

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7008974号  
(P7008974)

(45)発行日 令和4年1月25日(2022.1.25)

(24)登録日 令和4年1月14日(2022.1.14)

(51)国際特許分類 F I  
G 0 2 B 21/00 (2006.01) G 0 2 B 21/00  
G 0 1 J 3/44 (2006.01) G 0 1 J 3/44

請求項の数 20 (全27頁)

(21)出願番号	特願2017-157778(P2017-157778)	(73)特許権者	503138134 ナノフoton株式会社 大阪府大阪市北区梅田1丁目1-32 67号
(22)出願日	平成29年8月18日(2017.8.18)	(74)代理人	100103894 弁理士 家入 健
(65)公開番号	特開2019-35882(P2019-35882A)	(74)代理人	100129953 弁理士 岩瀬 康弘
(43)公開日	平成31年3月7日(2019.3.7)	(72)発明者	小林 実 大阪市北区梅田一丁目1番3-267号 ナノフoton株式会社内
審査請求日	令和2年8月3日(2020.8.3)	(72)発明者	河野 省悟 大阪市北区梅田一丁目1番3-267号 ナノフoton株式会社内
		(72)発明者	太田 泰輔

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光学顕微鏡、及び分光測定方法

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

光ビームを発生する光源と、  
前記光ビームを偏向させて、試料上における前記光ビームのスポット位置を走査する第1のスキャナと、  
前記第1のスキャナで偏向された光ビームを集光して、試料に入射させる対物レンズと、  
前記試料の前記光ビームが照射された領域から出射した出射光が入射する入射側にスリットを有する分光器と、  
前記分光器からの出射光を検出する、アレイ状に配列された受光画素を有する2次元アレイ光検出器と、  
前記第1のスキャナから前記対物レンズまでの光路中に配置され、前記第1のスキャナで偏向された光ビームを反射する第1の非軸放物面鏡と、前記第1の非軸放物面鏡で反射された光ビームを反射する第2の非軸放物面鏡と、を備えた第1のリレー光学系と、  
を備え、  
前記スリットの長手方向に対応する第2の方向が、前記第1の非軸放物面鏡の幾何学的な対称軸に対応する方向に沿っている光学顕微鏡。

## 【請求項2】

前記第1の非軸放物面鏡と前記第2の非軸放物面鏡との放物面の幾何学的な対称軸が平行で、かつ、前記放物面が互いに反対方向を向くように配置されている請求項1に記載の光学顕微鏡。

## 【請求項 3】

前記第 1 の非軸放物面鏡の焦点距離と前記第 2 の非軸放物面鏡の焦点距離が同じである請求項 1、又は 2 に記載の光学顕微鏡。

## 【請求項 4】

前記第 1 の非軸放物面鏡と前記第 2 の非軸放物面鏡との間における前記光ビームの焦点から前記第 1 の非軸放物面鏡までの距離を  $L_2$  とし、前記焦点から前記第 2 の非軸放物面鏡までの距離を  $L_3$  とすると、

$L_2$  と  $L_3$  との比が、前記第 1 の非軸放物面鏡の焦点距離と前記第 2 の非軸放物面鏡との比と等しい請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の光学顕微鏡。

## 【請求項 5】

前記第 1 のスキャナから前記第 1 の非軸放物面鏡までの距離を  $L_1$  とし、前記第 2 の非軸放物面鏡から前記対物レンズの入射瞳までの距離を  $L_4$  とすると、

$L_1 = L_2$ 、かつ、 $L_3 = L_4$  となっている請求項 4 に記載の光学顕微鏡。

## 【請求項 6】

光ビームを発生する光源と、

前記光ビームを偏向させて、試料上における前記光ビームのスポット位置を走査する第 1 のスキャナと、

前記第 1 のスキャナで偏向された光ビームを集光して、試料に入射させる対物レンズと、

前記試料の前記光ビームが照射された領域から出射した出射光が入射する入射側にスリットを有する分光器と、

前記分光器からの出射光を検出する、アレイ状に配列された受光画素を有する 2 次元アレイ光検出器と、

前記第 1 のスキャナから前記対物レンズまでの光路中に配置され、前記第 1 のスキャナで偏向された光ビームを反射する第 1 の非軸放物面鏡と、前記第 1 の非軸放物面鏡で反射された光ビームを反射する第 2 の非軸放物面鏡と、を備えた第 1 のリレー光学系と、  
を備え、

前記第 1 のリレー光学系は、

前記第 1 の非軸放物面鏡と前記光ビームの焦点との間に設けられた正のパワーを有する第 1 の補正レンズと、

前記焦点と前記第 2 の非軸放物面鏡との間に設けられた正のパワーを有する第 2 の補正レンズと、をさらに備えた光学顕微鏡。

## 【請求項 7】

前記第 1 の補正レンズから前記焦点までの距離を  $L_5$  とし、前記焦点から前記第 2 の補正レンズまでの距離を  $L_6$  とすると、

$L_5 = L_6$  となっている請求項 6 に記載の光学顕微鏡。

## 【請求項 8】

前記第 1 のスキャナでデスキャンされた前記出射光を前記分光器の前記スリットに集光する集光光学系をさらに備え、

前記集光光学系は、

前記出射光を反射する第 1 の凹面鏡と、

前記第 1 の凹面鏡で反射した出射光を反射する第 1 の凸面鏡と、を備えた請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の光学顕微鏡。

## 【請求項 9】

前記第 1 の凹面鏡と前記第 1 の凸面鏡とは、曲率半径が実質的に等しい球面鏡である請求項 8 に記載の光学顕微鏡。

## 【請求項 10】

前記集光光学系によって結像される前記試料の像面が、前記スリットの入射面に対して傾いている請求項 8、又は 9 に記載の光学顕微鏡。

## 【請求項 11】

前記第 1 の凹面鏡の曲率中心と前記第 1 の凸面鏡の曲率中心とを通る直線が、前記第 1 の

10

20

30

40

50

凹面鏡に入射する前記出射光の基準軸から傾いている請求項 8 ~ 10 のいずれか 1 項に記載の光学顕微鏡。

【請求項 12】

前記光源から前記第 1 のスキャナまでの光路中に配置され、前記光ビームを偏向させて、前記試料上における前記光ビームの前記スポット位置を走査する第 2 のスキャナと、前記第 1 のスキャナと前記第 2 のスキャナとの間の光路中に配置され、前記第 2 のスキャナから前記第 1 のスキャナに向かう光ビームから、前記試料から前記分光器に向かう前記出射光を分離するビームスプリッタと、をさらに備え、  
前記第 1 のスキャナが前記分光器の前記スリットの長手方向と直交する方向に対応する第 1 の方向に前記スポット位置を走査し、  
前記第 2 のスキャナが前記スリットの長手方向に対応する第 2 の方向に前記スポット位置を走査する請求項 1 ~ 11 のいずれか 1 項に記載の光学顕微鏡。

10

【請求項 13】

光ビームを発生する光源と、

前記光ビームを偏向させて、試料上における前記光ビームのスポット位置を走査する第 1 のスキャナと、

前記第 1 のスキャナで偏向された光ビームを集光して、試料に入射させる対物レンズと、  
前記試料の前記光ビームが照射された領域から出射した出射光が入射する入射側にスリットを有する分光器と、

前記分光器からの出射光を検出する、アレイ状に配列された受光画素を有する 2 次元アレイ光検出器と、

20

前記第 1 のスキャナから前記対物レンズまでの光路中に配置され、前記第 1 のスキャナで偏向された光ビームを反射する第 1 の非軸放物面鏡と、前記第 1 の非軸放物面鏡で反射された光ビームを反射する第 2 の非軸放物面鏡と、を備えた第 1 のリレー光学系と、

前記光源から前記第 1 のスキャナまでの光路中に配置され、前記光ビームを偏向させて、前記試料上における前記光ビームの前記スポット位置を走査する第 2 のスキャナと、

前記第 1 のスキャナと前記第 2 のスキャナとの間の光路中に配置され、前記第 2 のスキャナから前記第 1 のスキャナに向かう光ビームから、前記試料から前記分光器に向かう前記出射光を分離するビームスプリッタと、

前記第 2 のスキャナと前記第 1 のスキャナとの間の光路中に配置された第 2 のリレー光学系とを、備え、

30

前記第 1 のスキャナが前記分光器の前記スリットの長手方向と直交する方向に対応する第 1 の方向に前記スポット位置を走査し、

前記第 2 のスキャナが前記スリットの長手方向に対応する第 2 の方向に前記スポット位置を走査し、

前記第 2 のリレー光学系は、

前記第 2 のスキャナからの光ビームを反射する第 2 の凹面鏡と、

前記第 2 の凹面鏡で反射された光ビームを反射する第 2 の凸面鏡と、

前記第 2 の凸面鏡で反射された光ビームを反射する第 3 の凸面鏡と、

前記第 3 の凸面鏡で反射された光ビームを反射する第 3 の凹面鏡と、を備えており、

40

前記第 2 の凸面鏡と前記第 3 の凸面鏡との間にある中間像面に対して、前記第 2 の凹面鏡と前記第 2 の凸面鏡が、前記第 3 の凹面鏡と前記第 3 の凸面鏡と対称に配置されている光学顕微鏡。

【請求項 14】

前記第 2 の凹面鏡と前記第 2 の凸面鏡と前記第 3 の凹面鏡と前記第 3 の凸面鏡とが、曲率半径が実質的に等しい球面鏡である請求項 13 に記載の光学顕微鏡。

【請求項 15】

前記第 2 の凹面鏡の曲率中心と前記第 2 の凸面鏡の曲率中心とを通る直線が、前記第 2 の凹面鏡に入射する前記光ビームの基準軸から傾いており、

前記第 3 の凹面鏡の曲率中心と前記第 3 の凸面鏡の曲率中心とを通る直線が、前記第 3 の

50

凹面鏡で反射された前記光ビームの基準軸から傾いている、請求項 13、又は 14 に記載の光学顕微鏡。

【請求項 16】

前記第 2 のスキャナと前記第 1 のスキャナとの間の光路中に配置された第 2 のリレー光学系をさらに備え、

前記光源は、異なるレーザ波長のレーザ光を切替えて使用可能であり、

前記レーザ光の光路には、集光度合い又は発散度合いを調整するビームエキスパンダが設けられており、

前記第 2 のリレー光学系は、

前記第 2 のスキャナからの光ビームを屈折する第 1 のリレーレンズと、

前記第 1 のリレーレンズからの光ビームを屈折して平行光とし、前記第 1 のスキャナに入射させる第 2 のリレーレンズと、

前記第 1 のリレーレンズと第 2 のリレーレンズとの間に配置された絞りと、を備えた請求項 12 に記載の光学顕微鏡。

10

【請求項 17】

前記第 1 のスキャナの直前に配置され、試料上における前記光ビームの前記スポット位置を前記第 2 の方向に走査する第 3 のスキャナをさらに備え、

前記第 1 のリレー光学系の歪曲収差により生じるスポット位置の変化を打ち消すように、

前記第 1 のスキャナの角度に応じて、前記第 3 のスキャナが第 2 の方向に光ビームを走査する請求項 12 ~ 16 のいずれか 1 項に記載の光学顕微鏡。

20

【請求項 18】

前記第 1 のリレー光学系で生じる歪曲収差を補正する処理装置をさらに備え、

前記試料上における前記光ビームのスポットが前記第 2 の方向に沿ってライン状に伸びており、

前記 2 次元アレイ光検出器では、前記ライン状の領域からの出射光を検出する複数の画素が配列されており、

前記複数の画素が検出した 1 次元の測定データを補間することで、歪曲収差を補正する請求項 12 ~ 16 のいずれか 1 項に記載の光学顕微鏡。

【請求項 19】

前記第 2 のスキャナにおける光ビームの断面形状を前記第 2 の方向に縮める光学部材をさらに備えた請求項 13 ~ 18 のいずれか 1 項に記載の光学顕微鏡。

30

【請求項 20】

光源からの光ビームを第 1 のスキャナによって偏向させ、

第 1 のリレー光学系を介して、前記第 1 のスキャナからの前記光ビームを対物レンズに入射させ、

前記光ビームを前記対物レンズで集光して試料に照射し、

前記試料から出射した出射光を、前記対物レンズで集光し、

前記対物レンズからの出射光を分光器で分光し、

前記分光器で分光された出射光を検出することで分光測定する分光測定方法であって、

前記第 1 のリレー光学系は、前記第 1 のスキャナから前記対物レンズまでの光路中に配置され、前記第 1 のスキャナで偏向された光ビームを反射する第 1 の非軸放物面鏡と、前記第 1 の非軸放物面鏡で反射された光ビームを反射する第 2 の非軸放物面鏡と、を備え、

前記分光器のスリットの長手方向に対応する第 2 の方向が、前記第 1 の非軸放物面鏡の幾何学的な対称軸に対応する方向に沿っている分光測定方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光学顕微鏡、及び分光測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

50

ラマン分光測定は、試料が気体、液体、結晶、非晶質であることを問わず、温度は高温でも低温でも可能であり、測定において、真空などの特殊な測定雰囲気が必要としないという利点を持つ。さらに、試料の前処理を特に必要とせず、試料をそのままの状態でも測定可能であるなどの長所があり、これらの長所を生かした測定が多くなされている。ラマン分光測定を利用することによって、物質の同定、濃度測定、結晶性、応力等が測定できる。

#### 【0003】

このようなラマン分光測定を行うための光学顕微鏡が開示されている（特許文献1、2）。特許文献1の光学顕微鏡では、試料にレーザー光を集光して照射している。そして、試料からのラマン散乱光を分光器で分光することにより、ラマンスペクトルを測定する。さらに、この光学顕微鏡では、レーザー光を偏向させて、試料におけるビームスポットを走査させて測定することにより、試料の特定の領域内におけるスペクトルの分布を測定することができる。また、測定時間を短縮するためビームスポットを1方向に伸ばして走査し、試料をライン状に照明して、CCDカメラにより検出している。ライン状に照明しているため一度に広い領域を照射することができ、測定時間を短縮することができ、ビームスポットを伸ばすことで試料の損傷を防いでいる。

10

#### 【先行技術文献】

#### 【特許文献】

#### 【0004】

【文献】特開2007-179002号公報

特開2010-127726号公報

20

米国特許第4997242号

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0005】

しかしながら、特許文献1の光学顕微鏡では光ビームをレンズによって屈折させるために、色収差が生じ、広い波長帯域での測定が困難である問題があった。具体的には、特許文献1の図1に示す構成において、200nmの深紫外領域から2000nmの近赤外領域で共通の光学系を用いようとした場合、レンズを含む光学系において色収差が生じる。例えば、Y走査装置13で偏向された光ビームをX走査ミラー18に導くためのレンズ14、16（以下、リレー光学系Aと呼ぶ）、X走査ミラー18で反射された光ビームを対物レンズ21に導くためのレンズ19、20（以下、リレー光学系Bと呼ぶ）、試料22からの出射光を入射スリット30に集光させるレンズ24（以下、集光光学系と呼ぶ）において、色収差が生じる。

30

#### 【0006】

特許文献1では、リレー光学系A、リレー光学系B、及び集光光学系で生じる色収差を回折限界近くまで補正することが困難である。これは、一般にレンズにおける色収差は、複数種類のレンズ材料を組み合わせることによって補正されるが、200nmからの深紫外領域を含めての色収差補正は、多くの光学ガラスが深紫外領域で不透明であるために使用できず、使用可能なレンズ材料が合成石英ガラスやフッ化カルシウムなど少ない種類に限定されるためである。

40

#### 【0007】

本発明は上述の問題点を鑑みてなされたものであり、収差を低減することができる光学顕微鏡、及び分光測定方法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】

本発明の一態様にかかる光学顕微鏡は、光ビームを発生する光源と、前記光ビームを偏向させて、試料上における前記光ビームのスポット位置を走査する第1のスクアナと、前記第1のスクアナで偏向された光ビームを集光して、試料に入射させる対物レンズと、前記試料の前記光ビームが照射された領域から出射した出射光が入射する入射側にスリットを有する分光器と、前記分光器からの出射光を検出する、アレイ状に配列された受光画素を

50

有する 2 次元アレイ光検出器と、前記第 1 のスキャナから前記対物レンズまでの光路中に配置され、前記第 1 のスキャナで偏向された光ビームを反射する第 1 の非軸放物面鏡と、前記第 1 の非軸放物面鏡で反射された光ビームを反射する第 2 の非軸放物面鏡と、を備えた第 1 のリレー光学系と、を備えたものである。この構成により収差を低減することができる。

【 0 0 0 9 】

上記の光学顕微鏡は、出射光を波長に応じて空間的に分散させる分光器をさらに有してもよい。

【 0 0 1 0 】

上記の光学顕微鏡において、前記第 1 の非軸放物面鏡と前記第 2 の非軸放物面鏡との放物面の幾何学的な対称軸が平行で、かつ、前記放物面が互いに反対方向を向くように配置されていてもよい。

10

【 0 0 1 1 】

上記の光学顕微鏡において、前記第 1 の非軸放物面鏡の焦点距離と前記第 2 の非軸放物面鏡の焦点距離が同じであってもよい。

【 0 0 1 2 】

上記の光学顕微鏡において、前記第 1 の非軸放物面鏡と前記第 2 の非軸放物面鏡との間における前記光ビームの焦点から前記第 1 の非軸放物面鏡までの距離を  $L_2$  とし、前記焦点から前記第 2 の非軸放物面鏡までの距離を  $L_3$  とすると、 $L_2$  と  $L_3$  との比が、前記第 1 の非軸放物面鏡の焦点距離と前記第 2 の非軸放物面鏡の焦点距離との比と等しくなっている。

20

【 0 0 1 3 】

上記の光学顕微鏡において、前記第 1 のスキャナから前記第 1 の非軸放物面鏡までの距離を  $L_1$  とし、前記第 2 の非軸放物面鏡から前記対物レンズの入射瞳までの距離を  $L_4$  とすると、 $L_1 = L_2$ 、かつ、 $L_3 = L_4$  となってもよい。これにより、光ビームが、対物レンズの入射瞳のほぼ中心を通ることができるため、測定領域全体で、レーザ強度や空間分解能の変化を抑制することができる。

【 0 0 1 4 】

上記の光学顕微鏡において、前記第 1 のリレー光学系は、前記第 1 の非軸放物面鏡と前記光ビームの焦点との間に設けられた正のパワーを有する第 1 の補正レンズと、前記焦点と前記第 2 の非軸放物面鏡との間に設けられた正のパワーを有する第 2 の補正レンズと、をさらに備えていてもよい。これにより、収差を低減することができる。

30

【 0 0 1 5 】

上記の光学顕微鏡において、前記第 1 の補正レンズから前記焦点までの距離を  $L_5$  とし、前記焦点から前記第 2 の補正レンズまでの距離を  $L_6$  とすると、 $L_5 = L_6$  となっていることが好ましい。

【 0 0 1 6 】

上記の光学顕微鏡は、前記第 1 のスキャナでデスキャンされた前記出射光を前記分光器のスリットに集光する集光光学系をさらに備え、前記集光光学系は、前記出射光を反射する第 1 の凹面鏡と、前記第 1 の凹面鏡で反射した出射光を反射する第 1 の凸面鏡と、を備えていてもよい。これにより、非点収差を補正することができる。

40

【 0 0 1 7 】

上記の光学顕微鏡において、前記第 1 の凹面鏡と前記第 1 の凸面鏡とは、曲率半径が実質的に等しい球面鏡であってもよい。これにより、ペッツパウル和を小さくすることができ、像面湾曲を小さくすることができる。

【 0 0 1 8 】

上記の光学顕微鏡において、前記集光光学系によって結像される前記試料の像面が、前記スリットの入射面に対して傾いていてもよい。これにより、ゴースト像の発生を抑制することができる。

【 0 0 1 9 】

50

上記の光学顕微鏡において、前記第1の凹面鏡の曲率中心と前記第1の凸面鏡の曲率中心とを通る直線が、前記第1の凹面鏡に入射する前記出射光の基準軸から傾いていてもよい。

【0020】

上記の光学顕微鏡は、前記光源から前記第1のスキヤナまでの光路中に配置され、前記光ビームを偏向させて、前記試料上における前記光ビームの前記スポット位置を走査する第2のスキヤナと、前記第1のスキヤナと前記第2のスキヤナとの間の光路中に配置され、前記第2のスキヤナから前記第1のスキヤナに向かう光ビームから、前記試料から前記分光器に向かう前記出射光を分離するビームスプリッタと、をさらに備え、前記第1のスキヤナが前記分光器の前記スリットの長手方向と直交する方向に対応する第1の方向に前記スポット位置を走査し、前記第2のスキヤナが前記スリットの長手方向に対応する第2の方向に前記スポット位置を走査するようにしてもよい。

10

【0021】

上記の光学顕微鏡は、前記第2のスキヤナと前記第1のスキヤナとの間の光路中に配置された第2のリレー光学系をさらに備え、前記第2のリレー光学系は、前記第2のスキヤナからの光ビームを反射する第2の凹面鏡と、前記第2の凹面鏡で反射された光ビームを反射する第2の凸面鏡と、前記第2の凸面鏡で反射された光ビームを反射する第3の凸面鏡と、前記第3の凸面鏡で反射された光ビームを反射する第3の凹面鏡と、を備えており、前記第2の凸面鏡と前記第3の凸面鏡との間にある中間像面に対して、前記第2の凹面鏡と前記第2の凸面鏡が、前記第3の凹面鏡と前記第3の凸面鏡と対称に配置されていてもよい。これにより、コマ収差、歪曲収差、非点収差を補正することができる。

20

【0022】

上記の光学顕微鏡において、前記第2の凹面鏡と前記第2の凸面鏡と前記第3の凹面鏡と前記第3の凸面鏡とが、曲率半径が実質的に等しい球面鏡であってもよい。像面湾曲を補正することができる。

【0023】

上記の光学顕微鏡において、前記第2の凹面鏡の曲率中心と前記第2の凸面鏡の曲率中心とを通る直線が、前記第2の凹面鏡に入射する前記光ビームの基準軸から傾いており、前記第3の凹面鏡の曲率中心と前記第3の凸面鏡の曲率中心とを通る直線が、前記第3の凹面鏡で反射された前記光ビームの基準軸から傾いていてもよい。

【0024】

上記の光学顕微鏡は、前記第2のスキヤナと前記第1のスキヤナとの間の光路中に配置された第2のリレー光学系をさらに備え、前記光源は、異なるレーザ波長のレーザ光を切替えて使用可能であり、前記レーザ光の光路には、集光度合い又は発散度合いを調整するビームエキスパンダが設けられており、前記第2のリレー光学系は、前記第2のスキヤナからの光ビームを屈折する第1のリレーレンズと、前記第1のリレーレンズからの光ビームを屈折して平行光とし、前記第1のスキヤナに入射させる第2のリレーレンズと、前記第1のリレーレンズと第2のリレーレンズとの間に配置された絞りと、を備えていてもよい。これにより、色収差を補正することができる。

30

【0025】

上記の光学顕微鏡は、前記第1のスキヤナの直前に配置され、試料上における前記光ビームの前記スポット位置を前記第2の方向に走査する第3のスキヤナをさらに備え、前記第1のリレー光学系の歪曲収差により生じるスポット位置の変化を打ち消すように、前記第1のスキヤナの角度に応じて、前記第3のスキヤナが第2の方向に光ビームを走査するようにしてもよい。これにより、歪曲収差を補正することができる。

40

【0026】

上記の光学顕微鏡は、前記第1のリレー光学系で生じる歪曲収差を補正する処理装置をさらに備え、前記試料上における前記光ビームのスポットが前記第2の方向に沿ってライン状に伸びており、前記2次元アレイ光検出器では、前記ライン状の領域からの出射光を検出する複数の画素が配列されており、前記複数の画素が検出した1次元の測定データを補間することで、歪曲収差を補正するようにしてもよい。これにより、簡便に歪曲収差を補

50

正することができる。

【 0 0 2 7 】

上記の光学顕微鏡は、前記第 2 のスキャナにおける光ビームのビーム断面形状を前記第 2 の方向に縮める光学部材をさらに備えていてもよい。これにより、試料の損傷を抑制することができる。

【 0 0 2 8 】

上記の光学顕微鏡は、前記スリットの長手方向に対応する第 2 の方向が、前記第 1 の非軸放物面鏡の幾何学的な対称軸に対応する方向に沿っていてもよい。

【 0 0 2 9 】

本実施の形態にかかる分光測定装置は、光ビームを第 1 のスキャナによって偏向させ、第 1 のリレー光学系を介して、前記第 1 のスキャナからの前記光ビームを対物レンズに入射させ、前記光ビームを前記対物レンズで集光して試料に照射し、前記試料から出射した出射光を、前記対物レンズで集光し、前記対物レンズからの出射光を分光器で分光し、前記分光器で分光された出射光を検出することで分光測定する分光測定方法であって、前記第 1 のリレー光学系は、前記第 1 のスキャナから前記対物レンズまでの光路中に配置され、前記第 1 のスキャナで偏向された光ビームを反射する第 1 の非軸放物面鏡と、前記第 1 の非軸放物面鏡で反射された光ビームを反射する第 2 の非軸放物面鏡と、を備えているものである。これにより、収差を低減することができる。

10

【発明の効果】

【 0 0 3 0 】

本発明によれば、収差を低減することができる光学顕微鏡、及び分光測定方法を提供することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【 0 0 3 1 】

【図 1】本実施の形態にかかる光学顕微鏡の構成を示す図である。

【図 2】リレー光学系の構成を示す図である。

【図 3】リレー光学系の変形例の構成を示す図である。

【図 4】集光光学系の構成を示す図である。

【図 5】リレー光学系 2 0 0 の構成を示す図である。

【図 6】光源の構成を示す図である。

30

【図 7】図 3 の光学系で生じる歪曲収差を説明するための図である。

【図 8】歪曲収差を低減するための構成を示す図である。

【図 9】歪曲収差の補正を説明するための図である。

【図 1 0】歪曲収差の補正を説明するための図である。

【図 1 1】ビーム断面形状を 1 方向に縮めるための構成を示す図である。

【図 1 2】ビーム断面形状を 1 方向に縮めるための別の構成を示す図である。

【図 1 3】ビーム断面形状を 1 方向に縮めるための別の構成を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 3 2 】

以下に、本発明を適用可能な実施の形態が説明される。以下の説明は、本発明の実施形態を説明するものであり、本発明が以下の実施形態に限定されるものではない。説明の明確化のため、以下の記載は、適宜、省略及び簡略化がなされている。又、当業者であれば、以下の実施形態の各要素を、本発明の範囲において容易に変更、追加、変換することが可能であろう。尚、各図において同一の符号を付されたものは同様の要素を示しており、適宜、説明が省略される。

40

【 0 0 3 3 】

本発明の実施の形態にかかる光学顕微鏡について図 1 を用いて説明する。図 1 は本実施の形態にかかる光学顕微鏡 1 0 0 の光学系の全体構成を模式的に示す図である。光学顕微鏡 1 0 0 は、試料 2 2 を観察するための構成として、光源 1 0 と、ビームエキスパンダ 1 1 と、Y 走査装置 1 3 と、第 1 のリレー光学系 2 0 0 と、ビームスプリッタ 1 7 と、X 走査

50

ミラー 18 と、第 2 のリレー光学系 300、対物レンズ 21 と、ステージ 23 と、集光光学系 400 と、分光器 31 と、検出器 32 と、ステージ駆動装置 40 と、処理装置 50 とを備えている。また分光器 31 は入射側に入射スリット 30 を備えている。X 走査ミラー 18、及び Y 走査装置 13 による走査角度が変わる場合でも、基準軸（光軸）を Z 軸として、光の進行方向を正、X 軸と Y 軸を左手系にとる。X 走査ミラー 18、及び Y 走査装置 13 による走査角度が変わる場合でも Z 軸は一定とする。

#### 【0034】

光学顕微鏡 100 はラマン顕微鏡であり、光源 10 からの光ビームを試料 22 に入射させ、試料 22 からのラマン散乱光を検出器 32 で検出する。さらに、ラマン散乱光を分光器 31 で分光するため、ラマンスペクトルを分光測定することができる。さらに、光学顕微鏡 100 では、XY 方向（水平方向）及び Z 方向（鉛直方向）に走査することができるため、3次元のラマンスペクトルイメージを測定することができる。

10

#### 【0035】

まず、光学顕微鏡 100 の全体構成について図 1 を参照して説明する。光源 10 は単色のレーザー光を出射するレーザー光源である。光源 10 には、例えば、スペクトラフィジックス社製 Millennia を用いることができる。この光源 10 はレーザー波長 532 nm、線幅 0.24 nm、最大出力が 10 W の Nd/YVO4 レーザである。光源 10 はこのレーザー波長を有するレーザー光を出射する。さらに、光源 10 として複数のレーザー光源を用いて、分光測定したい帯域に応じてレーザー波長を切り替えて用いることも可能である。すなわち、異なるレーザー波長のレーザー光を切替えて使用可能な光源 10 を用いることも可能である。

20

#### 【0036】

光源 10 からの光ビームはビームエキスパンダ 11 によって拡大され、Y 走査装置 13 に入射する。Y 走査装置 13 は、例えば、音響光学素子や、ガルバノミラーであり、入射した光ビームの出射角を変化させて、光ビームを偏向させる。これにより、試料 22 上で光ビームの入射位置が Y 方向に沿って変化する。すなわち、Y 走査装置 13 は、光ビームを Y 方向に走査する。なお、Y 走査装置 13 での偏向角は、処理装置 50 からの電気信号によって制御される。Y 走査装置 13 で偏向された光ビームは、リレー光学系 200 に入射する。リレー光学系 200 の詳細については後述する。

#### 【0037】

リレー光学系 200 からの光ビームは、ビームスプリッタ 17 に入射する。ビームスプリッタ 17 は、例えば、ダイクロイックミラーであり、レーザー波長の光を試料 22 の方向に反射する。ダイクロイックミラーとしては、Semrock 社製のエッジフィルタを用いることができる。ビームスプリッタ 17 により反射された光は、X 走査ミラー 18 に入射する。X 走査ミラー 18 は、例えば、ガルバノミラーであり、反射面の角度が変化することによって、光ビームを偏向させる。すなわち、光軸に対する X 走査ミラー 18 の反射面の傾斜角度が変化するため、光ビームの出射角を変化させることができる。これにより、試料 22 上で光ビームの入射位置が X 方向に沿って変化する。これにより、光ビームを X 方向に走査することができる。なお、X 走査ミラー 18 での偏向角は、処理装置 50 からの電気信号によって制御される。また、X 方向と Y 方向とは互いに直交する方向であるため、X 走査ミラー 18 及び Y 走査装置 13 によって XY 方向に走査することにより、試料 22 上において 2次元領域を走査することができる。

30

40

#### 【0038】

X 走査ミラー 18 によって走査された光ビームは、リレー光学系 300 に入射する。リレー光学系 300 の詳細については後述する。リレー光学系 300 からの光ビームは、対物レンズ 21 に入射する。対物レンズ 21 は、光ビームを集光して、試料 22 上に入射させる。すなわち、対物レンズ 21 は、試料 22 上に光ビームを集光して、試料 22 を照明する。これにより、試料 22 のスポット状の領域が照明される。対物レンズ 21 としては、後述するようにシュヴァルトシルト型の反射対物レンズを用いることができる。あるいは、レボルバなどに取り付けられた複数の対物レンズをレーザー波長に応じて、切替えるよう

50

にしてもよい。

【0039】

試料22に入射した入射光の一部はラマン散乱される。試料22に入射した入射光のうち、ラマン散乱により対物レンズ21側に出射した光を出射光とする。すなわち、ラマン散乱光のうち、対物レンズ21に入射したものを出射光とする。ラマン散乱された出射光は入射光とは異なる波長となっている。すなわち、ラマンシフトによって出射光は入射光の振動数からずれて散乱される。この出射光のスペクトルがラマンスペクトルとなる。したがって、出射光のスペクトルを測定することにより、試料22中に含まれる物質の化学構造及び物理的状态を特定することができる。すなわち、ラマンスペクトルには、試料22を構成する物質の振動数の情報が含まれるため、出射光を分光器31で分光して検出することにより、試料22中の物質を特定することができる。

10

【0040】

そして、入射光の焦点位置をXYZ方向にスキャンして試料22の全面又は一部の領域からの出射光のスペクトルを測定することにより、ラマンスペクトルの3次元測定を行うことができる。測定したラマンスペクトルのうち、特定の波長に注目することにより、特定の物質の3次元空間分布の測定も可能となる。具体的には、試料22を生体細胞とした場合、核酸や脂質の空間分布を測定することができる。

【0041】

なお、試料22はステージ23の上に載置されている。ステージ23は、例えば、XYZステージである。このステージ23はステージ駆動装置40によって、駆動される。ステージ駆動装置40がステージ23をXY方向に駆動することによって、試料22の任意の位置を照明することができる。また、ステージ駆動装置40がステージをZ方向に駆動することによって、対物レンズ21と試料22との距離を変化させることができる。従って、対物レンズ21の焦点位置を光軸方向に沿って変化させることができる。本発明にかかる光学顕微鏡100は、後述するようにレーザコンフォーカル顕微鏡を構成しているため、焦点位置を変化させることによって、Z方向の走査が可能となる。すなわち、Z方向にステージを移動させることによって、試料22の断層画像を撮像することができる。試料22の任意の高さからのラマン散乱光の検出することができ、3次元のラマンスペクトルイメージの測定が可能になる。処理装置50はステージ駆動装置40に対して制御信号を入力し、ステージ23の駆動を制御する。

20

30

【0042】

ステージ23上に載置された試料22でラマン散乱され、対物レンズ21に入射した出射光は、入射光と同じ光路上を伝播していく。すなわち、対物レンズ21により屈折又は反射され、リレー光学系300を介して、X走査ミラー18に入射する。X走査ミラー18は、入射した出射光をビームスプリッタ17の方向に反射する。このとき、出射光は、X走査ミラー18によってデスキャンされる。すなわち、出射光は、X走査ミラー18で反射されることによって、出射光は、光源10からX走査ミラー18に入射した入射光の進行方向と反対方向に伝播する。また、試料22からのレーリー散乱光もラマン散乱光と同じ光路で伝播していく。

【0043】

X走査ミラー18によって、反射された出射光は、ビームスプリッタ17に入射する。ビームスプリッタ17は、例えば、ダイクロイックミラーであり、試料22からの出射光と、光源10から試料22に入射する入射光とを波長に基づいて分岐する。すなわち、ビームスプリッタ17は、その反射面が入射光の光軸に対して傾いて設けられている。試料22からの出射光がビームスプリッタ17を透過することによって、試料22からの出射光の光軸が、光源10から試料22に入射する入射光の光軸と異なるものとなる。よって、試料22からの出射光を、光源10から試料22に入射する入射光から分離することができる。

40

【0044】

さらに、ダイクロイックミラーであるビームスプリッタ17は、レーザ波長の光を反射し

50

て、ラマン散乱光を透過するような、特性を有している。従って、試料 2 2 からのレーリ-散乱光は、ビームスプリッタ 1 7 で反射され、ラマン散乱光は、ビームスプリッタ 1 7 を透過する。すなわち、ダイクロイックミラーをビームスプリッタ 1 7 として用いることによって、レーリ-散乱光とラマン散乱光との波長に差に基づいてレーリ-散乱光を除去することができる。さらに、光源 1 0 からのレーザ光のほとんどはビームスプリッタ 1 7 で反射され、試料 2 2 に向かう。これにより、レーザ光のロスを低減することができ、効率よくラマン散乱光のみを検出することができる。なお、ダイクロイックミラーの反射特性は、測定するスペクトルの範囲に応じて決定すればよい。ここで、ビームスプリッタ 1 7 は、試料 2 2 と Y 走査装置 1 3 との間に配置されている。従って、ビームスプリッタ 1 7 は、Y 走査装置 1 3 によってデスキャンされる前の出射光と、光源 1 0 からの光ビームとを分離する。

10

**【 0 0 4 5 】**

ビームスプリッタ 1 7 を透過した出射光は、集光光学系 4 0 0 を介して、分光器 3 1 の入射側に設けられた入射スリット 3 0 に入射する。このとき、集光光学系 4 0 0 は入射スリット 3 0 上に射出光を集光している。すなわち、集光光学系 4 0 0 は、入射スリット 3 0 上に試料 2 2 の照明された領域の拡大像を結像している。集光光学系 4 0 0 の詳細については後述する。入射スリット 3 0 には、ライン状の開口部が設けられている。この開口部は、Y 方向に対応する方向に沿って設けられている。すなわち、入射スリット 3 0 の開口部は試料 2 2 上における Y 走査装置 1 3 の走査方向 ( Y 方向 ) に対応する方向に沿って設けられている。したがって、Y 走査装置 1 3 の走査方向は、入射スリット 3 0 の開口部の長手方向に対応している。

20

**【 0 0 4 6 】**

集光光学系 4 0 0 は射出光を、入射スリット 3 0 上に結像する。ここで、試料 2 2 面上において入射光はスポット状に結像されているため、入射スリット 3 0 上において射出光はスポット状に集光される。入射スリット 3 0 の開口部の長手方向と Y 走査装置 1 3 の走査方向とを一致させる。射出光は、Y 走査装置 1 3 によってデスキャンされずに、ビームスプリッタ 1 7 に入射しているため、Y 走査装置 1 3 で走査すると、入射スリット 3 0 上で光ビームのスポット位置が入射スリット 3 0 のライン状の開口部の方向に移動する。試料 2 2 上で Y 方向に走査された光が入射スリット 3 0 の開口部に結像するように配置する。換言すると入射スリット 3 0 と試料 2 2 の照明された領域とは互いに共役な関係となるよう配置される。したがって、ラマン顕微鏡はラインコンフォーカル ( スリットコンフォーカル ) 光学系として構成される。

30

**【 0 0 4 7 】**

そして、試料 2 2 から散乱して出射した射出光は入射スリット 3 0 上でスポット状に集光される。入射スリット 3 0 は Y 方向に沿った開口部を有しており、この開口部に入射した射出光のみを検出器 3 2 側に透過させる。光源 1 0 から試料 2 2 までの照明光学系及び試料 2 2 から検出器 3 2 まで観察光学系をこのような結像光学系とすることにより、共焦点ラマン顕微鏡とすることができる。これにより、Z 方向の分解能の高い測定を行うことができる。そして、ステージ 2 3 を Z 方向に移動することにより、試料 2 2 の任意の高さからのラマン散乱光を他の高さからのラマン散乱光から分離して検出することができる。

40

**【 0 0 4 8 】**

この入射スリット 3 0 を通過した射出光は、分光器 3 1 の本体に入射する。分光器 3 1 は、回折格子 ( グレーティング ) やプリズムなどの分光素子を備えており、入射スリット 3 0 から入射した光をその波長に応じて空間的に分散させる。反射型回折格子を用いた分光器 3 1 の場合、さらに入射スリット 3 0 からの光を分光素子までに導く凹面ミラーと分光素子によって分光された光を検出器 3 2 まで導く凹面ミラーなどの光学系が設けられている。もちろん、上記以外の構成を有する分光器 3 1 を用いてもよい。射出光は分光器 3 1 によって入射スリット 3 0 の方向と垂直な方向に分散される。すなわち、分光器 3 1 は、入射スリット 3 0 のライン状の開口部と垂直な方向に出射光を波長分散する。分光器 3 1 により分光された射出光は検出器 3 2 に入射する。検出器 3 2 は受光素子がマトリクス状

50

に配列されたエリアセンサである。具体的には、検出器 3 2 は画素がアレイ状に配置された 2 次元 CCD カメラなどの 2 次元アレイ光検出器である。分光器 3 1 は、例えば、2 0 0 0 n m の深紫外領域から 2 0 0 0 n m の近赤外領域の広帯域のラマン散乱光を分光することができる。なお、分光器 3 1 は、フーリエ分光器であってもよい。この場合、出射光を波長に応じて空間的に分散させずに、検出器 3 2 が出射光を検出する。

【 0 0 4 9 】

検出器 3 2 には、例えば、2 0 0 n m から 1 1 0 0 n m の範囲の光の検出には、冷却 CCD を用いることができる。具体的には、検出器 3 2 として、プリンストン・インスツルメンツ社製 1 0 2 4 x 2 5 6 画素の電子冷却 CCD (冷却温度 - 7 5 ) を用いることができる。また、検出器 3 2 にイメージインテンシファイアを取り付けることも可能である。1 0 0 0 n m から 2 0 0 0 n m の光の検出には、InGaAs カメラを用いることができる。分光測定する帯域に応じて検出器 3 2 を切替えることで、広帯域のスペクトル測定に対応することができる。検出器 3 2 の画素は、入射スリット 3 0 に対応する方向に沿って配置されている。したがって、検出器 3 2 の画素の一方の配列方向は入射スリット 3 0 の方向と一致し、他方の配列方向は、分光器 3 1 の分散方向と一致する。検出器 3 2 の入射スリット 3 0 の方向に対応する方向が Y 方向 (第 2 の方向) となり、入射スリット 3 0 と垂直な方向、すなわち、分光器 3 1 によって出射光が分散される方向が X 方向 (第 1 の方向) となる。

10

【 0 0 5 0 】

上記のように、分光器は、2 0 0 n m の深紫外領域から 2 0 0 0 n m の近赤外領域の広帯域のラマン散乱光を X 方向に分散する。そして、検出器 3 2 は、2 0 0 n m の深紫外領域から 2 0 0 0 n m の近赤外領域の光について感度を有する。検出器 3 2 は各画素で受光した出射光の光強度に応じた検出信号を処理装置 5 0 に出力する。処理装置 5 0 は、例えば、パーソナルコンピュータ (PC) などの情報処理装置であり、検出器 3 2 からの検出信号をメモリなどに記憶していく。そして、検出結果に所定の処理を行い、モニターに表示する。さらに、処理装置 5 0 は、Y 走査装置 1 3 及び X 走査ミラー 1 8 の走査や、ステージ 2 3 の駆動を制御している。ここで、検出器 3 2 の X 方向は出射光の波長 (振動数) に対応している。すなわち、X 方向に配列されている画素列において、一端の画素は長波長 (低振動数) の出射光を検出し、他端の画素は短波長 (高振動数) の出射光を検出する。このように、検出器 3 2 の X 方向における光強度の分布はラマンスペクトルの分布を示すことになる。

20

30

【 0 0 5 1 】

検出器 3 2 が 1 フレーム撮像する間に、Y 走査装置 1 3 が光ビームを Y 方向に 1 回以上走査する。すなわち、Y 走査装置 1 3 の走査周期を露光時間以下にして、検出器 3 2 の 1 フレームの露光時間内で、Y 方向に 1 回以上走査する。これにより、検出器 3 2 の 1 フレームで、走査範囲に応じたライン状の領域のラマンスペクトルを測定することができる。すなわち、露光時間内に、Y 走査装置 1 3 の走査領域の全体を走査させる。よって、測定時間を短縮することができる。例えば、3 次元の広い領域に対してラマンスペクトルを測定する場合でも、測定時間が長時間となるのを防ぐことができ、実用性を向上することができる。さらに、Y 走査装置 1 3 が光ビームを高速に走査しているため、試料の損傷を抑制することができる。

40

【 0 0 5 2 】

本実施の形態では、光学顕微鏡 1 0 0 は、例えば、2 0 0 n m の深紫外領域から 2 0 0 0 n m の近赤外領域の広帯域のラマン散乱光を分光測定する。そのため、収差を低減するための光学系を用いている。例えば、リレー光学系 2 0 0、リレー光学系 3 0 0、集光光学系 4 0 0 が、後述するように反射鏡により構成されている。これにより、色収差を低減することができるため、広帯域で分光測定への適用が可能となる。以下、リレー光学系 2 0 0、リレー光学系 3 0 0、集光光学系 4 0 0 について、それぞれ説明する。

【 0 0 5 3 】

(リレー光学系 3 0 0)

50

まず、リレー光学系 300 の構成について、図 2 を用いて説明する。図 2 は、リレー光学系 300 の構成を示す図である。なお、以下の説明では、非軸対称光学系について説明するが、対物レンズ 21 の瞳に入射角 0 度で入射する光、あるいは、対物レンズ 21 の瞳から 0 度で射出されるラマン散乱光（出射光）の主光線が通る直線を基準軸  $O X 1$  とする。X 走査ミラー 18、及び Y 走査装置 13 による走査角度が変わる場合でも基準軸を Z 軸として、光の進行方向を正、X 軸と Y 軸を左手系にとる。また特に断りのない限り光学素子間の距離は、基準軸に沿った距離とする。

#### 【0054】

リレー光学系 300 は、第 1 の非軸放物面鏡 301 と第 2 の非軸放物面鏡 302 とを備えた反射光学系である。第 1 の非軸放物面鏡 301 と第 2 の非軸放物面鏡 302 とは、放物面を有する凹面鏡であり、放物面の幾何学的な焦点  $P 1$  が一致するように配置されている。第 1 の非軸放物面鏡 301 と第 2 の非軸放物面鏡 302 とは、幾何学的な対称軸  $S X$  が互いに平行で、放物面が互いに反対の方向を向くように配置されている。例えば、図 2 において、第 1 の非軸放物面鏡 301 の放物面は左側を向いており、第 2 の非軸放物面鏡 302 の放物面は右側を向いている。なお、図 2 では第 1 の非軸放物面鏡 301 の幾何学的な対称軸  $S X$  と第 2 の非軸放物面鏡 302 の幾何学的な対称軸  $S X$  は一致している。また、第 1 の非軸放物面鏡 301 に入射する光ビームの基準軸と第 2 の非軸放物面鏡 302 で反射された光ビームの基準軸は、幾何学的な対称軸  $S X$  に平行である。Y 軸は放物面の幾何学的な対称軸  $S X$  を含む平面内にある。具体的には、図 2 に示す Y 軸は、第 1 の非軸放物面鏡 301 と第 2 の非軸放物面鏡 302 の間において、対称軸  $S X$  と平行になっている。

#### 【0055】

X 走査ミラー 18 で反射された平行光である光ビームが第 1 の非軸放物面鏡 301 に入射する。光ビームが基準軸  $O X 1$  に沿って第 1 の非軸放物面鏡 301 に入射するとき（平行入射）、第 1 の非軸放物面鏡 301 で反射した反射光は、その放物面の幾何学的な焦点  $P 1$ （中間焦点）に集光される。そして、第 1 の非軸放物面鏡 301 で反射した反射光は、第 2 の非軸放物面鏡 302 に入射する。第 2 の非軸放物面鏡 302 で反射された反射光は、基準軸に平行な平行光になって、対物レンズ 21 に入射する。対物レンズ 21 は対物レンズ 21 の光軸が第 2 の非軸放物面鏡 302 の幾何学的な軸に平行になるように配置される。

#### 【0056】

リレー光学系 300 では、第 1 の非軸放物面鏡 301 と第 2 の非軸放物面鏡 302 の焦点距離を同じにすることが好ましい。これによって、試料 22 における走査範囲と、対物レンズ 21 に入射する光ビームのビーム径と、X 走査ミラー 18 から対物レンズ 22 の瞳までの距離を一定にする条件下で、像面湾曲を最小化できる。基準軸に沿った第 1 の非軸放物面鏡 301 から焦点  $P 1$  までの距離を  $L 1$  とし、焦点  $P 1$  から第 2 の非軸放物面鏡 302 までの距離を  $L 2$  とし、X 走査ミラー 18 から第 1 の非軸放物面鏡 301 までの距離を  $L 3$  とし、第 2 の非軸放物面鏡 302 から対物レンズ 21 の入射瞳までの距離を  $L 4$  とする。 $L 1 = L 2 = L 3 = L 4$  とすることがより好ましい。

#### 【0057】

例えば、第 1 の非軸放物面鏡 301、第 2 の非軸放物面鏡 302 が焦点距離  $76.2 \text{ mm}$  の放物面を有しており、基準軸に平行に入射する光を  $90$  度の角度で反射させる場合、 $L 1 = L 2 = L 3 = L 4 = 152.4 \text{ mm}$  とする。 $L 1 = L 2 = L 3 = L 4$  とすることで、X 走査ミラー 18 の角度を変えた場合にも光ビームが対物レンズ 21 の入射瞳のほぼ中心を通る。この結果、X 走査ミラー 18 によって試料 22 を走査した場合にも、測定領域の全体でレーザ強度や空間分解能の変化を抑えることができる。なお多少の収差の増大を許容するのであれば、 $L 1$  と  $L 4$  とが等しくなく、かつ、 $L 2 = L 3$  の条件としてもよい。このような条件下でも、X 走査ミラー 18 の角度を変えた場合に光ビームが対物レンズの入射瞳のほぼ中心を通るようにできる。第 1 の非軸放物面鏡 301 と第 2 の非軸放物面鏡 302 の焦点距離は異なっても良い。この場合、 $L 2$  と  $L 3$  との比を、第 1 の非軸放物面鏡 301 の焦点距離と第 2 の非軸放物面鏡 302 の焦点距離との比に等しくし、 $L 1 = L 2$

、かつ、 $L3 = L4$  とする。

【0058】

非軸放物面鏡を単体で用いると、平行入射の場合を除いて収差が大きく発生する。しかしながら、リレー光学系300は中間焦点（焦点P1）に対して第1の非軸放物面鏡301と第2の非軸放物面鏡302とを互いに反対の方向を向くように置くことで収差を打ち消し、球面収差、コマ収差、非点収差を補正した光学系となっている。例えば、X走査ミラー18の角度を変えた場合、第1の非軸放物面鏡301への光ビームが平行入射でなくなる。このような場合には、中間焦点においては収差の影響でスポットの形状が広がるが、第2の非軸放物面鏡302で反射した後の光ビームは収差が打ち消されてほぼ完全な平行光となる。

10

【0059】

図2では第1の非軸放物面鏡301への入射光と反射光の主光線のなす角度（以下、第1の非軸放物面鏡301の反射角度とする）は90度であるが、第1の非軸放物面鏡301の反射角度が90度でない場合にも、以上で述べた性質をもった光学系となる。例えば第1の非軸放物面鏡301の反射角度は45度や60度など他の角度としても良い。しかしながら、この場合には対物レンズに光学部品および光路が近づいてしまうため、大きなサンプルの測定が難しくなる。大きなサンプルを測定する場合には、反射角度を90度程度にし、対物レンズから光学部品および光路を離すことが好ましい。反射角度を大きくした場合には歪曲収差が増大するため、望遠鏡等で類似のリレー光学系が用いられる場合には、反射角度がなるべく小さい角度となるように設計される。リレー光学系300においてはX走査ミラー18の角度の調整と、データ処理によって歪曲収差を補正できる（歪曲収差の補正については後述する）。したがって、反射角度を90度程度にできる。

20

【0060】

以上では、X走査ミラー18から対物レンズ21に向かう光ビームについて説明したが、リレー光学系300は、対物レンズ21からX走査ミラー18に向かう出射光についても、同様の性質をもっている。図2では、レンズを用いない構成とすることができるため、色収差を無くすることができる。

【0061】

（リレー光学系300の変形例）

図3を用いて、リレー光学系300の変形例について説明する。図3では、図2の構成に対して、第1の補正レンズ303と、第2の補正レンズ304とが追加されている。すなわち、図3に示すリレーレンズ光学系300は、第1の非軸放物面鏡301と、第2の非軸放物面鏡302と、第1の補正レンズ303と第2の補正レンズ304とを備えた反射屈折光学系である。なお、図2と同様の構成については、適宜説明を省略する。なお、図3においても、第1の非軸放物面鏡301と第2の非軸放物面鏡302は、放物面の幾何学的な対称軸が互いに平行で、放物面が互いに反対の方向を向くように配置されている。そして、Y軸は対称軸を含む平面内にある。

30

【0062】

第1の補正レンズ303、第2の補正レンズ304は、正のパワーを持つレンズである。第1の補正レンズ303は、第1の非軸放物面鏡301から焦点P1までの光路中に配置されている。第2の補正レンズ304は、焦点P1から第2の非軸放物面鏡302までの光路中に配置されている。すなわち、第1の非軸放物面鏡301で反射した光ビームは、第1の補正レンズ303に入射する。第1の補正レンズ303で屈折した光ビームは、第2の補正レンズ304に入射する。第2の補正レンズ304で屈折した光ビームは、第2の非軸放物面鏡302に入射する。第2の非軸放物面鏡302で反射した光ビームは、対物レンズ21に入射する。第1の非軸放物面鏡301、及び第1の補正レンズ303は、焦点P1に光ビームを集光する。

40

【0063】

最適化された正のパワーを持つ第1の補正レンズ303及び第2の補正レンズ304を追加することで、図2の光学系の持つ像面湾曲を補正することができる。第1の補正レンズ

50

303、及び第2の補正レンズ304は、なるべく焦点P1の近くに配置することが好ましい。このようにすることで、第1の補正レンズ303、及び第2の補正レンズ304によって生じる色収差を無視できる程度に小さくすることができる。また、第1の補正レンズ303、及び第2の補正レンズ304の材料は合成石英ガラスまたはフッ化カルシウムとすることが好ましい。このようにすることで、リレー光学系300が、深紫外領域を含んだ広い波長帯域において使用可能となる。

#### 【0064】

第1の非軸放物面鏡301と第2の非軸放物面鏡302との間に、第1の補正レンズ303、及び第2の補正レンズ304が追加されている。このため、図2とは異なり、第1の非軸放物面鏡301と第2の非軸放物面鏡302の放物面の幾何学的な焦点と、光ビームの焦点P1とは一致しない。

10

#### 【0065】

第1の補正レンズ303から焦点P1までの距離をL5とし、焦点P1から第2の補正レンズ304までの距離をL6とする。第1の非軸放物面鏡301に平行光が平行入射した場合に、第2の非軸放物面鏡302の反射光が第2の非軸放物面鏡302の幾何学的な軸に平行な平行光となる条件下で、 $L5 = L6$ 、かつ、 $L2 = L3$ とするのがよい。

#### 【0066】

焦点P1に対して、第1の非軸放物面鏡301、及び第1の補正レンズ303を、第1の補正レンズ303及び第2の補正レンズ304と対称に配置することで、コマ収差、非点収差を打ち消すことができる。図3のリレー光学系300においても、 $L1 = L4$ の条件で、L1を、X走査ミラー18の角度を変えた場合にも光ビームが対物レンズ21の入射瞳のほぼ中心を通る、長さとするのが好ましい。このようなL1は、X走査ミラー18の位置から傾きを持った光線を光線追跡し、基準軸との交点を求めることを、L1を変えて繰り返すことで求めることができる。これにより、X走査ミラー18が試料22を走査した場合にも、測定領域の全体でレーザ強度や空間分解能の変化を抑えることができる。

20

#### 【0067】

例えば、焦点距離76.2mmの放物面をもった第1の非軸放物面鏡301、第2の非軸放物面鏡302を用い、基準軸OX1に平行に入射する光ビームを第1の非軸放物面鏡301で90度の方向に反射させるとする。さらに、第1の補正レンズ303、及び第2の補正レンズ304に焦点距離1000mm、中心厚2.2mmの合成石英ガラス製平凸レンズを用いる。この場合に、 $L1 = L4 = 128.7\text{mm}$ 、 $L2 = L3 = 152.7\text{mm}$ 、 $L5 = L6 = 20\text{mm}$ とすることで、以上の条件を満たすことができる。なお、L5、及びL6は、焦点P1から補正レンズの平面側までの距離である。

30

#### 【0068】

また、多少の収差の増大を許容するのであれば、L1とL4とが等しくない条件としてもよい。このようにした場合でも、X走査ミラー18の角度を変えた場合に光ビームが対物レンズ21の入射瞳のほぼ中心を通るようにできる。

#### 【0069】

像面湾曲は、焦点P1の位置に両凸レンズを置くことでも補正できる。焦点の位置に両凸レンズをおいた場合には、両凸レンズ中にレーザ光が集光されるため、レンズ材料からラマン散乱光等の発光が生じ、サンプルからのラマン散乱光の測定を妨げる場合がある。従って、図3のように、焦点P1を挟むように間隔を空けて、第1の補正レンズ303及び第2の補正レンズ304を配置することが好ましい。第1の補正レンズ303及び第2の補正レンズ304を用いる場合には、焦点位置にレンズ材料が無い場合、レンズ材料からの発光がサンプルからのラマン散乱光の測定を妨げることがない。

40

#### 【0070】

なお、図2、又は図3に示す構成を、リレー光学系200に用いることも可能である。すなわち、Y走査装置13からビームスプリッタ17までの光路中に図2、又は図3に示すリレー光学系を配置してもよい。この場合、Y走査装置13で走査された光ビームが第1の非軸放物面鏡301に入射する。

50

## 【 0 0 7 1 】

( 集光光学系 4 0 0 )

次に、集光光学系 4 0 0 の構成について、図 4 を用いて説明する。図 4 は、集光光学系 4 0 0 の構成を示す図である。具体的には、図 4 は、X 走査ミラー 1 8 から入射スリット 3 0 までの光学系を示している。図 4 では、ビームスプリッタ 1 7 が省略されている。図 4 において、Y 軸は、紙面に垂直となっている。集光光学系 4 0 0 は、第 1 の凹面鏡 4 0 1 と第 1 の凸面鏡 4 0 2 と平面鏡 4 0 3 を備えた反射光学系となっている。

## 【 0 0 7 2 】

試料 2 2 で発生した出射光は X 走査ミラー 1 8 によってデスキャンされる。X 走査ミラー 1 8 で反射された出射光は、第 1 の凹面鏡 4 0 1 で反射される。第 1 の凹面鏡 4 0 1 で反射された出射光は、第 1 の凸面鏡 4 0 2 で反射される。そして、第 1 の凸面鏡 4 0 2 で反射された出射光は、平面鏡 4 0 3 で反射される。平面鏡 4 0 3 で反射された出射光は、入射スリット 3 0 に入射する。第 1 の凹面鏡 4 0 1 と第 1 の凸面鏡 4 0 2 は、入射スリット 3 0 に出射光を集光する。第 1 の凹面鏡 4 0 1、及び第 1 の凸面鏡 4 0 2 は球面鏡とすることができる。この場合、第 1 の凹面鏡 4 0 1 の曲率半径と第 1 の凸面鏡 4 0 2 の曲率半径が実質的に等しくなっているてもよい。なお、実質的に等しいとは、曲率半径の差が例えば、1 0 % 以内となっていることを示す。1 0 % 程度の違いであれば、十分な収差低減効果を得ることができる。図 4 では、第 1 の凹面鏡 4 0 1 の反射角度を  $\theta_1$  とし、第 2 の凸面鏡 4 0 2 の反射角度を  $\theta_2$  としている。

## 【 0 0 7 3 】

球面鏡である第 1 の凹面鏡 4 0 1 及び第 1 の凸面鏡 4 0 2 に対して光が垂直に入射しない場合は非点収差が生じる。しかしながら、集光光学系 4 0 0 においては、第 1 の凹面鏡 4 0 1 での反射角  $\theta_1$  と第 1 の凸面鏡 4 0 2 での反射角  $\theta_2$  とを最適化することで非点収差を補正できる。このようにして非点収差を補正した場合、第 1 の凹面鏡 4 0 1 の曲率中心と第 1 の凸面鏡 4 0 2 の曲率中心とを通る直線（対称軸）は、第 1 の凹面鏡 4 0 1 へ入射する光ビームの基準軸と平行にならない。すなわち、第 1 の凹面鏡 4 0 1 の曲率中心と第 1 の凸面鏡 4 0 2 の曲率中心を通る直線（対称軸）は、第 1 の凹面鏡 4 0 1 へ入射する光ビームの基準軸から傾いている。そして、Y 軸に沿った狭い領域の外では、収差が増大する光学系となるが、入射スリット 3 0 の開口部分に沿っては良像が得られる。また、集光光学系 4 0 0 では第 1 の凹面鏡 4 0 1 と第 2 の凸面鏡 4 0 2 が使用されている。曲率の近い第 1 の凹面鏡 4 0 1、及び第 2 の凸面鏡 4 0 2 を用いることでペッツバル和を小さくし、像面湾曲が小さくできる。なお、Y 軸は、基準軸と対称軸を含む平面に垂直な向きとなっている。

## 【 0 0 7 4 】

特許文献 1 の集光光学系（レンズ 2 4）では、試料の基準軸に垂直な面に対する像面（以下、単に像面という）と、分光器の入射スリットの入射面は一致しているため、光学系の調整が容易となっている。一方、図 4 に示す集光光学系 4 0 0 では、入射スリット 3 0 の位置で、試料の像面と入射スリット 3 0 とが平行とはなっていない。すなわち、集光光学系 4 0 0 によって結像される試料の像面が、入射スリットの入射面に対して傾いている。試料の像面は、入射スリットの入射面に対して、Y 軸周りに回転している。換言すると、入射スリット 3 0 の位置において、基準軸 O X 1 に対して垂直な平面と、試料の像面が平行となっていない。

## 【 0 0 7 5 】

これは分光器 3 1（図 4 では不図示のため、図 1 参照）を、基準軸 O X 1 に対して入射スリット 3 0 が垂直となるように設置しているためである。分光器 3 1 には入射スリット 3 0 への入射角が検出器 3 2 への入射角と等しくなるものを用いる。このようにすることで、光学系調整の手順は複雑になるものの、検出器 3 2 への入射角を 0 度とし、検出器 3 2 の窓と検出器 3 2 の受光面の反射によってゴースト像が生じるのを防ぐことができる。

## 【 0 0 7 6 】

入射スリット 3 0 の位置では、試料の像面と入射スリット 3 0 が平行にならないため、試

10

20

30

40

50

料 2 2 のライン状の部分のみがスリットと合焦する。しかしながら、一度に測定するのは、入射スリット 3 0 に合焦する領域のみであるために問題は生じない。X 走査ミラー 1 8 の角度に関わらず、レーザ光の照射される試料 2 2 上のライン状の領域が入射スリット 3 0 に合焦する。出射光の入射スリット 3 0 への入射角と、検出器 3 2 への入射角とが等しく無い場合には、検出器 3 2 への入射角が 0 度となるように入射スリット 3 0 に出射光を入射させる。

#### 【 0 0 7 7 】

X 走査ミラー 1 8 から第 1 の凹面鏡 4 0 1 までの距離は、試料 2 2 上のライン状に照明された各点からの出射光の主光線が、入射スリット 3 0 に対して垂直となる距離とすることが好ましい。言い換えると X 走査ミラー 1 8 から第 1 の凹面鏡 4 0 1 までの距離は、試料から入射スリット 3 0 への結像がテレセントリックとなる距離とするのが良い。テレセントリックとなる距離は、距離を変えて光線追跡を繰り返すことで求めることができる。分光器 3 1 には内部の光学系がテレセントリック光学系であるものを用いる。このようにすることで、ライン上の各点からの出射光は、検出器 3 2 に垂直に入射させることができる。よって、各点からの光の検出効率を一様にでき、またゴースト像の発生を抑えることができる。

10

#### 【 0 0 7 8 】

設計例を以下に示す。第 1 の凹面鏡 4 0 1 及び第 2 の凸面鏡 4 0 2 の曲率半径を 2 0 0 m m で同じとする。基準軸 O X に沿った第 1 の凹面鏡 4 0 1 から第 2 の凸面鏡 4 0 2 までの距離を 5 5 . 1 1 m m 、第 1 の凸面鏡 4 0 2 からスリットまでの距離を 8 1 . 4 2 m m とする。さらに、 $\theta_1 = 1 1 . 5 2$  度、 $\theta_2 = 2 5 . 6 2$  度とすることで諸収差が良好に補正される。このとき、X 走査ミラー 1 8 から第 1 の凹面鏡 4 0 1 までの距離を 2 7 7 . 3 m m にすることでテレセントリックとなる。

20

#### 【 0 0 7 9 】

集光光学系 4 0 0 では、基準軸 O X 1 に沿って、試料 2 2 側から第 1 の凹面鏡 4 0 1 、第 2 の凸面鏡 4 0 2 の順番で光学素子が配置されている。この順番とすることで、試料 2 2 から入射スリット 3 0 への結像がテレセントリックとなる距離にした場合でも、X 走査ミラー 1 8 から集光光学系 4 0 0 までの距離を離すことができる。よって、X 走査ミラー 1 8 と集光光学系 4 0 0 との間に、ビームスプリッタ 1 7 や、フィルタ類を設置する空間を設けることができる。仮に、第 2 の凸面鏡 4 0 2 、第 1 の凹面鏡 4 0 1 の順に並べて、諸収差を補正した設計にすると、テレセントリックとなる距離では X 走査ミラー 1 8 と光学素子との間隔が小さくなる。よって、ビームスプリッタ 1 7 やフィルタ類を設置する空間を設けることが困難となる。本実施の形態のように、試料 2 2 から、第 1 の凹面鏡 4 0 1 、第 2 の凸面鏡 4 0 2 の順番で配置することが好ましい。

30

#### 【 0 0 8 0 】

##### ( リレー光学系 2 0 0 )

次に、図 5 を用いて、リレー光学系 2 0 0 の構成について説明する。図 5 は、リレー光学系 2 0 0 の構成を示す図である。具体的には、図 5 は、Y 走査装置 1 3 から X 走査ミラー 1 8 までの光学系を示している。なお、図 5 ではビームスプリッタ 1 7 は省略されている。図 5 では、Y 方向は紙面と垂直な方向となっている。リレー光学系 2 0 0 は、第 2 の凹面鏡 2 0 1 、第 2 の凸面鏡 2 0 2 、第 3 の凸面鏡 2 0 3 、及び第 3 の凹面鏡 2 0 4 を備えた反射光学系である。

40

#### 【 0 0 8 1 】

Y 走査装置 1 3 で走査された平行光の光ビームは、第 2 の凹面鏡 2 0 1 で反射される。第 2 の凹面鏡 2 0 1 で反射された光ビームは、第 2 の凸面鏡 2 0 2 で反射される。第 2 の凹面鏡 2 0 1 と第 2 の凸面鏡 2 0 2 は、光ビームを中間像面 P 2 にスポット状に集光する。第 2 の凸面鏡 2 0 2 で反射された光ビームは、第 3 の凸面鏡 2 0 3 に入射する。第 3 の凸面鏡 2 0 3 は、光ビームを第 3 の凹面鏡 2 0 4 に向けて反射する。第 3 の凹面鏡 2 0 4 は、光ビームを X 走査ミラー 1 8 に向けて反射する。第 3 の凸面鏡 2 0 3 と第 3 の凹面鏡 2 0 4 とで反射された光ビームは、平行光となる。よって、X 走査ミラー 1 8 は、平行光の

50

光ビームを走査する。

【0082】

中間像面 P 2 に絞り 205 を設けても良い。絞り 205 は例えば円状の開口を有し、外側の光ビームを遮光する。すなわち、開口から外れた光ビームの通過を制限する。Y 走査装置 13 の走査速度が一定とならない領域を絞り 205 によって遮光することが好ましい。これにより、ライン状の領域の照明強度を均一にすることができる。

【0083】

第 2 の凹面鏡 201、第 2 の凸面鏡 202、第 3 の凸面鏡 203、及び第 3 の凹面鏡 204 は球面鏡である。中間像面 P 2 に対して、第 2 の凹面鏡 201、第 2 の凸面鏡 202 は、第 3 の凸面鏡 203、及び第 3 の凹面鏡 204 に対称に配置されている。例えば、第 2 の凹面鏡 201 と第 3 の凹面鏡 204 の曲率半径は実質的に等しくする。第 3 の凸面鏡 203 と第 2 の凸面鏡 202 の曲率半径は実質的に等しくする。なお、実質的に等しくするとは、曲率半径の差が 10% 以内になっていることを示す。10% 程度の違いであれば、十分な収差低減の効果を得ることができる。さらに、第 2 の凹面鏡 201 から第 2 の凸面鏡 202 までの距離を、第 3 の凸面鏡 203 から第 3 の凹面鏡 204 までの距離と同じとする。第 2 の凸面鏡 202 から中間像面 P 2 までの距離を、中間像面 P 2 から第 3 の凸面鏡 203 までの距離と同じとする。

10

【0084】

なお、第 2 の凹面鏡 201 の反射角度と、第 3 の凹面鏡 204 の反射角度とを同じ角度（以下、反射角度 3）とし、第 2 の凸面鏡 202 の反射角度と第 3 の凸面鏡 203 の反射角度とを同じ角度（以下、反射角度 4）とする。Y 走査装置 13 から第 2 の凹面鏡 201 までの距離と、第 3 の凹面鏡 204 から X 走査ミラー 18 までの距離を最適化することで、Y 走査装置 13 が光ビームの角度を変えた場合にも、X 走査ミラー 18 において主光線の通る位置がほとんど変化しないようにできる。

20

【0085】

特許文献 3 には、直交する 2 個の走査ミラーの間に用いるリレー光学系が開示されている。特許文献 3 のリレー光学系は、凹面鏡を用いた反射光学系となっている。しかしながら、特許文献 3 に記載の光学系では収差の補正が不十分で、大きなビーム径では使用することができない。図 5 に示すリレー光学系 200 では、反射角度 3、及び反射角度 4 を最適化することで非点収差を補正することができる。

30

【0086】

このとき、第 2 の凹面鏡 201 の曲率中心と、第 2 の凸面鏡 202 の曲率中心とを通る直線（対称軸）は、第 2 の凹面鏡 201 に入射する光ビームの基準軸と平行でない。すなわち、第 2 の凹面鏡 201 の曲率中心と第 2 の凸面鏡 202 の曲率中心を通る直線は、第 2 の凹面鏡 201 へ入射する光ビームの基準軸から傾いている。また、第 3 の凸面鏡 203 の曲率中心と第 3 の凹面鏡 204 の曲率中心とを通る直線（対称軸）は、第 3 の凹面鏡 204 で反射され X 走査ミラー 18 に向かう光ビームの基準軸と平行でない。すなわち、第 3 の凹面鏡 203 の曲率中心と第 3 の凸面鏡 204 の曲率中心を通る直線は、第 3 の凹面鏡 204 で反射され X 走査ミラー 18 に向かう光ビームの基準軸から傾いている。このようにすることで、非点収差を補正することができる。なお、Y 軸は、基準軸と対称軸を含む平面に垂直な向きとなっている。

40

【0087】

さらに、曲率の近い第 2 の凹面鏡 201、第 2 の凸面鏡 202、第 3 の凸面鏡 203 第 3 の凹面鏡 204 を使用することで像面湾曲を補正し、対称な配置とすることでコマ収差、歪曲収差を補正している。そのため、特許文献 3 の光学系よりも大きなビーム径でも使用できる。

【0088】

リレー光学系 200 の設計例を示す。第 2 の凹面鏡 201、第 2 の凸面鏡 202、第 3 の凸面鏡 203、第 3 の凹面鏡 204 の曲率半径を 200 mm で同じとする。基準軸 OX に沿った第 2 の凹面鏡 201 から第 2 の凸面鏡 202 までの距離を 55.11 mm、第 2 の

50

凸面鏡 202 から中間像面 P2 までの距離を 81.42 mm、中間像面 P2 から第 3 の凸面鏡 203 までの距離を 81.42 mm、第 3 の凸面鏡 203 から第 3 の凹面鏡 204 までの距離を 55.11 mm とする。さらに、 $\theta_3 = 11.52$  度、 $\theta_4 = 25.58$  度とする。このような構成とすることで、諸収差を良好に補正することが可能となる。このとき、Y 走査装置 13 から第 2 の凹面鏡 201 までの距離と、第 3 の凹面鏡 204 から X 走査ミラー 18 までの距離とをそれぞれ 277.26 mm にすることで、Y 走査装置によってビームの角度を変えた場合にも、X 走査ミラー 18 において主光線の通る位置をほとんど変化しないようにできる。

【0089】

なお、波長の異なる複数のレーザ光源を用い、レーザ波長毎に光ビームの集光度合い、又は発散度合いを調整可能なビームエキスパンダをそれぞれ配置してもよい。波長に応じて光ビームの集光、発散の度合いを変化させるリレー光学系 200 の変形例を図 6 に示す。

【0090】

光源 10 としては、レーザ波長の異なる 3 つの光源 110、120、130 が設けられている。光源 110 は、波長  $\lambda_1$  のレーザ光を発生するレーザ光源である。光源 120 は、波長  $\lambda_2$  のレーザ光を発生するレーザ光源である。光源 130 は、波長  $\lambda_3$  のレーザ光を発生するレーザ光源である。

【0091】

光源 110 で発生した波長  $\lambda_1$  の光ビームは、レンズ 111、112 からなるビームエキスパンダ 11 を介して、ダイクロイックミラー 113 に入射する。レンズ 111、112 の位置を調整することで、波長  $\lambda_1$  の光ビームの集光度合い、又は発散度合いを調整することができる。光源 120 で発生した波長  $\lambda_2$  の光ビームは、レンズ 121、122 からなるビームエキスパンダ 11 を介して、ダイクロイックミラー 123 に入射する。レンズ 121、122 の位置を調整することで、波長  $\lambda_2$  の光ビームの集光度合い、又は発散度合いを調整することができる。光源 130 で発生した波長  $\lambda_3$  の光ビームは、レンズ 131、132 からなるビームエキスパンダ 11 を介して、ダイクロイックミラー 133 に入射する。レンズ 131、132 の位置を調整することで、波長  $\lambda_3$  の光ビームの集光度合い、又は発散度合いを調整することができる。

【0092】

ダイクロイックミラー 113 は、波長  $\lambda_1$  の光ビームを透過して、波長  $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  の光ビームを反射する。ダイクロイックミラー 123 は、波長  $\lambda_3$  の光ビームを透過して、波長  $\lambda_2$  の光ビームを反射する。ダイクロイックミラー 133 は、波長  $\lambda_3$  の光ビームを反射する。これにより、波長  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  の光ビームの光路が合成される。なお、ダイクロイックミラー 113、123、133 の代わりに、ビームスプリッタを用いて光ビームの光路を合成することも可能である。レンズ 111、112、121、122、131、132 の位置を調整することで、それぞれの光ビームの集光度合い、発散度合いを独立に変化させることができる。そして、ダイクロイックミラー 111 からの光ビームが、Y 走査装置 13 に入射する。

【0093】

図 6 では、リレー光学系 200 を特許文献 1 のように、2 枚のレンズ 14、レンズ 16 により構成することができる。Y 走査装置 13 で偏向された光ビームはレンズ 14 で屈折され、絞り 15 に入射する。なお、レンズ 14 は絞り 15 の面上に光ビームを集光する。絞り 15 は、例えば円状の開口を有し、外側の光ビームを遮光する。すなわち、開口から外れた光ビームの通過を制限する。Y 走査装置 13 の走査速度が一定とならない領域を絞り 15 によって遮光することが好ましい。これにより、ライン状の領域の照明強度を均一にすることができる。

【0094】

絞り 15 を透過した光ビームは、レンズ 16 で屈折されて、平行光となる。なお、図 6 では省略されているが、レンズ 16 の後段には、図 1 に示すビームスプリッタ 17 が設けられている。レンズ 14、レンズ 16 を、合成石英ガラスおよびフッ化カルシウムを材料と

10

20

30

40

50

し、波長によって異なる集光、発散の度合いの光に対して最適化された設計のレンズとすることで、深紫外から近赤外の広い波長帯域で十分に色収差の補正された光学系とすることができる。

【0095】

(リレー光学系300で生じる歪曲収差の補正)

図2, 又は図3のリレー光学系300では歪曲収差が生じる。図7は図3の光学系で生じる歪曲収差を説明するための図である。図7の正方格子は、歪曲収差の無い対物レンズに、基準軸に対してX方向およびY方向に角度を持った光を直接入射した場合の焦点位置を線で繋いだものである。図7のプロットされている点は、図3のX走査ミラー18の位置からリレー光学系300を通して、歪曲収差の無い対物レンズ21に、基準軸に対して角度を持った光を入射させたときの焦点の位置である。

10

【0096】

図7のプロットは設計データに対する光線追跡によって得ることができる。図7に示すように、Y方向の角度を固定してX方向の角度を変化させた場合には、スポット位置がX方向の角度に依存してY方向に変化する。一方、X方向の角度を固定して、Y方向の角度を変化させた場合には、スポット位置のX方向の変化はほとんど無い。言い換えるとY方向の角度変化に対してスポット位置はY方向のみに変化する。このため、試料22を照明するライン状の領域はY軸に沿って伸びた領域とするのが良い。言い換えるとY走査装置13で走査されるライン状の領域が第1の非軸放物面鏡301の幾何学的な対称軸に対応する方向に沿っていることが好ましい。つまり、図2の構成において、ライン状の領域は、Y軸に平行であり、かつ、第1の非軸放物面鏡301の幾何学的な対称軸がY軸と平行になっている。

20

【0097】

このようにすることで、ライン状の領域の測定ごとのデータの計算によって、歪曲収差を補正することができる。すなわち、仮に図3のリレー光学系300において、X走査ミラー18と第1の非軸放物面鏡301との間で光学系をZ軸回りに90度回転させると、試料22を照明するライン状の領域は図7の横軸に沿って伸びる。このようにしてしまうと、例えば試料上のある直線に沿った領域のデータを取得しようとした場合に、歪曲収差によってカーブしたライン状の領域の測定を、測定領域を変えて複数回繰り返し、得たデータを補間して測定結果とする必要がある。このとき測定波長ごとに2次元データの補間が必要となる。ライン状の領域を図7の縦軸に沿った方向とした場合には、複数回のライン状の領域の測定データから補間する必要はなく、それぞれのライン状の領域の測定データに対して補間処理を行うことで歪曲収差を補正できる。また1次元の測定データの補間処理で結果が得られるため計算が容易である。

30

【0098】

図7で、Y方向の角度を固定してX方向の角度を変化させた場合、スポット位置がX方向の角度に依存してY方向に変化する。この変化は上記のように補間処理による計算で補正することができる。例えば、処理装置50がこの補間処理を実施することで、歪曲収差を補正することができる。具体的には、光ビームが照射されたライン状の領域からの出射光を分光器31が分光する。検出器32は、分光された出射光を分散方向と直交する方向に配列された複数の画素を有している。なお、分散方向と直交する方向に沿って1列に配列された複数の画素は、ある特定の波長における出射光を検出する。そして、複数の画素で検出された1次元の測定データを分散方向と直交する方向に補間する。処理装置50は、ライン状の領域毎に、測定データに対して補間処理を行う。処理装置50は、歪曲収差を補正したラマン散乱光画像を取得する。

40

【0099】

あるいは、図8のようにX走査ミラー18の直前にY走査ミラー41を追加することで歪曲収差を補正してもよい。第3のスキヤナであるY走査ミラー41は、試料上において、光ビームのスポット位置をY方向に走査する。図8の構成において、X走査ミラー18の走査角度に応じてY走査ミラー41の走査角度を変化させることで、歪曲収差を補正でき

50

る。なお、図 8 のように X 走査ミラー 18 の直前に Y 走査ミラー 41 を配置した場合の光学顕微鏡の全体構成は、特許文献 2 の図 1 と同様となる。

【 0 1 0 0 】

図 9 に X 軸方向の入射角度と、歪曲収差による Y 軸方向のスポット位置との関係を示す。そして、図 9 に示すスポット位置の変化を打ち消すように、Y 走査ミラー 41 の角度を変えるようにすればよい。

【 0 1 0 1 】

図 10 は、図 9 に示した歪曲収差によるスポット位置の変化を打ち消すように、Y 走査ミラー 41 の走査角度を変化させた場合の走査角度の関係を示すグラフである。図 10 において、横軸が X 走査ミラー 18 の角度であり、縦軸が Y 走査ミラー 41 の角度となっている。歪曲収差によるスポット位置の変化を打ち消すように、X 走査ミラー 18 と Y 走査ミラー 41 との走査角度を連動して変化させればよい。

【 0 1 0 2 】

(ビームスポットを 1 方向に伸ばす構成)

試料の損傷を防ぐためには、試料 22 におけるビームスポットを 1 方向に伸ばすことが好ましい。試料 22 におけるビームスポットは例えば図 11 の光学系を用いることで伸ばすことができる。図 11 では Y 走査装置 13 の直前にシリンダリカルレンズ 141 が追加されている。シリンダリカルレンズ 141 は、Y 走査装置 13 の位置に光ビームを集光している。

【 0 1 0 3 】

集光された光ビームは Y 走査装置 13 の位置で、Y 方向に縮められ、X 方向に沿って伸びた断面形状となる。このとき試料 22 においては Y 方向に沿って平行に伸びたビームスポットが形成される。すなわち、Y 走査装置 13 による走査方向と同じ方向に伸びたビームスポットとなる。

【 0 1 0 4 】

異なる波長のレーザー光を用いるときには、Y 走査装置 13 の位置に集光されるように、波長に応じてシリンダリカルレンズを Z 方向に動かせばよい。あるいは円筒面の反射鏡を用いて Y 走査装置 13 の位置に集光すれば、このような調整を不要とできる。あるいは、特許文献 1 のように Y 走査装置 13 の後に凹面のシリンダリカルレンズを配置してもよい。

【 0 1 0 5 】

利用できるレーザー強度がそれほど大きくない場合には、試料 22 におけるビームスポットを伸ばす量が小さくても、試料の損傷を防ぐことができる。ビームスポットを伸ばす量が小さい場合には、図 12 に示す構成を用いることができる。図 12 では、Y 走査装置 13 の直前にアナモルフィックプリズム 151、152 が追加されている。2 個のアナモルフィックプリズム 151、152 によって、ビーム断面形状を Y 方向に縮め、楕円のビーム断面形状として Y 走査装置 13 に入射させる。

【 0 1 0 6 】

あるいは光ビームを一方に縮めるために、図 13 に示すように、2 個のシリンダリカルレンズ 161、162 を用いても良い。シリンダリカルレンズ 161、162 は、Y 走査装置 13 の直前に配置される。

【 0 1 0 7 】

シリンダリカルレンズ 161、162 等が、Y 走査装置 13 の位置におけるビーム断面形状を Y 方向に縮める。すると、Y 走査装置 13 の位置でビーム断面形状を縮めた量に応じて、試料 22 の位置のビームスポットが Y 方向に伸びる。例えば、シリンダリカルレンズ 161、162 等が、ビームを 1/5 や 1/3 に縮めるようにしてもよい。ビームを 1/5 に縮めた場合には、1/3 に縮めた場合よりも、よりビームスポットが伸びる。このようにして試料 22 でのビームスポットを伸ばす量を調整することができる。

【 0 1 0 8 】

図 11 の光学系では、図 12、図 13 の光学系よりも試料 22 におけるビームスポットを大きく伸ばすことができる。一方、ビームスポットを伸ばしすぎると、測定領域に

10

20

30

40

50

照射されるレーザ強度が小さくなってしまう場合がある。図 1 2、図 1 3 の光学系によって試料 2 2 を損傷させない程度に比較的小さくビームスポットを伸ばすことで、測定したい領域をより効率よくレーザ光を照射することができる。このとき測定したい領域に合わせて Y 走査装置 1 3 による走査範囲を調整するのが良い。

#### 【0109】

以上の説明では、Y 走査装置 1 3 の位置におけるビーム断面形状を Y 方向に縮める場合について述べたが、図 1 2、図 1 3 の光学系を逆に用いて、一方向にビーム断面形状を広げることによって、ビームの断面形状を変えてもよい。このとき、ビームエキスパンダ 1 1 でのビームの拡大率を調整する。

#### 【0110】

図 1 1 ~ 図 1 3 に示したように、Y 走査装置 1 3 における光ビームの断面形状を Y 方向に縮めることで、試料 2 2 の損傷を防ぐことができる。図 1 1 ~ 図 1 3 では、Y 走査装置 1 3 における光ビームのビーム断面形状を Y 方向に縮める光学部材として、シリンダリカルレンズ又はアナモルフィックプリズムに限定されるものではなく、種々の光学部材を用いることが可能である。

#### 【0111】

(対物レンズ 2 1)

対物レンズ 2 1 は測定しようとする波長帯域ごとに切り替えて使用することができる。あるいは広い波長帯域を一度に測定しようとする場合には、例えばシュヴァルツシルト型の、反射対物レンズを用いれば良い。

#### 【0112】

上記の説明では、リレー光学系 3 0 0、リレー光学系 2 0 0、集光光学系 4 0 0 の構成について、それぞれ説明したが、全ての構成を用いなくてもよい。すなわち、図 2 ~ 図 1 3 に示す構成の一部のみを図 1 に示す光学顕微鏡 1 0 0 に用いることが可能である。

#### 【0113】

例えば、リレー光学系 3 0 0 を図 2、又は図 3 に示す構成とすれば、リレー光学系 2 0 0、及び集光光学系 4 0 0 は、図 4、図 5、又は図 6 に示す構成に限られるものではない。また、リレー光学系 2 0 0 を、図 2、又は図 3 に示す構成としてもよい。この場合、リレー光学系 3 0 0 は、図 2、又は、図 3 の構成に限られるものではない。もちろん、リレー光学系 3 0 0 を図 2 又は図 3 の構成として、かつ、リレー光学系 2 0 0 を図 5 又は図 6 に示す構成とすることが好ましい。さらに、集光光学系 4 0 0 を図 4 に示す構成とすることが好ましい。図 2 ~ 図 6 以外の光学系としては、例えば、特許文献 1、2 のようにレンズを用いた光学系とすることができる。

#### 【0114】

このように本実施の形態にかかる光学顕微鏡は、光源と、前記光源からの光ビームを偏向させて、試料上における前記光ビームのスポット位置を走査する第 1 のスキャナと、前記第 1 のスキャナで偏向された光ビームを集光して、試料に入射させる対物レンズと、前記試料の前記光ビームが照射された領域から出射した出射光を波長に応じて空間的に分散させる分光器と、アレイ状に配列された受光画素を有し、前記分光器で分散された出射光を検出する 2 次元アレイ光検出器と、前記第 1 のスキャナから前記対物レンズまでの光路中に配置され、前記第 1 のスキャナで偏向された光ビームを反射する第 1 の非軸放物面鏡と、前記第 1 の非軸放物面鏡で反射された光ビームを反射する第 2 の非軸放物面鏡と、を備えた第 1 のリレー光学系と、を備える光学顕微鏡。そして、第 1 のリレー光学系は、図 1 のリレー光学系 2 0 0 及びリレー光学系 3 0 0 の少なくとも一方とすることができる。

#### 【0115】

上記の光学顕微鏡によって、ラマンスペクトルを測定することができる。なお、上述の説明では、ラマン散乱光を分光測定する光学顕微鏡 1 0 0 について説明したが、本発明はこれに限られるものでない。入射光のレーザ波長と異なる波長で試料から出射する出射光を検出する分光測定装置であればよい。例えば、励起光によって励起される蛍光を検出する分光測定装置や、赤外吸収を検出する分光測定装置であってもよい。これらの分光測定装

10

20

30

40

50

置でも、収差を抑制することができる。

【 0 1 1 6 】

以上、本発明者によってなされた発明を実施の形態に基づき具体的に説明したが、本発明は既に述べた実施の形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において種々の変更が可能であることはいうまでもない。

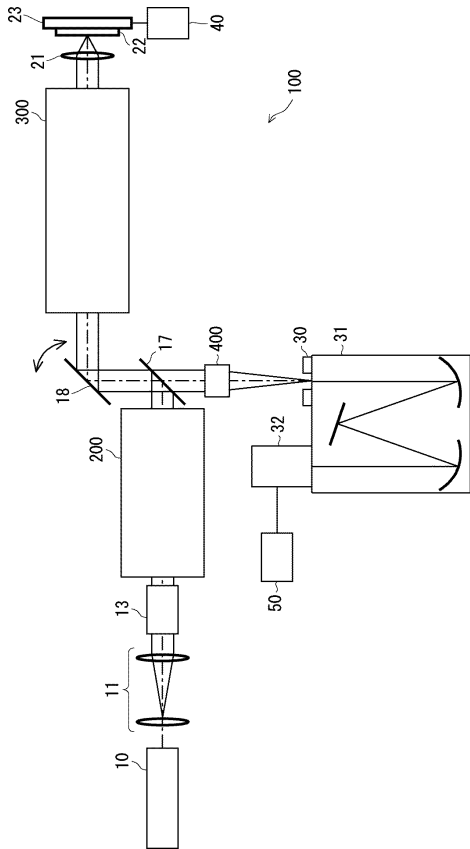
【 符号の説明 】

【 0 1 1 7 】

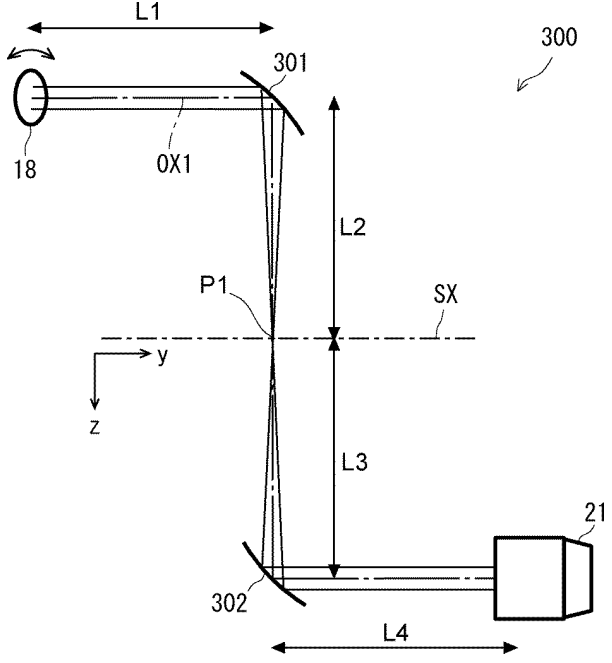
1 0	光源	
1 1	ビームエキスパンダ	
1 3	Y走査装置	10
1 7	ビームスプリッタ	
1 8	X走査ミラー	
2 1	対物レンズ	
2 2	試料	
2 3	ステージ	
3 0	入射スリット	
3 1	分光器	
3 2	検出器	
4 0	ステージ駆動装置	
5 0	処理装置	20
1 0 0	顕微鏡	
2 0 0	リレー光学系	
2 0 1	第2の凹面鏡	
2 0 2	第2の凸面鏡	
2 0 3	第3の凸面鏡	
2 0 4	第3の凹面鏡	
3 0 0	リレー光学系	
3 0 1	第1の非軸放物面鏡	
3 0 2	第2の非軸放物面鏡	
3 0 3	第1の補正レンズ	30
3 0 4	第2の補正レンズ	
4 0 0	集光光学系	
4 0 1	第1の凹面鏡	
4 0 2	第2の凸面鏡	

【図面】

【図 1】



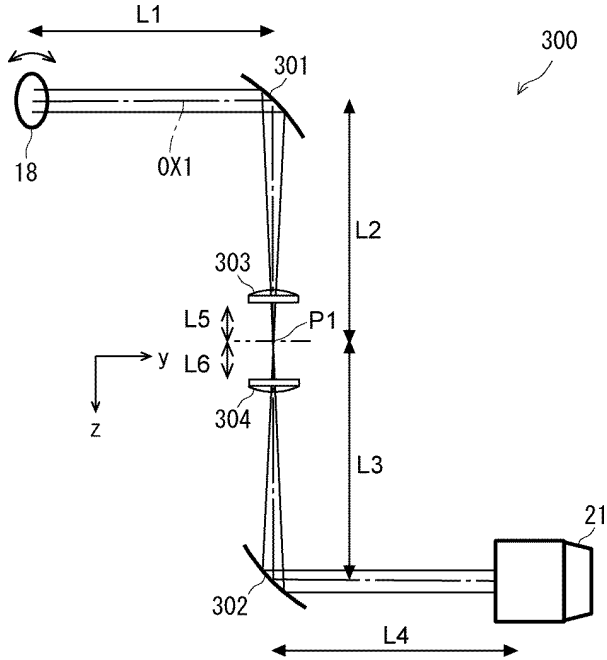
【図 2】



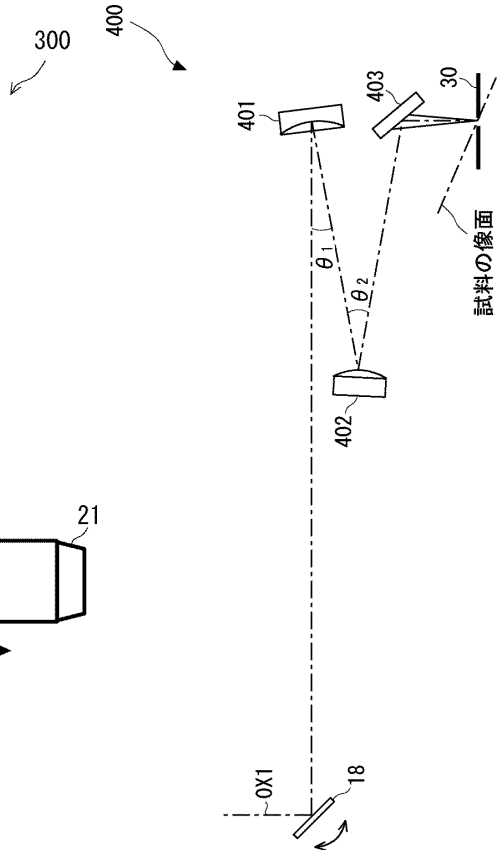
10

20

【図 3】



【図 4】

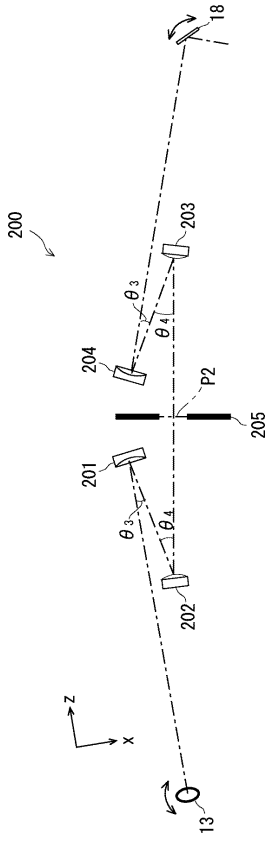


30

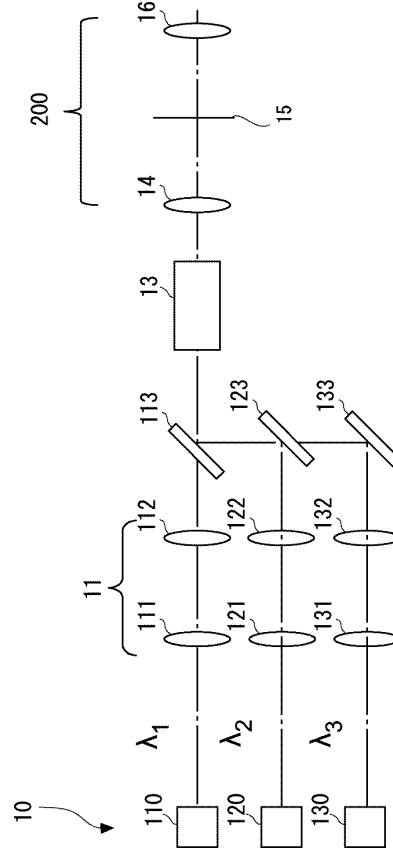
40

50

【図 5】



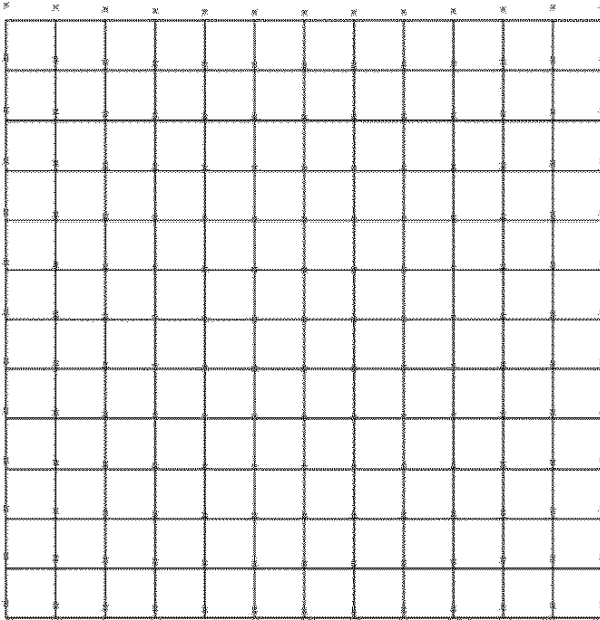
【図 6】



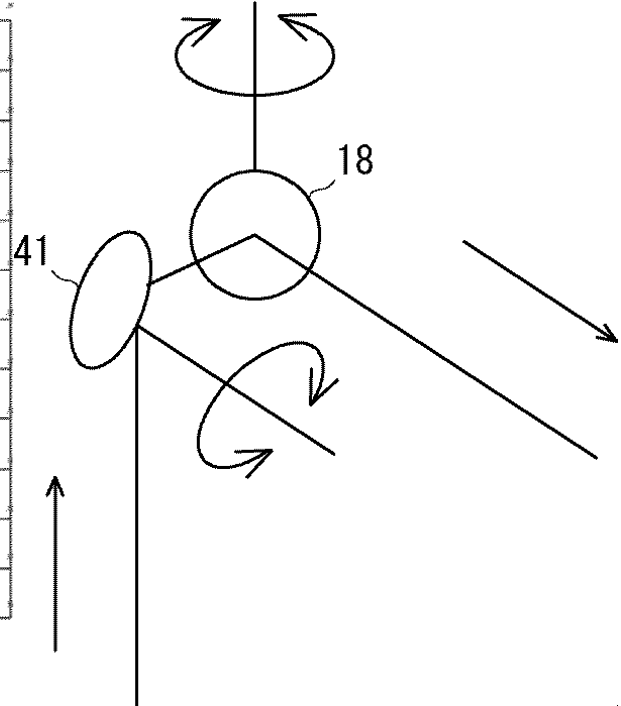
10

20

【図 7】



【図 8】

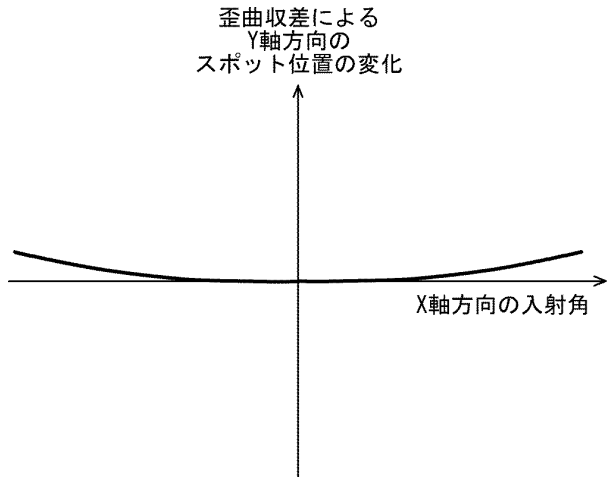


30

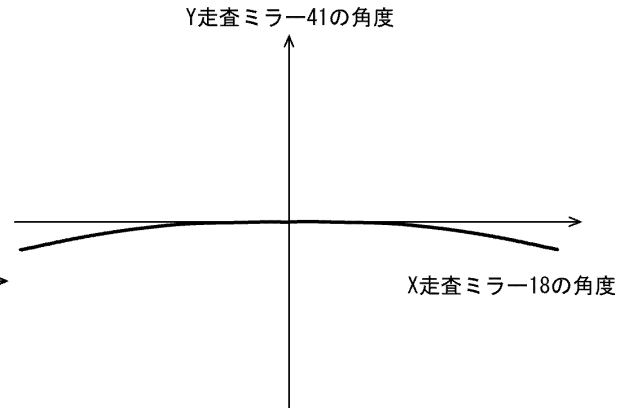
40

50

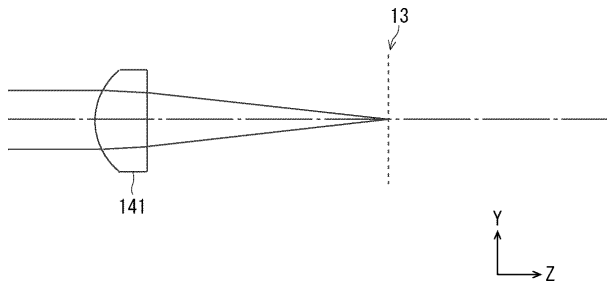
【図 9】



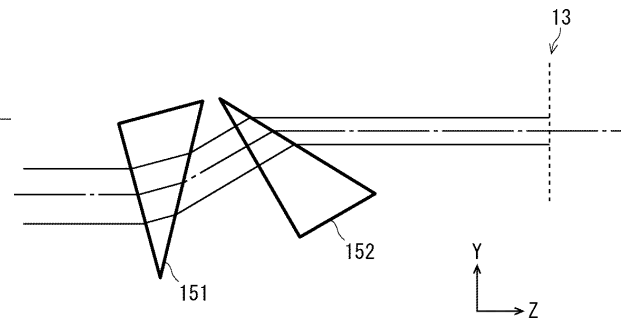
【図 10】



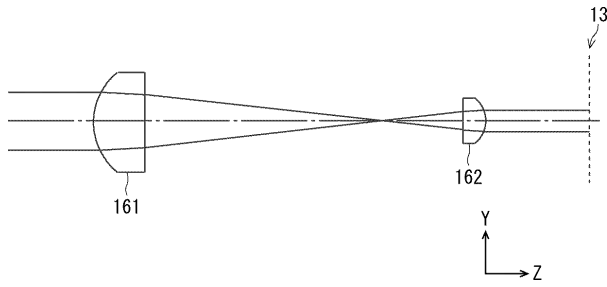
【図 11】



【図 12】



【図 13】



10

20

30

40

50

## フロントページの続き

- 大阪市北区梅田一丁目1番3 - 267号 ナノフォトン株式会社内  
(72)発明者 松坂 俊一郎
- 大阪市北区梅田一丁目1番3 - 267号 ナノフォトン株式会社内  
(72)発明者 塩 崎 祐介
- 大阪市北区梅田一丁目1番3 - 267号 ナノフォトン株式会社内  
(72)発明者 山内 翔太
- 大阪市北区梅田一丁目1番3 - 267号 ナノフォトン株式会社内  
審査官 堀井 康司
- (56)参考文献 特開2007 - 179002 (JP, A)  
特開2012 - 229936 (JP, A)  
特開2016 - 212197 (JP, A)  
特開2006 - 047780 (JP, A)  
特開2011 - 039542 (JP, A)  
特開2009 - 294159 (JP, A)  
特開2016 - 158708 (JP, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
G02B 19/00 - 21/00  
G02B 21/06 - 21/36  
G01J 3/44