を反射して、試料の方へ向けるミラーの傾きを調節することによって＋１次の回折光とー１次の回折光との間の位相差が調節される。

[0007] このように、上記の顕微鏡では、＋１次の回折光とー１次の回折光との間の位相差を調節するために、機械的に作動する機構が採用されている。そして＋１次の回折光とー１次の回折光との間の位相差を所定量に設定するためには、その機構の動作を精密に制御する必要がある。同様に、特定方向に沿って回折された回折光を選択するためのシャッターの制御、及び、試料に入射する回折光の偏光方向を調節するためにも、機械的に作動する機構が用いられる。このような機械的に作動する機構では、その機構を動作させてから安定的に静止するまでに時間がかかる。上記のように、超解像画像を生成するために、回折光間の位相差または回折光の方向を変えて複数回の撮影が必要となるために、機械的な作動機構の動作に要する時間の長さが、超解像画像の生成に要する時間が長くなる原因となっている。

[0008] そこで、本発明は、機械的に作動する部品を利用せずに、構造化照明光の位相及び偏光方向を調節可能な光変調素子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

[0009] 本発明の一つの側面によれば、光変調素子が提供される。この光変調素子は、第１の偏光方向に沿った偏光面を持つ直線偏光である照明光を、複数の方向のうちの何れか一つの方向に沿って回折させて複数の次数の回折光を生成し、複数の次数の回折光間に位相差を生じさせる選択回折素子と、複数の次数の回折光の偏光面を光軸からの放射方向に対して直交する方向に回転させる偏光面回転素子とを有する。

[0010] この光変調素子において、選択回折素子は、照明光が入射する液晶層を含み、その液晶層により複数の次数の回折光間に位相差を生じさせることが好ましい。

[0011] この光変調素子において、選択回折素子は、複数の方向のうちの選択された一つの方向に照明光を回折させ、かつ、複数の次数の回折光間に位相差を生じさせる回折格子を表示させる空間光変調素子を有することが好ましい。

[0012] またこの光変調素子において、選択回折素子は、光が透過する領域が複数の方向のそれぞれについての複数の次数の回折光のそれぞれが透過する複数の部分領域に分割され、複数の部分領域のうち、選択された一つの方向に沿って回折された複数の次数の回折光のそれぞれが透過する部分領域以外の部分領域を透過する光を減衰させるシャッター素子をさらに有することが好ましい。

[0013] あるいは、この光変調素子において、選択回折素子は、照明光を複数の方向のそれぞれに沿って回折させる回折素子と、複数の方向のうちの一つの方向に沿って回折された複数の次数の回折光を透過させるシャッター素子と、シャッター素子を透過した複数の次数の回折光間に位相差を生じさせる、少なくとも一つの第１の液晶素子を有する位相変調素子とを有することが好ましい。

[0014] この光変調素子において、位相変調素子が有する少なくとも一つの第１の液晶素子は、シャッター素子を透過した複数の次数の回折光のそれぞれの偏光方向と平行に配向された液晶分子が封入された第１の液晶層を有し、複数の次数の回折光のうちの第１の次数の回折光が通る第１の液晶層の第１の部分領域に印加される第１の電圧と、複数の次数の回折光のうちの第２の次数の回折光が通る第１の液晶層の第２の部分領域に印加される第２の電圧との差に応じた位相差を、第１の次数の回折光と第２の次数の回折光との間に生じさせる。

[0015] さらに、位相変調素子は、光軸に沿って配置された二つの第１の液晶素子を有し、二つの第１の液晶素子の第１の液晶層のそれぞれの厚さは、第１の

液晶層において第１の次数の回折光と第２の次数の回折光との間に生じさせる光路長の差の最大値が照明光の波長未満となる厚さであることが好ましい。

[0016] またこの光変調素子において、シャッター素子は、第１の偏光方向と第２の偏光方向のなす角を２等分する方向に配向された液晶分子が封入された第２の液晶層を有する第２の液晶素子と、光軸に沿って第２の液晶素子よりも位相変調素子側に配置され、第２の偏光方向に沿った偏光面を持つ直線偏光を透過させ、かつ、第２の偏光方向と異なる方向に沿った偏光面を持つ直線偏光を遮る検光子とを有することが好ましい。

この場合において、シャッター素子は、複数の方向のうちの何れか一つの方向に沿って回折された複数の次数の回折光が通る第２の液晶層の部分領域に照明光の波長に応じた所定の電圧が印加されることにより、部分領域を通る回折光の偏光面を第２の偏光方向と平行になるように回転させることでその方向に沿って回折された複数の次数の回折光を透過させることが好ましい。

[0017] さらに、この光変調素子において、偏光面回転素子は、位相変調素子を透過した複数の次数の回折光の偏光面と放射方向に直交する方向とを２等分する方向に沿って配向された液晶分子が封入された第３の液晶層を有する第３の液晶素子を有することが好ましい。

この場合において、第３の液晶素子は、第３の液晶層に照明光の波長に応じた所定の電圧が印加されることにより、第３の液晶層を通る複数の次数の回折光の偏光面を放射方向に対して直交する方向に回転させることが好ましい。

[0018] あるいは、偏光面回転素子は、位相変調素子を透過した複数の次数の回折光の偏光面と平行な偏光面を持つ直線偏光をアジマス偏光に変換するアジマス偏光変換素子を有することが好ましい。

## 発明の効果

[0019] 本発明に係る光変調素子は、機械的に作動する部品を利用せずに、構造化

照明光の位相及び偏光方向を調節できるという効果を奏する。

## 図面の簡単な説明

[0020] [図1]図１は、本発明の実施形態に係る光変調素子を有する顕微鏡装置の概略構成図である。

[図2]図２は、本発明の第１の実施形態に係る光変調素子の模式図である。

[図3A]図３Ａは、液晶素子を検光子側から見た概略正面図である。

[図3B]図３Ｂは、図３Ａの矢印Ａ、Ａ’で示される線における、液晶素子の概略側面断面図である。

[図4]図４は、シャッターが有する液晶素子の透明電極の概略正面図である。

[図5]図５は、偏光面回転素子側から見た、位相変調素子が有する液晶素子の概略正面図である。

[図6]図６は、位相変調素子が有する液晶素子の液晶層に印加される電圧と、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の関係を表すグラフである。

[図7A]図７Ａは、回折光が出射する側から見た偏光面回転素子が有する液晶素子の概略正面図である。

[図7B]図７Ｂは、回折光が出射する側から見た偏光面回転素子が有する液晶素子の概略正面図である。

[図8]図８は、変形例による、回折光が出射する側から見た偏光面回転素子が有するアジマス偏光変換素子の概略正面図である。

[図9]図９は、第２の実施形態に係る光変調素子の模式図である。

## 発明を実施するための形態

[0021] 以下、図を参照しつつ、本発明の実施形態による光変調素子について説明する。この光変調素子は、光源からの直線偏光である照明光を、互いに異なる３方向に回折させて、３組の＋１次の回折光及び－１次の回折光と０次回折光とを得る。そしてこの光変調素子では、機械的に作動する部分を無くすために、３組の１次回折光と０次回折光のうち透過させる回折光を選択するシャッター素子、選択的に透過された各次の回折光間の位相差を調節する位

相変調素子、及び、選択的に透過された各次の回折光と－１次の回折光の偏光面の向きを調節する偏光面回転素子が、それぞれ、液晶素子により構成される。

[0022] 図１は、本発明の第１の実施形態に係る光変調素子を有す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、コリメータ１０２と、光変調素子１０３と、コリメータ１０４と、ビームスプリッタ１０５と、対物レンズ１０６と、集光レンズ１０７と、受光素子１０８と、コントローラ１０９とを有する。

ビームスプリッタ１０５、対物レンズ１０６、集光レンズ１０７及び受光素子１０８は、対物レンズ１０６と集光レンズ１０７と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１０５の側面には、光軸ＯＡ’と直交し、コリメータ１０２及びコリメータ１０４によって規定される光軸ＯＡに沿って光源１０１、コリメータ１０２、光変調素子１０３及びコリメータ１０４が一列に配置される。そして、光源１０１、コリメータ１０２、光変調素子１０３、コリメータ１０４、ビームスプリッタ１０５及び対物レンズ１０６が、構造化照明光としての干渉縞を試料に投影する照明装置を構成する。

[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とコリメータ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。さらにまた、光源１０１からの光は、例えば、光ファイバを通じてコリメータ１０２に導かれてもよい。

さらに、光源１０１は、所定の波長域に含まれる、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、例えば、コントローラ１０９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] 光源１０１から放射された直線偏光である照明光は、コリメータ１０２を通って平行光化された後、光変調素子１０３を透過する。そしてその照明光は、光変調素子１０３を透過することによって、光軸ＯＡからの複数の放射方向の何れかに沿った複数の次数の回折光に分離される。また各次数の回折光は、試料２００の表面に入射する際にＳ偏光となるように、光軸ＯＡについての円周方向に沿った偏光面を持ち、かつ、各次数の回折光間に所定の位相差が与えられる。なお、回折の方向及び各次数の回折光間の位相差の少なくとも一方は、モアレ縞の画像の撮影の度に変更される。そして各次数の回折光は、コリメータ１０４を通って平行光化された後、ビームスプリッタ１０５により反射され、対物レンズ１０６によって試料２００の表面または内部に設定された、観察対象となる物体面上において１点に集光されることで、各次数の回折光同士による干渉縞を生じる。物体面で反射または散乱され、あるいは物体面から蛍光発光した光は、再び対物レンズ１０６を通った後、ビームスプリッタ１０５を直進する。その後、物体面で反射または散乱され、あるいは物体面から蛍光発光した光は、集光レンズ１０７によって受光素子１０８上に集光される。

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１００は、光路上に、球面収差用補償光学系などの各種の補償光学系、または光路を曲げるためのミラーを有していてもよい。

[0025] 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などの固体撮像素子を有し、１回の撮影の度に、各固体撮像素子が受光した光の強度に応じた電気信号を出力することで、受光素子１０８上に結像された、構造化照明光である干渉縞と試料の構造により生じるモアレ縞の画像を生成する。そして受光素子１０８は、そのモアレ縞の画像をコントローラ１０９へ出力する。

[0026] コントローラ１０９は、例えば、プロセッサと、メモリと、コントローラ１０９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１０９は、光源１０１及び光変調素子１０３

を制御する。そしてコントローラ１０９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１０９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。

[0027] またコントローラ１０９は、図示しない駆動回路を有し、その駆動回路を介して光変調素子１０３が有する液晶素子に印加する電圧を制御することで、光変調素子１０３から出力される各次数の回折光の位相、回折方向などを制御する。

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１０９は、発光させる発光素子に応じて、光変調素子１０３が有する各液晶素子に印加される電圧を調節する。

なお、駆動回路から光変調素子１０３が有する各液晶素子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。さらに、駆動回路は、オーバードライブによって光変調素子１０３が有する各液晶素子を駆動して、各液晶素子の応答を速めてもよい。

[0028] さらにコントローラ１０９は、受光素子１０８から受信した複数のモアレ縞の画像から試料２００の物体面の画像（以下では、便宜上試料画像と呼ぶ）を生成する。なお、複数のモアレ縞の画像から試料画像を得るための画像演算の詳細は、例えば、上述した、大内、「構造化照明を利用した超解像顕微鏡N-SIM」、O PLUS E、アドコム・メディア、2012年、第34巻、第9号、p.827-833に開示されている。

[0029] 以下、本発明の第１の実施形態による光変調素子１０３について説明する。

図２は、光変調素子１０３の模式図である。光変調素子１０３は、選択回折素子１０と、偏光面回転素子１４とを有する。

[0030] 選択回折素子１０は、光源１０１からの直線偏光である照明光を、複数の方向のうちの何れか一つの方向に沿って回折させて複数の次数の回折光を生成する。そして選択回折素子１０は、それら複数の次数の回折光間に、複数のモアレ縞の画像から試料画像を得るために必要な、複数のモアレ縞のそれぞれに対応する位相差を生じさせる。そのために、選択回折素子１０は、回折格子１１と、シャッター１２と、位相変調素子１３とを有する。

[0031] 回折格子１１は、所定のピッチで互いに平行になるように形成された複数の格子線の組を３組有する。各格子線の組は、互いに対して60°の角度をなすように配置される。回折格子１１は、例えば、格子線が光を透過しない金属製のワイヤで形成された振幅変調型の回折格子であってもよく、あるいは、回折格子１１は、光軸ＯＡに沿った方向の格子線部分の厚さが格子線以外の部分の厚さと異なるか、または、格子線に相当する部分の屈折率が格子線以外の部分の屈折率と異なるように形成された位相変調型の回折格子であってもよい。これにより、回折格子１１は、光源１０１からの照明光を、光軸ＯＡからの放射方向に沿った、互いに対して60°の角度をなす３個の面のそれぞれに沿って回折させる。本実施形態では、回折格子１１は、矢印２０１に示される、照明光の偏光面に沿った回折光と、照明光の偏光方向に対して時計回りに60°回転した面に沿った回折光と、照明光の偏光方向に対して反時計回りに60°回転した面に沿った回折光とを生じさせる。そして回折格子１１から出射した各回折光は、それぞれ、照明光の偏光方向と同じ偏光方向を持つ直線偏光となる。そして各回折光は、シャッター１２に入射する。

[0032] シャッター１２は、入射した各回折光のうち、光軸ＯＡを通る特定の面に沿った各次数の回折光のみを選択的に透過させる。そのために、シャッター１２は、液晶素子１２１と検光子１２２とを有する。

[0033] 図３Ａは、液晶素子１２１を検光子１２２側から見た概略正面図であり、図３Ｂは、図３Ａの矢印Ａ、Ａ’で示される線における、液晶素子１２１の概略側面断面図である。

液晶素子１２１は、第２の液晶素子の一例であり、入射した回折光のうち

、シャッター１２を透過させる回折光に対して半波長板として動作し、その透過させる回折光の偏光面を90°回転させる。一方、液晶素子１２１は、シャッター１２を透過させない回折光の偏光面を回転させない。

[0034] そのために、液晶素子１２１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。また液晶素子１２１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。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。また液晶層２０の厚さは、後述するように、液晶素子２０が半波長板として動作するのに十分な厚さ、例えば、5μmとされる。

[0035] 透明基板２１、２２は、例えば、ガラスまたは樹脂など、光源１０１が発する照明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。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。

[0036] 本実施形態では、液晶層２０は、光軸ＯＡが通る部分領域２０ａと、部分領域２０ａの周囲に配置され、光軸ＯＡに直交する面内で円周方向に沿って６等分された６個の部分領域２０ｂ～２０ｇを有する。

部分領域２０ａには、各回折光のうちの０次回折光３０１のみが入射する。一方、部分領域２０ｂ～２０ｇには、＋１次の回折光または－１次の回折光の何れかが入射する。このうち、部分領域２０ｂには、照明光の偏光面に沿って回折された＋１次の回折光３０２が入射し、部分領域２０ｂと部分領域２０ａを挟んで対向する部分領域２０ｅには、照明光の偏光面に沿って回折された－１次の回折光３０３が入射する。また、部分領域２０ｃには、照

明光の偏光面から時計回りに60°回転した面に平行な方向に沿って回折された＋１次の回折光３０４が入射し、部分領域２０ｃと部分領域２０ａを挟んで対向する部分領域２０ｆには、照明光の偏光面から時計回りに60°回転した面に平行な方向に沿って回折されたー１次の回折光３０５が入射する。さらに、部分領域２０ｄには、照明光の偏光面から反時計回りに60°回転した面に平行な方向に沿って回折されたー１次の回折光３０６が入射し、部分領域２０ｄと部分領域２０ａを挟んで対向する部分領域２０ｇには、照明光の偏光面から反時計回りに60°回転した面に平行な方向に沿って回折された＋１次の回折光３０７が入射する。なお、液晶素子１２１に入射する際の各回折光の偏光面は、照明光の偏光面と同一である。

[0037] 液晶層２０に封入された液晶分子２７は、例えば、ホモジニアス配向される。そして各部分領域に含まれる液晶分子２７は、矢印３１１に示されるように、入射する回折光の偏光面３１２に対して45°をなす方向と平行になるように配向される。すなわち、液晶分子２７の配向方向は、液晶素子１２１が半波長板として動作する際に、液晶素子１２１に入射する直線偏光の偏光面と液晶素子１２１から出射する直線偏光の偏光面とがなす角を２等分する方向に設定される。

[0038] 図４は、透明電極２３を検光子１２２側から見た、透明電極２３の概略正面図である。透明電極２３は、液晶層２０の各部分領域ごとに、その部分領域の検光子側の面を覆い、互いに絶縁された複数の電極２３ａ～２３ｇを有する。一方、透明電極２４は、液晶層２０の回折格子１１側の面全体を覆うように配置される。なお、透明電極２４も、透明電極２３と同様に、部分領域ごとの複数の電極を有してもよい。そして透明電極２３と２４との間に、照明光の波長に対して液晶層２０の部分領域２０ａ～２０ｇのうち、回折光を透過させる部分領域が半波長板として機能するように、コントローラ１０９によって、照明光の波長に応じた電圧が印加される。

[0039] ここで、透明電極２３と２４との間に電圧が印加されると、液晶分子２７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２７の長軸方向と、電圧が印加された方向とがなす角をφとすれば、液晶層２０を透過する回折光は、長軸方向に対して角φ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$n_\phi$とすると、$n_o \leqq n_\phi \leqq n_e$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。

[0040] 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、液晶分子２７の配向方向に平行な偏光成分と液晶分子２７の配向方向に直交する偏光成分との間に、光路長差Δnd($=n_\phi d-n_o d$)が生じる。したがって、透明電極２３と２４との間に印加する電圧を調節することにより、液晶分子２７の配向方向に平行な偏光成分と、液晶分子２７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１０９が透明電極２３と２４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、部分領域２０ａ～２０ｇがそれぞれ半波長板として機能する。液晶分子２７の配向方向に対して角度－θをなす偏光面を有する直線偏光がそれら部分領域を透過すると、その偏光面は、液晶分子２７の配向方向に対して角度θ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２θだけ回転する。

[0041] 本実施形態では、１回の撮影ごとに、各部分領域２０ｂ～２０ｇのうち、光軸ＯＡを挟んで対向する二つの部分領域が同時に半波長板として機能するか、その二つの部分領域と中心の部分領域２０ａが同時に半波長板として機能するように、電極２３と電極２４の間に電圧が印加される。本実施形態では、各部分領域の液晶分子２７の配向方向は、回折光の偏光面と45°をなしているので、回折光が半波長板として機能する部分領域を透過することによって回折光の偏光面は90°回転し、その部分領域を透過した回折光の偏光面は、図２の矢印２０２に示されるように、照明光の偏光面に対して直交する。

[0042] また、半波長板として機能させない部分領域については、その部分領域を挟む透明電極間に、液晶分子２７の配向方向に平行な方向の偏光成分と、その配向方向に直交する方向の偏光成分との間の光路差が照明光の波長の整数倍となる電圧が印加されてもよい。すなわち、半波長板として機能させない部分領域を透過する回折光の偏光面は、図２の矢印２０３に示されるように、照明光の偏光面と平行なままとなる。

[0043] 液晶素子１２１を透過した各次数の回折光は、検光子１２２に入射する。

[0044] 検光子１２２は、照明光の偏光方向に直交する方向（すなわち、図２の矢印２０４により示される方向）の偏光面を持つ直線偏光のみを透過させる。そのため、検光子１２２に入射する各次数の回折光のうち、液晶素子１２１によって偏光面が90°回転させられた、特定方向に沿って回折された各次数の回折光のみが検光子１２２を透過する。したがって、例えば、図２に示される、回折格子１１により回折された複数の方向の回折光２１１～２１７のうち、特定方向に沿って回折された、＋１次及び－１次の回折光２１４、２１７だけがシャッター１２を透過する。

[0045] なお、変形例によれば、検光子１２２は、照明光の偏光方向に平行な偏光面を持つ直線偏光のみを透過させるように配置されてもよい。この場合には、コントローラ１０９は、各回折光のうち、シャッター１２を選択的に透過させる回折光が通る部分領域には、偏光面が回転しないように電圧を印加し、一方、シャッター１２を透過させない回折光が通る部分領域には、その部分領域が半波長板として動作する電圧を印加してもよい。

[0046] シャッター１２を透過した、特定の方向に沿って回折された複数の次数の回折光は、位相変調素子１３に入射する。

[0047] 位相変調素子１３は、入射した各次数の回折光の間に所定の位相差を生じさせる。そのために、位相変調素子１３は、光軸ＯＡに沿って並べて配置された二つの液晶素子１３１、１３２を有する。この二つの液晶素子１３１、１３２は、第１の液晶素子の一例である。なお、液晶素子１３１は、液晶素子１３２と同一の構成を有するので、以下では、液晶素子１３１について説

明する。

[0048] 図５は、偏光面回転素子１４側から見た、液晶素子１３１の概略正面図である。液晶素子１３１は、シャッター１２に含まれる液晶素子１２１と同様に、二つの透明基板及び二つの透明電極に挟まれた液晶層を有し、光軸ＯＡが通る部分領域３０ａと、領域３０ａの周囲に配置され、光軸ＯＡに直交する面内で円周方向に沿って６等分された６個の部分領域３０ｂ～３０ｇを有する。

[0049] 各部分領域３０ａ～３０ｇは、それぞれ、図３（ａ）に示されるシャッター１２の液晶素子１２１の各部分領域２０ａ～２０ｇ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。すなわち、液晶素子１２１の部分領域２０ａを透過した０次回折光５０１は、液晶素子１３１の部分領域３０ａを透過する。同様に、液晶素子１２１の部分領域２０ｂ～２０ｇを透過した＋１次またはー１次の回折光５０２～５０７は、それぞれ、液晶素子１３１の部分領域３０ｂ～３０ｇのうちの対応する領域を透過する。さらに、液晶素子１３２にも、液晶素子１３１と同様の部分領域が設定され、液晶素子１３１の部分領域３０ａ～３０ｇを透過した回折光は、液晶素子１３２の対応する部分領域を透過する。なお、説明の便宜上、図５では、全ての＋１次の回折光とー１次の回折光を図示しているが、液晶素子１３１を同時に透過するのは、部分領域３０ｇ～３０ｇのうちの光軸ＯＡを挟んで対向する二つの部分領域を透過する＋１次及びー１次の回折光のみ、あるいは、それら＋１次及びー１次の回折光と０次の回折光のみである。

[0050] 液晶素子１３１は、液晶素子１２１と比較して、各部分領域３０ａ～３０ｇに含まれる液晶分子の配向方向が異なる。

本実施形態では、液晶素子１３１が有する液晶層に封入された液晶分子は、図５において矢印５０１で示される、光源１０１からの照明光の偏光方向と直交する方向に沿って液晶分子の長軸方向が揃うようにホモジニアス配向される。すなわち、シャッター１２から出射した回折光の偏光方向と液晶分子の配向方向が略平行となる。そのため、回折光に対する液晶素子１３１の

液晶層についての光路長は、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に依存する。

[0051] そこで、第１の次数の回折光の一例である、＋１次の回折光が透過する部分領域における、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$n_1$とし、第２の次数の回折光の一例である、－１次の回折光が透過する部分領域における、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$n_{-1}$とすれば、その二つの部分領域を透過する各次数の回折光間に、光路長差$\Delta nd(=n_1d- n_{-1}d)$が生じる。なお、dは、液晶素子１３１が有する液晶層の厚さである。そしてそれら二つの回折光間に生じる位相差Δは、$2\pi\Delta nd/\lambda$となる。なお、λは、照明光の波長である。同様に、＋１次の回折光と－１次の回折光とが液晶素子１３２を通ることによって、$2\pi\Delta nd/\lambda$の位相差がその二つの次数の回折光の間に生じる。したがって、＋１次の回折光と－１次の回折光とが位相変調素子１３を透過することにより、$4\pi\Delta nd/\lambda$の位相差がその二つの次数の回折光の間に生じる。

[0052] 例えば、部分領域３０ｂを＋１次の回折光が透過し、部分領域３０ｅを－１次の回折光が透過する場合、コントローラ１０９は、部分領域３０ｂを挟んで対向する二つの透明電極に印加する電圧を、部分領域３０ｅを挟んで対向する二つの透明電極に印加する電圧を異ならせることにより、＋１次の回折光と－１次の回折光との間の位相差を、例えば、$1/3\pi$、$2/3\pi$、$4/3\pi$及び$2\pi$などに設定する。

[0053] 図６は、液晶素子１３１の液晶層に印加される電圧と、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の関係を表すグラフである。横軸は電圧を表し、縦軸は屈折率を表す。そしてグラフ６００は、波長λの光に対する、液晶層に印加される電圧に対する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の関係を表す電圧－屈折率曲線の一例である。

[0054] 例えば、部分領域３０ｂにおける印加電圧がV1であり、その際の部分領域３０ｂにおける、配向方向に平行な偏光成分に対する屈折率がn1であるとす

る。また部分領域３０ｅにおける印加電圧がV2であり、その際の部分領域３０ｅにおける、配向方向に平行な偏光成分に対する屈折率がn2であるとする。

[0055] 例えば、位相変調素子１３を透過する＋１次の回折光と－１次の回折光との間の位相差を2/3πとするために、コントローラ１０９は、グラフ６００を参照して、屈折率n1と屈折率n2の差Δnがλ/(6d)となるように、電圧V1及び電圧V2を調節する。同様に、位相変調素子１３を透過する＋１次の回折光と－１次の回折光との間の位相差を4/3πまたは2πとするために、コントローラ１０９は、グラフ６００を参照して、屈折率n1と屈折率n2の差Δnがλ/(3d)またはλ/(2d)となるように、電圧V1及び電圧V2を調節すればよい。

[0056] 同様に、＋１次の回折光及び－１次の回折光とともに、第２の次数の回折光の他の一例である、０次の回折光を用いてモアレ縞の画像を生成する場合には、コントローラ１０９は、部分領域３０ｂを透過する＋１次の回折光と部分領域３０ａを透過する０次の回折光との間に生じる位相差、及び、部分領域３０ｅを透過する－１次の回折光と部分領域３０ａを透過する０次の回折光との間に生じる位相差が、それぞれ、所定の位相差（例えば、2/5π、4/5π、8/5πなど）となるように、コントローラ１０９は、グラフ６００を参照して、各部分領域に印加する電圧を決定すればよい。

[0057] さらに、コントローラ１０９は、光源１０１が複数の発光素子を有する場合、発光素子ごとに電圧－屈折率曲線を記憶していてもよい。この場合、コントローラ１０９は、使用される発光素子から発する照明光の波長に応じた電圧－屈折率曲線を参照することにより、適切に位相変調素子の各部分領域に印加する電圧を決定できる。同様に、コントローラ１０９は、光変調素子１０３の複数の温度のそれぞれごとに電圧－屈折率曲線を記憶していてもよい。この場合、コントローラ１０９は、例えば、光変調素子１０３の近傍に配置された温度計（図示せず）による温度の測定値に最も近い温度に対応する電圧－屈折率曲線を参照することにより、適切に位相変調素子の各部分領域に印加する電圧を決定できる。

[0058] また、位相変調素子１３は、二つの液晶素子１３１、１３２を有するので、各液晶素子の液晶層の厚さを、その液晶層を透過する二つの次数の回折光間に生じさせる光路長の差の最大値が照明光の波長未満となる厚さ、例えば、最大で照明光の波長の1/2の光路長差を生じさせることが可能な厚さとすることができる。一般に、液晶素子の応答速度は、液晶層の厚さの2乗に比例するので、このように各液晶素子の液晶層を薄くすることで、位相変調素子１３は、各次数の回折光間の位相差を変更する際の液晶素子の応答速度を向上できる。特に、本実施形態では、照明光が回折される一つの方向ごとに、各次数の回折光間の位相差を変えて少なくとも３回のモアレ縞の撮影が行われる。そのため、光変調素子１０３は、液晶素子１３１、１３２の応答速度を向上させることで、試料画像の生成に要する時間をより短縮できる。

[0059] なお、変形例によれば、位相変調素子１３は、液晶素子１３１の一つのみを有していてもよい。この場合には、液晶素子１３１が有する液晶層の厚さは、その液晶層を透過する各次数の回折光に対して、回折光の波長と等しい光路長差を生じさせることが可能な厚さとすればよい。位相変調素子１３が有する液晶素子を一つとすることで、液晶層が厚くなるため、液晶素子を複数有する場合よりも回折光の位相差を変更する場合の液晶素子の応答速度は低下するものの、光変調素子１０３全体のコストを低下させることができる。

[0060] 位相変調素子１３を透過した回折光は、偏光面回転素子１４へ入射する。

[0061] 偏光面回転素子１４は、偏光面回転素子１４を透過する回折光が試料上に集光される際にＳ偏光となるように、その回折光の偏光面を回転させる。具体的には、光変調素子１０３から出射した回折光は、物体面において光軸の外から光軸と物体面の交点へ向けて斜入射するので、回折光の偏光面が光軸ＯＡからの放射方向と直交するようにすればよい。例えば、図２において、位相変調素子１３を透過した回折光２１４、２１７の偏光面は、偏光面回転素子１４を透過することにより、矢印２０５、２０６に示される方向となる。そのために、偏光面回転素子１４は、二つの液晶素子１４１、１４２を有

する。この液晶素子１４１、１４２は、それぞれ、第３の液晶素子の一例である。

[0062] 図７Ａ及び図７Ｂは、それぞれ、回折光が出射する側から見た液晶素子１４１と液晶素子１４２の概略正面図である。液晶素子１４１及び液晶素子１４２も、シャッター１２が有する液晶素子１２１と同様に、二つの透明基板及び二つの透明電極に挟まれた液晶層を有する。そして液晶素子１４１の液晶層に封入される液晶分子及び液晶素子１４２の液晶層に封入される液晶分子も、それぞれ、ホモジニアス配向される。ただし、液晶素子１４１、１４２を液晶素子１２１と比較すると、液晶素子１４１、１４２の液晶層を挟む二つの透明電極が液晶層全体を覆うように設けられる点、及び、液晶分子の配向方向が異なる。

[0063] 図７Ａにおいて、矢印７０１は、液晶素子１４１の液晶層に封入される液晶分子の配向方向を表す。液晶素子１４１は、光軸ＯＡからの放射線７００に対して時計回りに30°の角度をなす偏光面（矢印７１１で表される）を持つ、シャッター１２の液晶素子１２１の部分領域２０ｃ及び２０ｆを透過した回折光７２１、７２２の偏光面を、光軸ＯＡからの放射線に対して直交するように回転させる。そのために、液晶素子１４１の液晶分子の配向方向は、部分領域２０ｃ及び２０ｆを透過した回折光の偏光面に対して、時計回りに30°傾けられる。すなわち、液晶素子１４１の液晶分子の配向方向は、回折光７２１、７２２の偏光面と、光軸ＯＡからの放射方向に直交する方向とを２等分する方向となる。

[0064] シャッター１２が、液晶素子１２１の部分領域２０ｃ及び２０ｆを透過する回折光を選択的に透過させる場合、コントローラ１０９は、液晶素子１４１の液晶素子を挟む二つの透明電極間に、液晶素子１４１が半波長板として機能する電圧を印加する。これにより、部分領域２０ｃ及び２０ｆを透過した回折光７２１、７２２の偏光面は、液晶素子１４１を透過することにより、その偏光面と配向方向７０１とがなす角の2倍回転する、すなわち、時計回りに60°回転するので、光軸ＯＡからの放射線に対して直交するようになる

。

[0065] 図７Ｂにおいて、矢印７０２は、液晶素子１４２の液晶層に封入される液晶分子の配向方向を表す。液晶素子１４２は、光軸ＯＡからの放射線７００に対して、反時計回りに30°の角度をなす偏光面（矢印７１２で表される）を持つ、シャッター１２の液晶素子１２１の部分領域２０ｄ及び２０ｇを透過した回折光７２３、７２４の偏光面を、光軸ＯＡからの放射線７００に対して直交するように回転させる。そのために、液晶素子１４２における液晶分子の配向方向は、部分領域２０ｄ及び２０ｇを透過した回折光の偏光面に対して、反時計回りに30°傾けられる。すなわち、液晶素子１４２の液晶分子の配向方向も、回折光７２３、７２４の偏光面と、光軸ＯＡからの放射方向に直交する方向とを２等分する方向となる。

[0066] シャッター１２が、液晶素子１２１の部分領域２０ｄ及び２０ｇを透過する回折光を選択的に透過させる場合、コントローラ１０９は、液晶素子１４２の液晶素子を挟む二つの透明電極間に、液晶素子１４２が半波長板として機能する電圧を印加する。これにより、部分領域２０ｄ及び２０ｇを透過した回折光７２３、７２４の偏光面は、液晶素子１４２を透過することにより、その偏光面と配向方向７０２とがなす角の2倍回転する、すなわち、反時計回りに60°回転するので、光軸ＯＡからの放射線に対して直交するようになる。

[0067] なお、シャッター１２が、光軸ＯＡからの放射線と直交する偏光面を持つ、液晶素子１２１の部分領域２０ｂ及び２０ｅを透過した回折光を選択的に透過させる場合、その回折光の偏光面は、偏光面回転素子１４に入射した時点で既に光軸ＯＡからの放射方向に直交しているので、偏光面回転素子１４は、それらの回折光の偏光面を回転させる必要はない。そこでこの場合、コントローラ１０９は、液晶素子１４１及び液晶素子１４２に対して、液晶分子の配向方向に平行な偏光成分についての光路長とその配向方向に直交する偏光成分についての光路長の差が回折光の波長の整数倍となる電圧を印加する。

[0068] 同様に、シャッター１２が、液晶素子１２１の部分領域２０ｃ及び２０ｆを透過した回折光を選択的に透過させる場合、コントローラ１０９は、液晶素子１４２に対して、液晶分子の配向方向に平行な偏光成分についての光路長とその配向方向に直交する偏光成分についての光路長の差が回折光の波長の整数倍となる電圧を印加する。また、シャッター１２が、液晶素子１２１の部分領域２０ｄ及び２０ｇを透過した回折光を選択的に透過させる場合、コントローラ１０９は、液晶素子１４１に対して、液晶分子の配向方向に平行な偏光成分についての光路長とその配向方向に直交する偏光成分についての光路長の差が回折光の波長の整数倍となる電圧を印加する。

これにより、偏光面回転素子１４を透過した回折光は、試料に入射する際にＳ偏光となる。

[0069] 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光変調素子は、各回折光の位相及び偏光面を液晶素子によって制御するので、機械的に作動する部品をなくすことができる。また機械的に作動する部品をなくすことにより、この光変調素子は、回折光の位相及び回折方向を変更する際に要する時間を短縮できるので、顕微鏡装置が個々のモアレ縞の画像を撮影するのに要する時間を短縮でき、その結果として、試料画像の生成に要する時間を短縮できる。

[0070] なお、本発明は上記の実施形態に限られない。例えば、シャッター１２は、液晶素子１２１の代わりに、電圧を印加することによって透過率が変化する多層膜を有する透過率変調素子を有していてもよい。この場合、その透過率変調素子も、０次、＋１次、－１次の回折光が通る部分領域ごとに、独立して電圧を印加できるように、透明電極２３、２４と同様の構造を持つ透明電極が多層膜を挟んで対向するように設けられることが好ましい。この変形例では、透過率変調素子そのものによって透過する回折光が選択できるので、検光子１２２は省略されてもよい。

[0071] また、モアレ縞の画像の生成に０次回折光を利用しない場合には、シャッター１２の液晶素子１２１及び位相変調素子１３の液晶素子１３１、１３２

における、光軸が通る部分領域は省略されてもよい。この場合には、各液晶素子の液晶層は、光軸を中心とする、扇形の複数の部分領域に分割される。

[0072] また、他の変形例によれば、偏光面回転素子１４は、直線偏光を、光軸を中心とする円周に平行な方向の偏光面を持つ偏光に変換するアジマス偏光変換素子によって構成されてもよい。

[0073] 図８は、この変形例による、回折光が出射する側から見たアジマス偏光変換素子の概略正面図である。アジマス偏光変換素子１５は、シャッター１２に含まれる液晶素子１２１と同様に、二つの透明基板及び二つの透明電極に挟まれた液晶層を有し、光軸ＯＡに直交する面内で光軸ＯＡを中心とする円周方向に沿って６等分された６個の部分領域８０ａ～８０ｆを有する。

[0074] 各部分領域８０ａ～８０ｆは、それぞれ、図３Ａに示されるシャッター１２の液晶素子１２１の各部分領域２０ｂ～２０ｇ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。すなわち、液晶素子１２１の部分領域２０ｂを透過した＋１次の回折光は、位相変調素子１３を透過した後にアジマス偏光変換素子１５の部分領域８０ａを透過する。同様に、液晶素子１２１の部分領域２０ｃ～２０ｇを透過した＋１次または－１次の回折光は、それぞれ、位相変調素子１３を透過した後にアジマス偏光変換素子１５の部分領域８０ｂ～８０ｆを透過する。

[0075] アジマス偏光変換素子１５は、液晶素子１２１と比較して、各部分領域８０ａ～８０ｇに含まれる液晶分子の配向方向が異なる。矢印８１１～８１７は、それぞれ、部分領域８０ａ～８０ｇにおける液晶分子の配向方向を示す。

[0076] 本実施形態では、部分領域８０ａでは、回折光の偏光面を回転させないように、光軸ＯＡからの放射方向と直交する方向に液晶分子が配向される。また、部分領域８０ａと光軸ＯＡを挟んで対向する部分領域８０ｄでは、回折光の偏光面を180°回転させるように、光軸ＯＡからの放射方向と平行な方向に液晶分子が配向される。また、部分領域８０ｂにおける配向方向は、液晶素子１４１の液晶分子の配向方向と同様に、シャッター１２の液晶素子１２

１の部分領域２０ｃを透過した回折光の偏光面に対して、時計回りに30°傾けられる。さらに、部分領域８０ｅにおける配向方向は、シャッター１２の液晶素子１２１の部分領域２０ｆを透過した回折光の偏光面に対して、時計回りに120°傾けられる。さらに、部分領域８０ｆにおける配向方向は、液晶素子１４２の液晶分子の配向方向と同様に、シャッター１２の液晶素子１２１の部分領域２０ｇを透過した回折光の偏光面に対して、反時計回りに30°傾けられる。さらに、部分領域８０ｃにおける配向方向は、シャッター１２の液晶素子１２１の部分領域２０ｄを透過した回折光の偏光面に対して、反時計回りに120°傾けられる。

[0077] この変形例では、コントローラ１０９が、アジマス偏光変換素子１５の各部分領域に、その部分領域を透過する回折光に対して半波長板として動作する電圧を印加することで、アジマス偏光変換素子１５は、アジマス偏光変換素子１５を透過する各回折光の偏光面を、光軸ＯＡからの放射方向に直交するように回転できる。そのため、この変形例では、シャッター１２が透過させる回折光によらず、アジマス偏光変換素子１５の液晶層に印加する電圧を一定とすればよいので、コントローラ１０９による偏光面回転素子１４の制御を簡単化できる。

[0078] さらにまた、光源１０１が一つの発光素子のみを有し、照明光の波長が固定である場合には、アジマス偏光変換素子は、液晶素子以外の素子によって構成されてもよい。例えば、アジマス偏光変換素子は、光軸ＯＡを中心とする扇形領域ごとに光学軸の方向が異なるように配置された、水晶のような単軸結晶あるいはフォトニック結晶といった複屈折性を示す結晶を、扇形形状を持つように整形し、その扇形形状を持つ複数の結晶を、光軸ＯＡを中心とするように貼り合わせることによって構成されてもよい。この場合、各結晶の厚さは、光源１０１が発する照明光の波長に対して、その結晶が半波長板となるように決定される。また各結晶の光学軸が、例えば、図８に示される液晶の配向方向と平行となるように、各結晶の向きが決定される。このように各結晶が配置されることで、アジマス偏光変換素子に入射した各回折光の

偏光面は、光学軸方向を中心として、入射した直線偏光の偏光面と光学軸のなす角θの２倍の角度２θだけ回転する。そのため、アジマス偏光変換素子から出射した光はアジマス偏光となる。

[0079] さらに他の変形例によれば、位相変調素子と同様に、シャッターは、光軸方向に沿って並べられた二つ以上の液晶素子を有してもよい。これにより、シャッターが有する液晶素子の液晶層を薄くできるので、シャッターの応答速度を向上できる。そのため、この変形例では、光変調素子は、シャッターを透過させる回折光を切り替える際の動作速度を向上できる。特に、偏光面回転素子をアジマス偏光変換素子とする場合、上記の実施形態と比較して、光変調素子が有する液晶素子の数は１枚しか増えないので、この変形例による光変調素子は、光変調素子のコストの増加及び透過率の低下を抑制しつつ、動作速度をより向上できる。

[0080] さらに、偏光面回転素子も、偏光面を回転させる回折方向ごとに、光軸方向に沿って並べられた二つ以上の液晶素子を有することで、偏光面回転素子の応答速度を向上させてもよい。さらにまた、シャッター、位相変調素子及び偏光面回転素子のうち、任意の１以上の素子について、上記の実施形態または変形例のように液晶素子の数を２以上としてもよい。このように光変調素子が組み込まれる顕微鏡装置における、撮影順序に応じて、回折方向、位相差、偏光面の回転のうち、切り替える回数が多いものに対応する素子の液晶素子の数を上記のように増やすことが好ましい。

[0081] さらに他の変形例によれば、回折格子は、１方向または２方向、あるいは４方向以上に沿って回折光を生じさせるように構成されてもよい。例えば、回折格子は、照明光の偏光方向に平行な方向に沿った回折光とその偏光方向に垂直な方向に沿った回折光とを生じるように、偏光面に平行な方向及び偏光面に垂直な方向に沿って所定ピッチの格子線を有するように構成されてもよい。この場合にも、シャッター１２が有する液晶素子及び位相変調素子１３が有する液晶素子についての部分領域は、それぞれ、０次、＋１次及び－１次

の回折光の何れか一つが入射するように決定されればよい。

[0082] 次に、本発明の第２の実施形態による光変調素子１０３’について説明する。

図９は、第２の実施形態に係る光変調素子１０３’の模式図である。光変調素子１０３’は、選択回折素子１０’と、偏光面回転素子１４とを有する。第２の実施形態による光変調素子１０３’は、図２に示された第１の実施形態による光変調素子１０３と比較して、選択回折素子１０’の構成が異なる。そこで以下では、選択回折素子１０’について説明する。

[0083] 選択素子１０’は、光軸ＯＡに沿って、偏光面回転素子１４と離れている方から順に、空間光変調素子１６と、偏光ビームスプリッタ１７と、シャッター１８とを有する。

[0084] 光源１０１からの照明光は、光軸ＯＡに対して直交する方向から偏光ビームスプリッタ１７に入射される。偏光ビームスプリッタ１７は、その照明光を空間光変調素子１６へ向けて反射する。一方、空間光変調素子１６によって照明光が回折することによって得られた回折光は、偏光ビームスプリッタ１７を透過して、シャッター１８へ向かう。

[0085] 空間光変調素子１６は、複数の方向のうちの選択された一つの方向に沿って照明光を回折させて複数の次数の回折光を生じさせ、かつ、複数の次数の回折光間に、構造化照明で利用される様々な位相差を与える回折格子を表示させる。そのために、空間光変調素子１６は、例えば、液晶層の少なくとも一方の面（すなわち、反射側の面）に、２次元に配列された複数の画素ごとに独立した駆動電極を有する液晶素子で構成される。このような液晶素子は、液晶層の他方の面（すなわち、透過側の面）に、光を制御する領域全体を覆うように設けられた透明電極と各画素の駆動電極との間に印加する電圧を画素ごとに調節することで、画素ごとに独立して透過率または屈折率を調節できる。本実施形態では、空間光変調素子１６として、例えば、Liquid crystal on silicon(LCOS)といった、反射型の液晶素子を利用する。コントローラ１０９は、空間光変調素子１６の各画素に印加する電圧を調節することで

、任意の回折方向に照明光を回折させる回折格子を表示させることができる。例えば、照明光を、照明光の偏光面に沿って回折させる場合、コントローラ１０９は、その偏光面に沿って、透過率または屈折率が周期的に変化するように、空間光変調素子１６に回折格子を表示させればよい。あるいは、空間光変調素子１６は、シャッター１８へ照明光を向かわせる画素についてのみ、照明光を反射する際に偏光面をπ/2回転させることで、その画素で反射された光のみが偏光ビームスプリッタ１７を透過するようにしてもよい。

また、照明光の偏光方向の調整のために、偏光ビームスプリッタ１７と空間光変調素子１６の間に波長板が配置されてもよい。

[0086] また、コントローラ１０９は、各次数の回折光間の位相差を調節するために、空間光変調素子１６に表示させる回折格子の各格子線の位置を、格子線と直交する方向、すなわち、照明光が回折する方向に沿って、与える位相差に応じた量だけシフトさせればよい。例えば、回折格子が繰返し周期の方向に沿って1/2ピッチ分だけ移動すると、＋１次の回折光と－１次の回折光間の位相差は２π変化する。そこで、＋１次の回折光と－１次の回折光間に与える位相差をΔとすると、コントローラ１０９は、＋１次の回折光と－１次の回折光間の位相差が０となるときの回折格子の位置に対して、(Δ/4π)を回折格子の１ピッチの長さに乗じた値だけ、照明光が回折する方向に沿って回折格子を移動させればよい。

[0087] シャッター１８は、第１の実施形態によるシャッター１２と同様の構成及び機能を有する。すなわち、シャッター１８は、光軸ＯＡに沿って、空間光変調素子１６側から順に、液晶素子１８１と検光子１８２とを有する。そして液晶素子１８１が有する液晶層は、各回折方向の各次数の回折光が透過する部分領域ごとに分割され、液晶層の少なくとも一方の面に、部分領域ごとに独立した透明電極が設けられる。そしてコントローラ１０９が、各部分領域に対応する透明電極に印加する電圧を調節することで、空間光変調素子１６により発生した回折光が透過する部分領域のみが、その部分領域を透過する回折光の偏光面を回転または維持して、その偏光面を検光子１８２を透過

できる偏光方向と一致させる。そのため、空間光変調素子１６により発生した回折光はシャッター１８を透過し、一方、空間光変調素子１６から発し、回折光が透過する部分領域とは異なる部分領域に入射した迷光は減衰される。これにより、シャッター１８は、空間光変調素子１６から発し、偏光面回転素子１４を透過して試料に達する迷光を減衰させることができるので、得られるモアレ縞のコントラストを向上できる。

なお、空間光変調素子１６及び偏光面回転素子１４を経由して試料に達する迷光の光量が無視できる程度であれば、シャッター１８は省略されてもよい。

[0088] またコントローラ１０９は、シャッター１８を透過した各次数の回折光の光量が略等しくなるように、各次数の回折光が透過する液晶層の部分領域ごとに印加する電圧を調節してもよい。例えば、シャッター１８に入射した時点で＋１次の回折光の光量の方がー１次の回折光の光量よりも大きい場合、液晶素子１８１を透過した＋１次の回折光の偏光面よりも、液晶素子１８１を透過したー１次の回折光の偏光面の方が、検光子１８２が透過させる偏光方向とより一致するように、コントローラ１０９は、＋１次の回折光が透過する部分領域に印加する電圧とー１次の回折光が透過する部分領域に印加する電圧とを調節すればよい。これにより、得られるモアレ縞のコントラストが向上する。

[0089] 第２の実施形態によれば、選択回折素子は、試料に照射する回折光のみを選択的に生じさせることができるので、第２の実施形態による光変調素子は、照明光の利用効率を向上できる。その結果、試料に照射される単位時間当たりの光量が増加するので、第２の実施形態による光変調素子は、顕微鏡装置が個々のモアレ縞の画像を撮影するのに要する時間をより短縮でき、その結果として、試料画像の生成に要する時間をより短縮できる。そのため、第２の実施形態による光変調素子は、生体試料のように、試料が時間経過とともに変化する場合にも好適に利用できる。

[0090] なお、変形例によれば、偏光ビームスプリッタ１７の代わりに、ビームス

プリッタまたはハーフミラーが用いられてもよい。

また他の変形例によれば、空間光変調素子１６は、液晶層の少なくとも一方の表面に、２次元に配列された複数の画素ごとに独立した透明電極を有する、透過型の液晶素子であってもよい。この場合には、照明光は、光軸ＯＡに沿って空間光変調素子１６に入射する。そして空間光変調素子１６によって回折された回折光は、照明光が入射した側の面と反対側であり、かつ、シャッター１８と対向する側の面から出射する。この変形例では、偏光ビームスプリッタは省略されてもよい。

[0091] さらに他の変形例によれば、第２の実施形態による光変調素子においても、偏光面回転素子は、アジマス偏光変換素子であってもよい。

[0092] 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

[0093] １００　顕微鏡装置

１０１　光源

１０２、１０４　コリメータ

１０３、１０３’　光変調素子

１０５　ビームスプリッタ

１０６　対物レンズ

１０７　集光レンズ

１０８　受光素子

１０９　コントローラ

１０、１０’　選択回折素子

１１　回折格子

１２　シャッター

１２１　液晶素子

１２２　検光子

１３　位相変調素子

１３１、１３２　　液晶素子

１４　　偏光面回転素子

１４１、１４２　　液晶素子

１５　　アジマス偏光変換素子

１６　　空間光変調素子

１７　　偏光ビームスプリッタ

１８　　シャッター

１８１　　液晶素子

１８２　　検光子

２０　　液晶層

２０ａ～２０ｇ、３０ａ～３０ｇ、８０ａ～８０ｆ　　部分領域

２１、２２　　透明基板

２３、２４　　透明電極

２５、２６　　配向膜

２７　　液晶分子

２８　　シール材

２９　　鏡枠

# 請求の範囲

[請求項1] 第１の偏光方向に沿った偏光面を持つ直線偏光である照明光を、複数の方向のうちの何れか一つの方向に沿って回折させて複数の次数の回折光を生成し、前記複数の次数の回折光間に位相差を生じさせる選択回折素子と、

前記複数の次数の回折光の偏光面を光軸からの放射方向に対して直交する方向に回転させる偏光面回転素子と、

を有することを特徴とする光変調素子。

[請求項2] 前記選択回折素子は、前記照明光が入射する液晶層を含み、該液晶層により前記複数の次数の回折光間に位相差を生じさせる、請求項１に記載の光変調素子。

[請求項3] 前記選択回折素子は、前記複数の方向のうちの選択された一つの方向に前記照明光を回折させ、かつ、前記複数の次数の回折光間に位相差を生じさせる回折格子を表示させる空間光変調素子を有する、請求項１または２に記載の光変調素子。

[請求項4] 前記選択回折素子は、光が透過する領域が前記複数の方向のそれぞれについての前記複数の次数の回折光のそれぞれが透過する複数の部分領域に分割され、前記複数の部分領域のうち、前記選択された一つの方向に沿って回折された複数の次数の回折光のそれぞれが透過する部分領域以外の部分領域を透過する光を減衰させるシャッター素子をさらに有する、請求項３に記載の光変調素子。

[請求項5] 前記選択回折素子は、

前記照明光を前記複数の方向のそれぞれに沿って回折させる回折素子と、

前記複数の方向のうちの前記一つの方向に沿って回折された複数の次数の回折光を透過させるシャッター素子と、

前記シャッター素子を透過した前記複数の次数の回折光間に位相差を生じさせる、少なくとも一つの第１の液晶素子を有する位相変調

素子と、

を有する請求項１または２に記載の光変調素子。

[請求項6] 前記少なくとも一つの第１の液晶素子は、

前記シャッター素子を透過した前記複数の次数の回折光のそれぞれの偏光方向と平行に配向された液晶分子が封入された第１の液晶層を有し、

前記複数の次数の回折光のうちの第１の次数の回折光が通る前記第１の液晶層の第１の部分領域に印加される第１の電圧と、前記複数の次数の回折光のうちの第２の次数の回折光が通る前記第１の液晶層の第２の部分領域に印加される第２の電圧との差に応じた位相差を、前記第１の次数の回折光と前記第２の次数の回折光との間に生じさせる、

請求項５に記載の光変調素子。

[請求項7] 前記位相変調素子は、前記光軸に沿って配置された二つの前記第１の液晶素子を有し、該二つの第１の液晶素子の前記第１の液晶層のそれぞれの厚さは、当該第１の液晶層において前記第１の次数の回折光と前記第２の次数の回折光との間に生じさせる光路長の差の最大値が前記照明光の波長未満となる厚さである、請求項５または６に記載の光変調素子。

[請求項8] 前記シャッター素子は、

前記第１の偏光方向と第２の偏光方向のなす角を２等分する方向に配向された液晶分子が封入された第２の液晶層を有する第２の液晶素子と、

前記光軸に沿って前記第２の液晶素子よりも前記位相変調素子側に配置され、前記第２の偏光方向に沿った偏光面を持つ直線偏光を透過させ、前記第２の偏光方向と異なる方向に沿った偏光面を持つ直線偏光を遮る検光子とを有し、

前記複数の方向のうちの何れか一つの方向に沿って回折された前

記複数の次数の回折光が通る前記第２の液晶層の部分領域に前記照明光の波長に応じた所定の電圧が印加されることにより、当該部分領域を通る回折光の偏光面を前記第２の偏光方向と平行になるように回転させることで当該方向に沿って回折された前記複数の次数の回折光を透過させる、請求項５～７の何れか一項に記載の光変調素子。

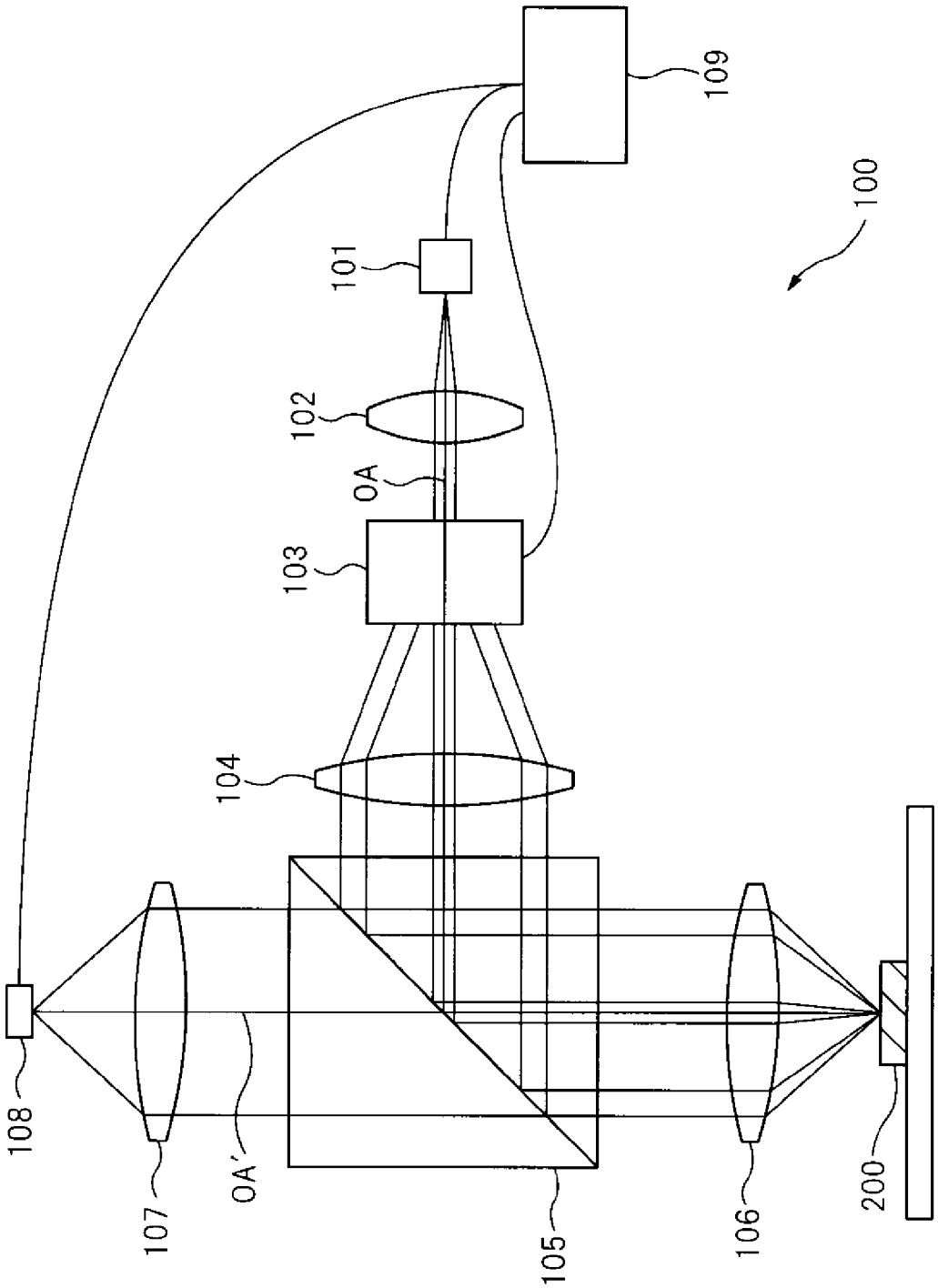
［請求項9］ 前記偏光面回転素子は、前記位相変調素子を透過した前記複数の次数の回折光の偏光面と前記放射方向に直交する方向とを２等分する方向に沿って配向された液晶分子が封入された第３の液晶層を有する第３の液晶素子を有し、

前記第３の液晶素子は、前記第３の液晶層に前記照明光の波長に応じた所定の電圧が印加されることにより、当該第３の液晶層を通る前記複数の次数の回折光の偏光面を前記放射方向に対して直交する方向に回転させる、請求項１～８の何れか一項に記載の光変調素子。

［請求項10］ 前記偏光面回転素子は、前記位相変調素子を透過した前記複数の次数の回折光の偏光面と平行な偏光面を持つ直線偏光をアジマス偏光に変換するアジマス偏光変換素子を有する、請求項１～８の何れか一項に記載の光変調素子。

[図1]

図1



[図2]

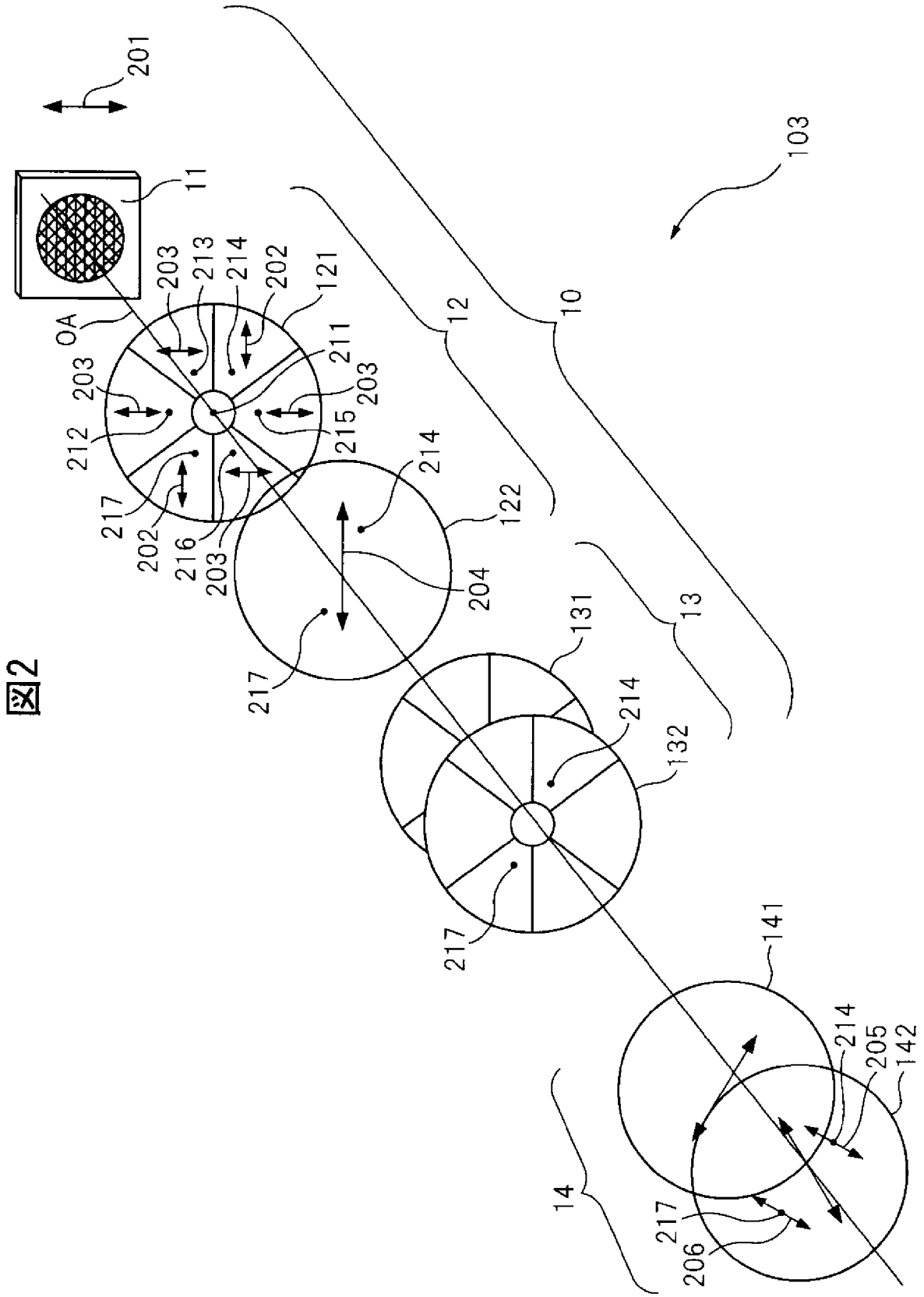
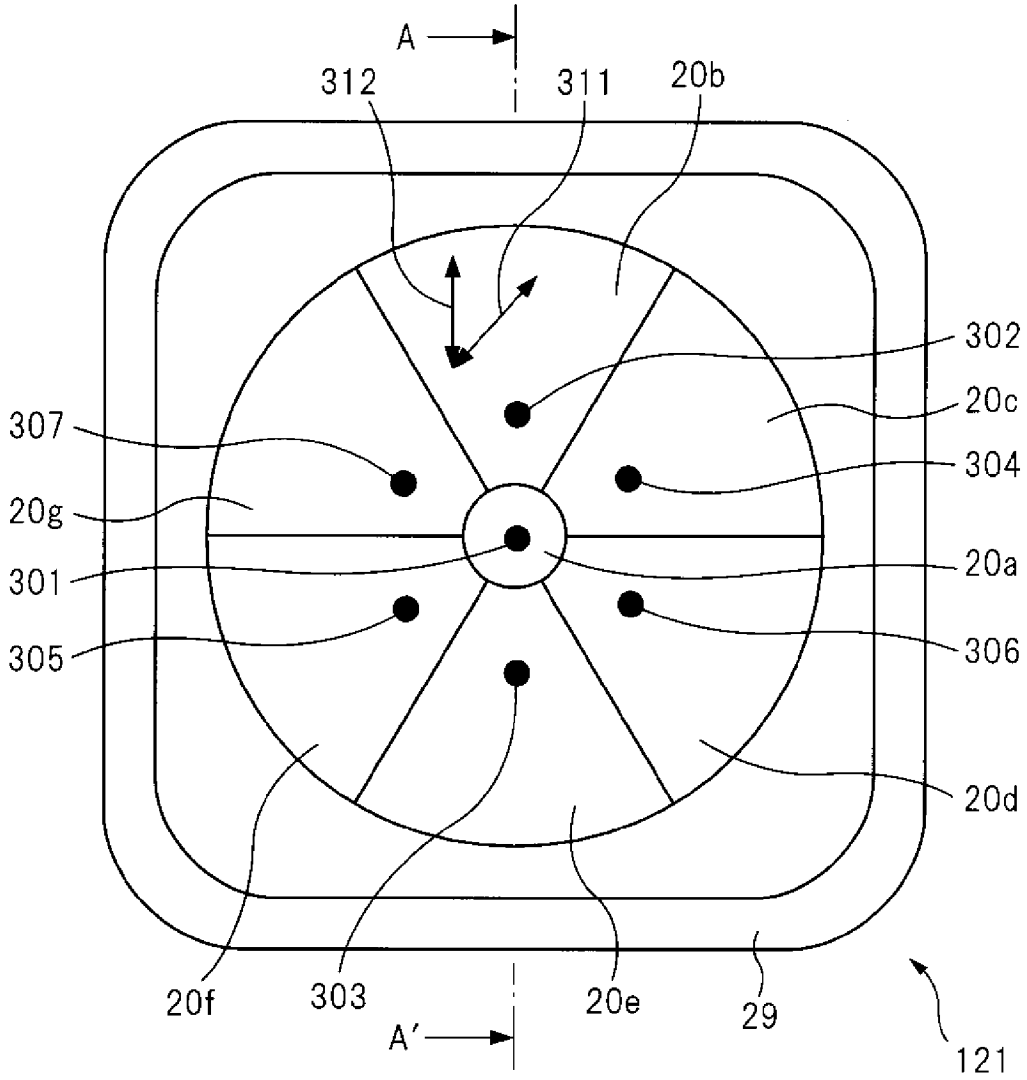

201
11
OA
203
213
214
202
121
211
203
212
215
217
216
204
122
131
132
141
142
205
206
10
12
13
14
103

図2

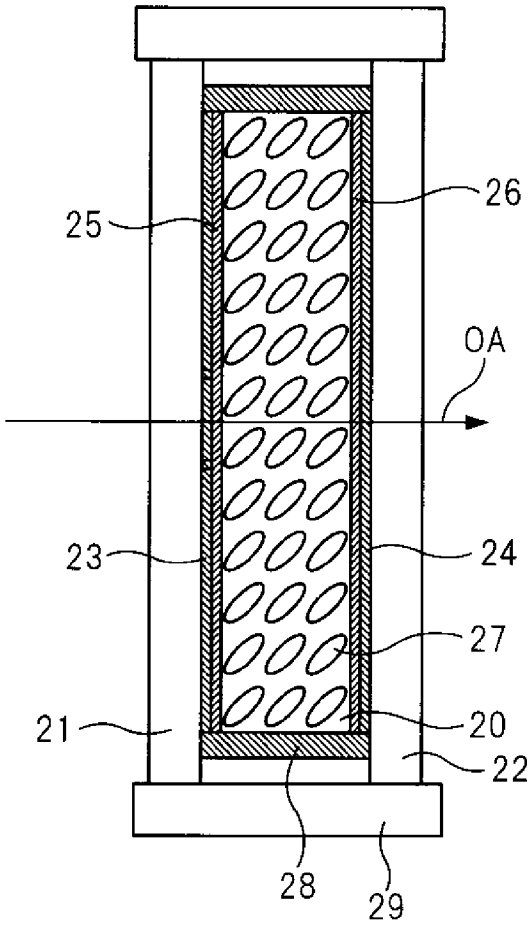
[図3A]

図3A


A
312
311
20b
302
20c
307
304
20g
20a
301
306
305
20d
20f
303
20e
29
A'
121

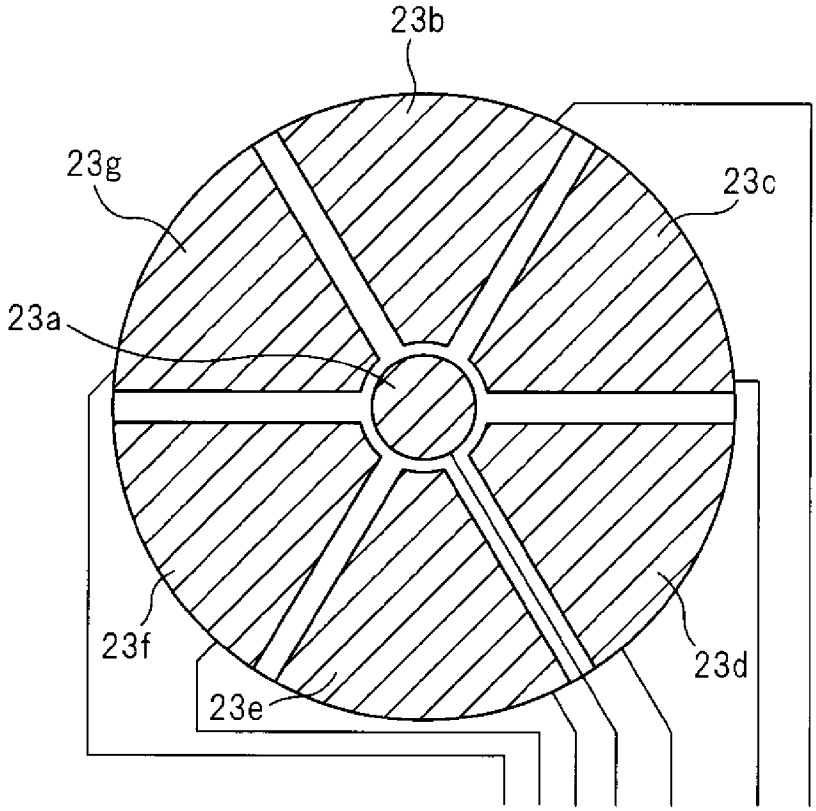
[図3B]

図3B



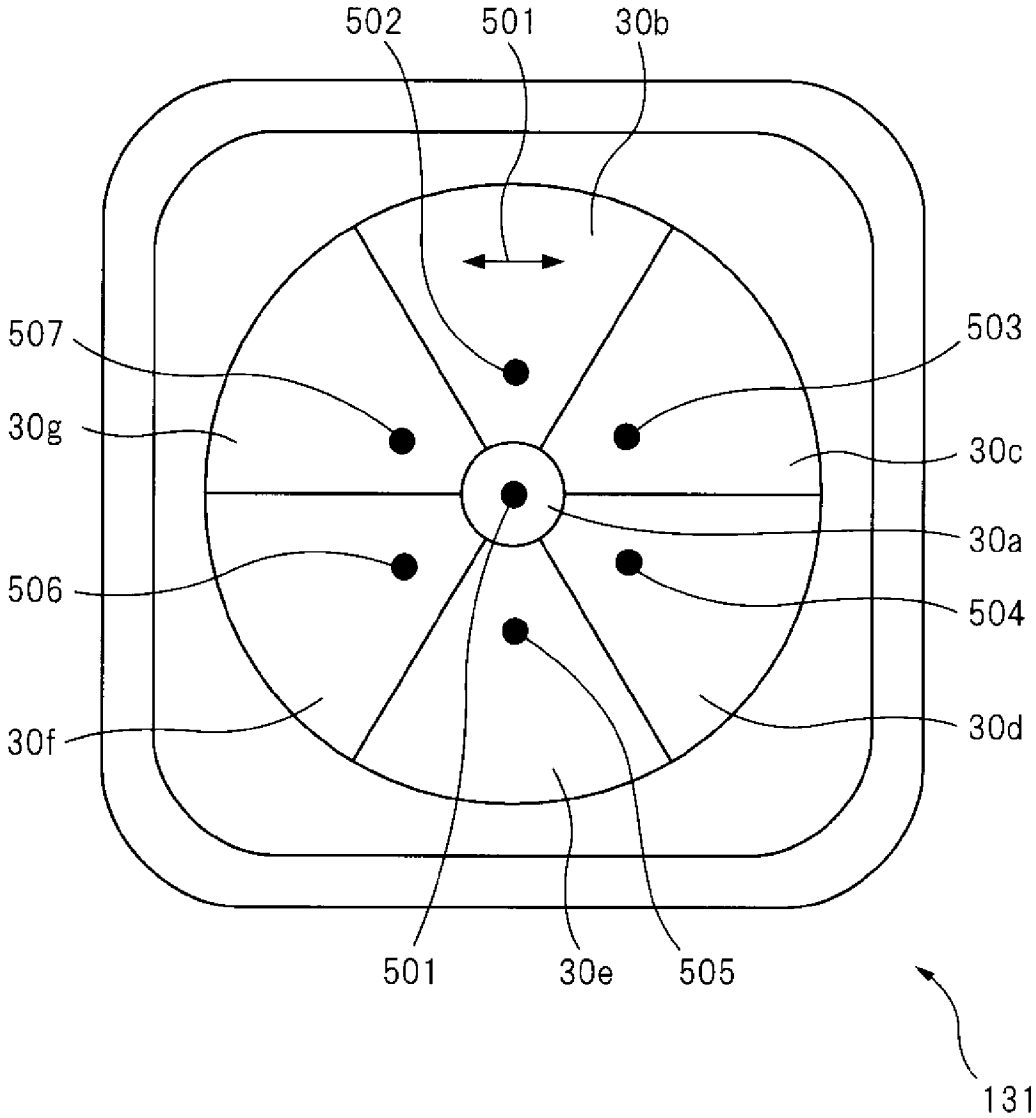
[図4]

図4



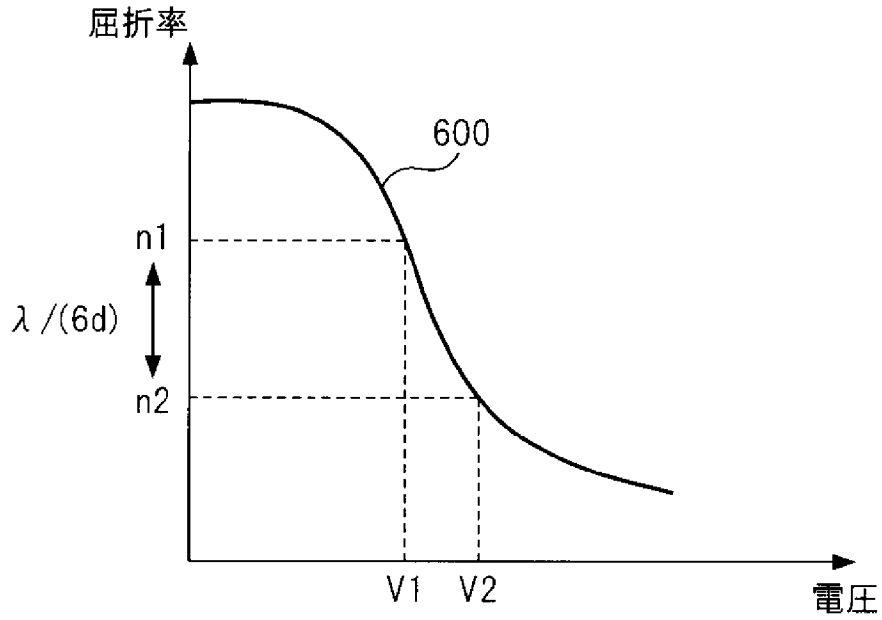
[図5]

図5



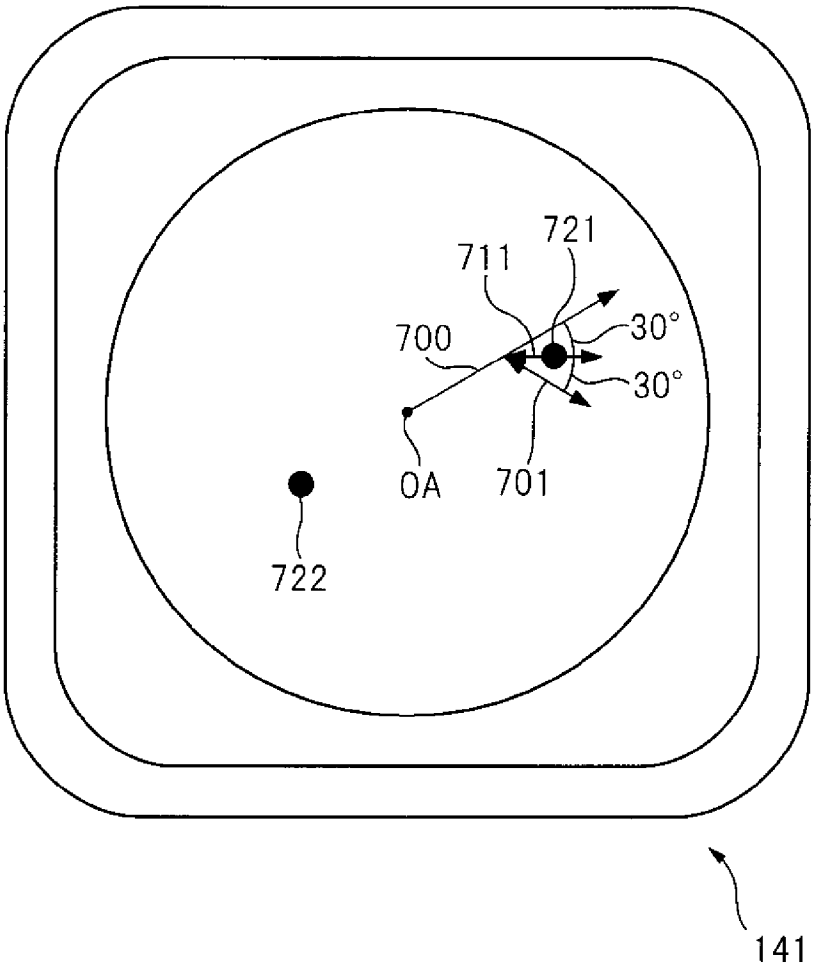
[図6]

図6



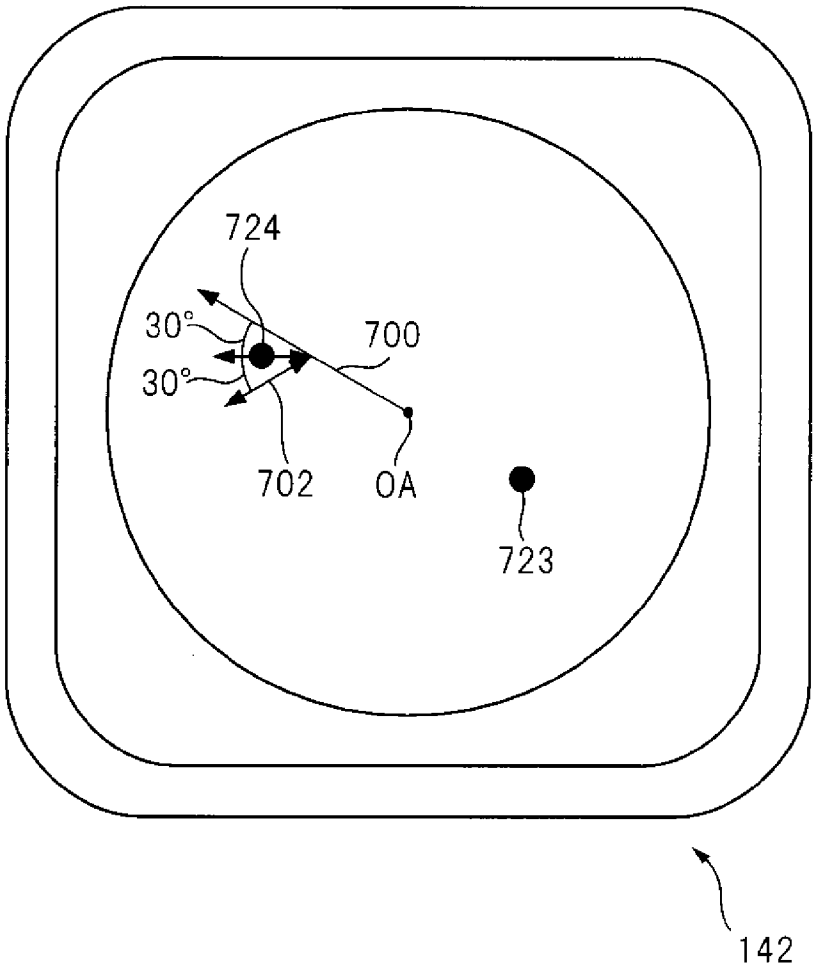
[図7A]

図7A



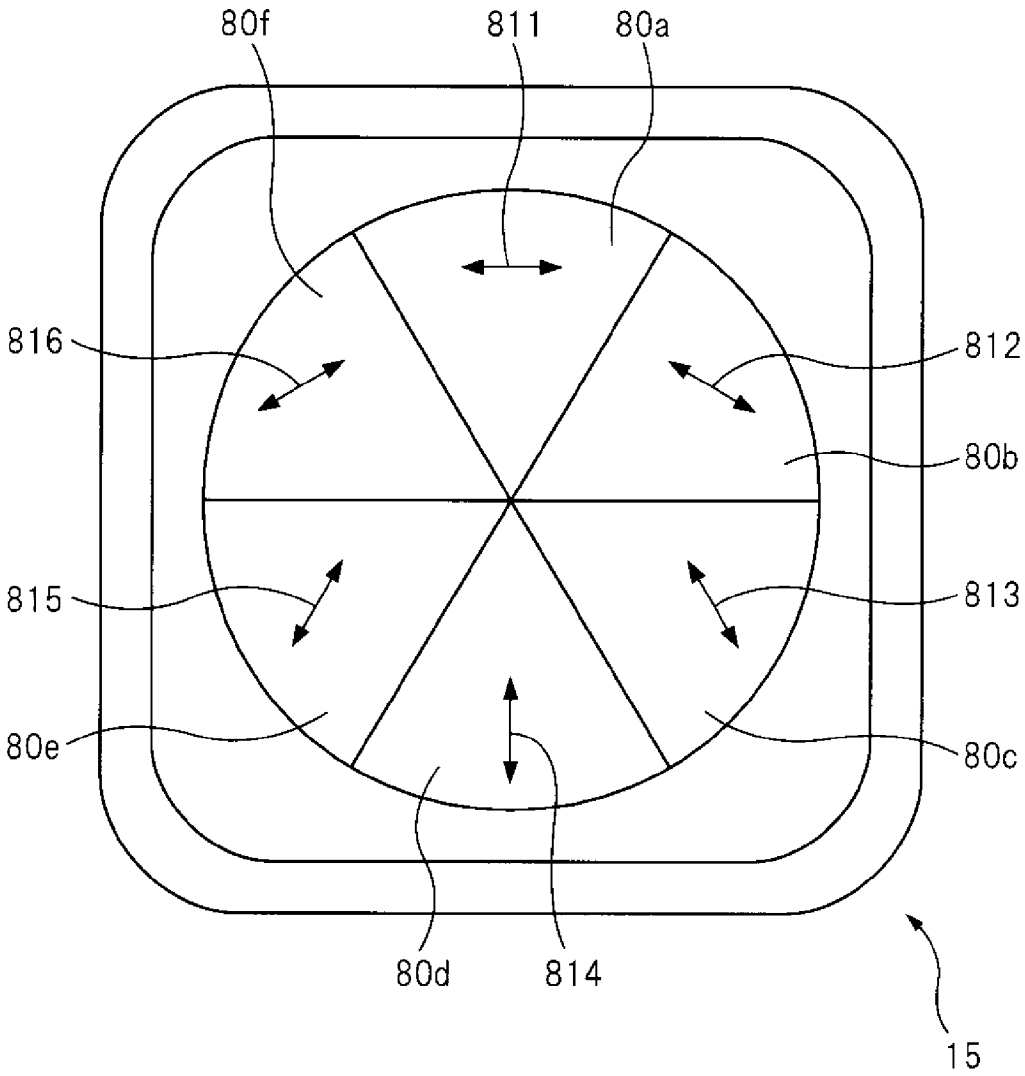
[図7B]

図7B



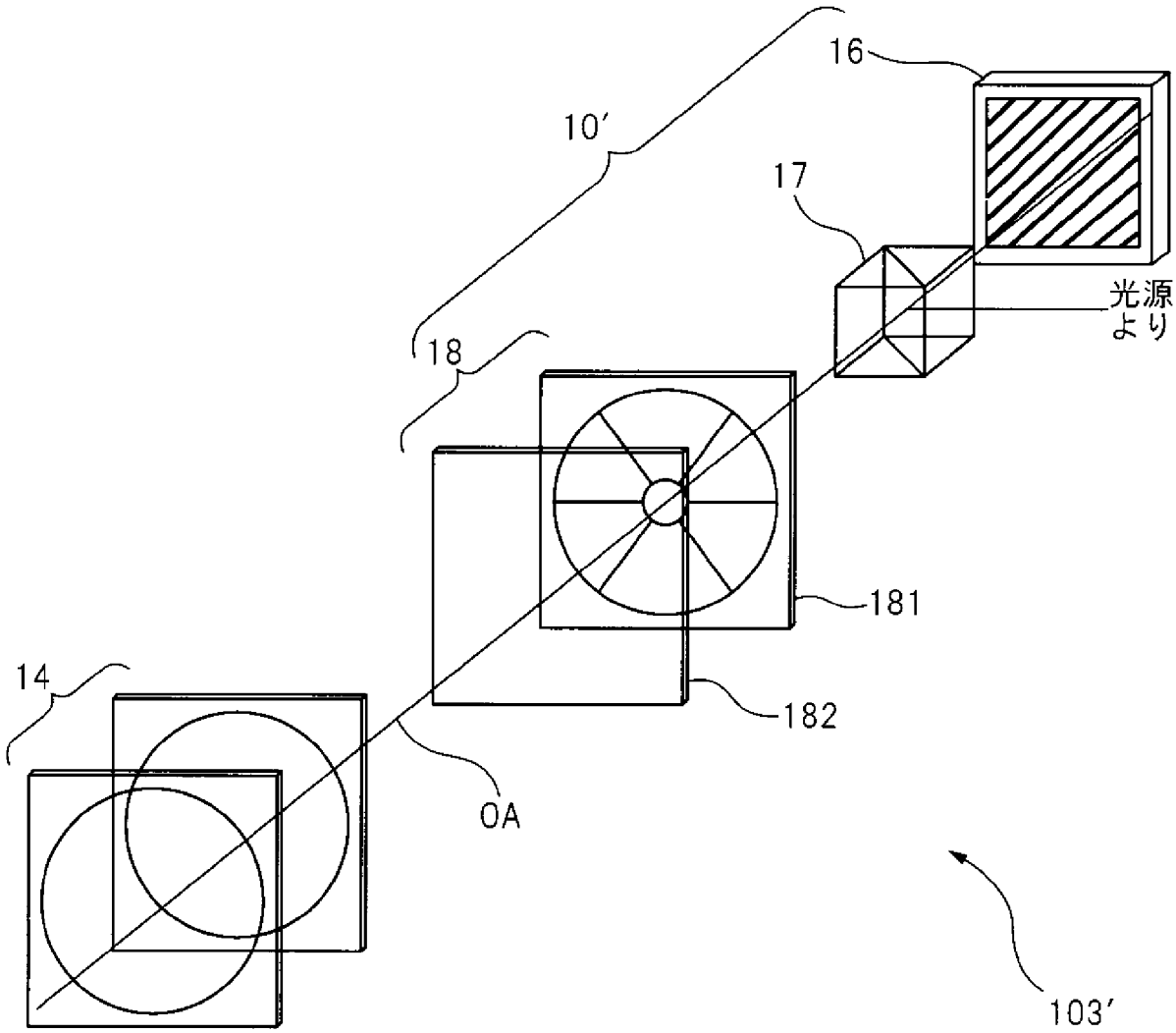
[図8]

図8



[図9]

図9



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2013/079919

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
*G02B21/06*(2006.01)i, *G02B5/18*(2006.01)i, *G02B5/30*(2006.01)i, *G02F1/13*(2006.01)i, *G02F1/1335*(2006.01)i, *G02F1/13363*(2006.01)i, *G02F1/1347*(2006.01)i
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G02B21/06, G02B5/18, G02B5/30, G02F1/13, G02F1/1335, G02F1/13363, G02F1/1347

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2013
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2013 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2013

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| X<br>Y | WO 2011/135819 A1 (Nikon Corp.),<br>03 November 2011 (03.11.2011),<br>1st, 2nd examples<br>& US 2012/0026311 A1 & EP 2565697 A1 | 1<br>2-10 |
| Y | WO 2008/132976 A1 (Nikon Corp.),<br>06 November 2008 (06.11.2008),<br>paragraph [0040]<br>& JP 4835750 B & US 2009/0296205 A1<br>& EP 2136233 A1 | 2-4,9-10 |
| Y | JP 2006-268004 A (Nikon Corp.),<br>05 October 2006 (05.10.2006),<br>1st to 5th carrying-out modes<br>(Family: none) | 2,5-10 |

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

| Date of the actual completion of the international search | Date of mailing of the international search report |
|---|---|
| 25 December, 2013 (25.12.13) | 21 January, 2014 (21.01.14) |
| Name and mailing address of the ISA/<br>Japanese Patent Office<br><br>Facsimile No. | Authorized officer<br><br>Telephone No. |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.
PCT/JP2013/079919

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| Y | WO 2011/105618 A1 (Japan Science and Technology Agency), 01 September 2011 (01.09.2011), entire text; all drawings & US 2012/0314147 A1 & EP 2541299 A1 & CN 102763020 A | 9-10 |
| P,X | WO 2013/001805 A1 (Nikon Corp.), 03 January 2013 (03.01.2013), 1st, 4th carrying-out modes (Family: none) | 1,9-10 |

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１３／０７９９１９

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G02B21/06(2006.01)i, G02B5/18(2006.01)i, G02B5/30(2006.01)i, G02F1/13(2006.01)i, G02F1/1335(2006.01)i, G02F1/13363(2006.01)i, G02F1/1347(2006.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G02B21/06, G02B5/18, G02B5/30, G02F1/13, G02F1/1335, G02F1/13363, G02F1/1347

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

| | |
|---|---|
| 日本国実用新案公報 | １９２２－１９９６年 |
| 日本国公開実用新案公報 | １９７１－２０１３年 |
| 日本国実用新案登録公報 | １９９６－２０１３年 |
| 日本国登録実用新案公報 | １９９４－２０１３年 |

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

Ｃ．　関連すると認められる文献

| 引用文献のカテゴリー＊ | 引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する請求項の番号 |
|---|---|---|
| X<br>Y | WO 2011/135819 A1 (株式会社ニコン) 2011.11.03, 第１，２の実施例 & US 2012/0026311 A1 & EP 2565697 A1 | 1<br>2-10 |
| Y | WO 2008/132976 A1 (株式会社ニコン) 2008.11.06, 段落[0040]等 & JP 4835750 B & US 2009/0296205 A1 & EP 2136233 A1 | 2-4,9-10 |
| Y | JP 2006-268004 A (株式会社ニコン) 2006.10.05, 第１－５実施形態（ファミリーなし） | 2,5-10 |

☑　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☐　パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー
「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「＆」同一パテントファミリー文献

| 国際調査を完了した日 | 国際調査報告の発送日 |
|---|---|
| ２５．１２．２０１３ | ２１．０１．２０１４ |

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
郵便番号１００－８９１５
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

特許庁審査官（権限のある職員）　２Ｖ　４７４８
殿岡　雅仁

電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２７１

Ｃ（続き）．　関連すると認められる文献

| 引用文献のカテゴリー＊ | 引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する請求項の番号 |
|---|---|---|
| Y | WO 2011/105618 A1（独立行政法人科学技術振興機構）2011.09.01, 全文、全図 & US 2012/0314147 A1 & EP 2541299 A1 & CN 102763020 A | 9-10 |
| P,X | WO 2013/001805 A1（株式会社ニコン）2013.01.03, 第１，４実施形態（ファミリーなし） | 1,9-10 |