

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6478433号
(P6478433)

(45) 発行日 平成31年3月6日(2019.3.6)

(24) 登録日 平成31年2月15日(2019.2.15)

(51) Int. Cl.		F 1			
G 2 1 K	7/00	(2006.01)	G 2 1 K	7/00	
G 2 1 K	1/06	(2006.01)	G 2 1 K	1/06	B
G 2 1 K	1/00	(2006.01)	G 2 1 K	1/06	G
			G 2 1 K	1/00	X

請求項の数 11 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2017-540926 (P2017-540926)	(73) 特許権者	504176911
(86) (22) 出願日	平成28年9月23日 (2016. 9. 23)		国立大学法人大阪大学
(86) 国際出願番号	PCT/JP2016/078070		大阪府吹田市山田丘 1 番 1 号
(87) 国際公開番号	W02017/051890	(74) 代理人	100075409
(87) 国際公開日	平成29年3月30日 (2017. 3. 30)		弁理士 植木 久一
審査請求日	平成30年3月6日 (2018. 3. 6)	(74) 代理人	100129757
(31) 優先権主張番号	特願2015-188850 (P2015-188850)		弁理士 植木 久彦
(32) 優先日	平成27年9月25日 (2015. 9. 25)	(74) 代理人	100115082
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		弁理士 菅河 忠志
		(74) 代理人	100125243
			弁理士 伊藤 浩彰
		(72) 発明者	松山 智至
			大阪府吹田市山田丘 1 番 1 号 国立大学法 人大阪大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 X線顕微鏡

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

X線源と、試料保持部と、反射凹面を有するKirkpatrick-Baezミラー（以下、「凹面KBミラー」と記載する）と、反射凸面を有するKirkpatrick-Baezミラー（以下、「凸面KBミラー」と記載する）と、前記試料保持部の位置と結像関係の位置にある受光部とを、順に有するX線顕微鏡。

【請求項 2】

前記凹面KBミラーの前記反射凹面は、楕円形状を含むものであり、前記試料保持部は、該楕円の焦点位置にある請求項 1 に記載のX線顕微鏡。

【請求項 3】

前記凸面KBミラーの前記反射凸面は、一方曲線と他方曲線を含む双曲線のうち、前記一方曲線を含むものであり、前記受光部は、前記双曲線の焦点のうち他方曲線側の焦点位置にある請求項 1 または 2 に記載のX線顕微鏡。

【請求項 4】

前記凸面KBミラーと前記受光部との距離よりも、前記凹面KBミラーと前記受光部との距離が長い請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載のX線顕微鏡。

【請求項 5】

前記試料保持部と前記凹面KBミラーとの間に、前記凸面KBミラーと前記凹面KBミラーを含む結像系の主面が存在する請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載のX線顕微鏡。

【請求項 6】

10

20

前記試料保持部の位置と前記受光部の位置との距離が2.5 m以内である請求項1～5のいずれかに記載のX線顕微鏡。

【請求項7】

前記凸面KBミラーは少なくとも2つ配置されており、前記凹面KBミラーも少なくとも2つ配置されており、

一方の凸面KBミラーの法線と他の凸面KBミラーの法線は互いに非平行であり、

一方の凹面KBミラーの法線と他の凹面KBミラーの法線は互いに非平行である、請求項1～6のいずれかに記載のX線顕微鏡。

【請求項8】

前記試料保持部と前記凹面KBミラーとの最短距離が6 mm以上である請求項1～7のいずれかに記載のX線顕微鏡。

10

【請求項9】

前記凸面KBミラーまたは前記凹面KBミラーのうち少なくとも一方は、光軸方向に移動可能に設置されている請求項1～8のいずれかに記載のX線顕微鏡。

【請求項10】

前記試料保持部と前記凹面KBミラーの間に、第1の凹面KBミラーと第2の凹面KBミラーが配置されており、

前記凹面KBミラーの法線と前記第1の凹面KBミラーの法線は互いに非平行であり、

前記凸面KBミラーの法線と前記第2の凹面KBミラーの法線は互いに非平行である、請求項1～6のいずれかに記載のX線顕微鏡。

20

【請求項11】

前記第1の凹面KBミラーは、前記第2の凹面KBミラーよりも前記試料保持部に近く、

前記第1の凹面KBミラーの反射凹面は双曲線を含んでおり、

前記第2の凹面KBミラーの反射凹面は楕円を含んでいる、

請求項10に記載のX線顕微鏡。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、X線顕微鏡に関するものであり、更に詳しくは、Kirkpatrick-Baezミラーを用いたX線顕微鏡に関するものである。

【背景技術】

【0002】

X線顕微鏡は、波長が非常に短い電磁波を用いた結像光学系であるため、原理的には光学顕微鏡をはるかに凌ぐサブnmの高い分解能を有する。また、X線の高い透過力によって透過型電子顕微鏡では困難である厚いサンプルの三次元断層画像を観察することができるものである。更に、X線顕微鏡では、基本的に真空の形成を必須としないため、その場測定が必要な環境（例えば、水溶液と気体の雰囲気）での観測にも適している。更に、蛍光X線分析とX線吸収分光法のようなX線分析技術を組み合わせることにより、電子密度分布だけでなく、局所的結合状態と元素の分布をも取得することができる。このような利点の多いX線顕微鏡は、様々な科学分野において利用されることが期待されている。

40

【0003】

X線顕微鏡における結像素子の有望な候補としては、フレネルゾーンプレート、X線屈折レンズ、Kirkpatrick-Baez (KB)ミラー、Wolterミラーがある。フレネルゾーンプレートとX線屈折レンズは、サブ50 nmの分解能を実現するために十分に正確に製造することができる。しかし、フレネルゾーンプレートは、回折によって生じる色収差のため多

50

色の結像には適してない。K Bミラーは、全反射を採用しているため、色収差はない。しかし、K Bミラーのような斜入射光学系における単枚の反射ではアッペの正弦条件を満たすことが困難であるため、コマ収差が生じて分解能と視野（F O V）を減少させる。Wolterミラーは、色収差やコマ収差が解消される点で、優れたX線結像システムである。

【0004】

しかし、最先端の超精密加工技術を使用した場合でも、Wolterミラーのミラー面が筒状の内面側に配置された回転楕円面と回転双曲面で構成されているため、回折限界の分解能を実現するために必要な形状精度（1nmオーダー）でWolterミラーを加工することが困難である。従って、Wolterミラーにおいて、形状誤差に基づく波面収差は、現在避けられない深刻な問題であり、これまで高分解能性能（100nm以下）を発揮できるほどの形状精度でミラーを作製したという報告例はない。

10

【0005】

K Bミラーを用いたX線光学系の例としては、例えば、特許文献1のように、水平楕円ミラーと垂直楕円ミラー及び水平双曲ミラーと垂直双曲ミラーの4つの斜入射全反射X線ミラーを用いた光学系（Advanced K Bミラー）がある。この光学系では、X線の光軸方向に沿って水平ステージと垂直ステージを配置し、水平ステージに水平楕円ミラーと水平双曲ミラーを微調節可能に設けるとともに、垂直ステージに垂直楕円ミラーと垂直双曲ミラーを微調節可能に設け、光軸方向における水平楕円ミラーと水平双曲ミラーの前後位置関係及び垂直楕円ミラーと垂直双曲ミラーの前後位置関係を同じに設定したミラーマニピュレータと、オフラインで水平楕円ミラーと水平双曲ミラーの水平姿勢及び垂直楕円ミラーと垂直双曲ミラーの垂直姿勢をそれぞれ誤差内で理想姿勢になるように微調節するための基準を与えるアライメント監視手段とを有するものがある。

20

【0006】

特許文献1のX線光学系は、2keV以上のX線を200nm以下の高い分解能で収差なく縮小又は拡大させることを達成している。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2013-221874号公報

【発明の概要】

30

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、Kirkpatrick-Baez（K B）ミラータイプのX線顕微鏡にも様々な改善の余地はある。X線顕微鏡が普及し様々な科学分野において利用されることを想定した場合、意外と軽視できない課題、すなわち、X線顕微鏡装置の長さを2～3メートル以内としなければ、X線顕微鏡の搬入のために、廊下幅や出入り口幅等を特別に広く設計された施設を準備する必要がある。X線顕微鏡がこれよりも大きなサイズである以上、如何に分解能等の諸性能において優れていようとも、既存の研究等施設において広く利用されるにあたっての障害となる。本発明は、室内搬入サイズであり、普及可能なコンパクトサイズのX線顕微鏡を提供することを目的とするものである。

40

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記課題を解決し得た本発明のX線顕微鏡は、X線源と、試料保持部と、反射凹面を有するKirkpatrick-Baezミラー（以下、「凹面K Bミラー」と記載する）と、反射凸面を有するKirkpatrick-Baezミラー（以下、「凸面K Bミラー」と記載する）と、前記試料保持部の位置と結像関係の位置にある受光部とを、光軸に沿って順に有するものである。

【0010】

詳細は後述するが、本発明のX線顕微鏡では、試料保持部側に凹面K Bミラー、受光部側に凸面K Bミラーを配置しているため、レンズ系の主面の位置と試料保持部との距離（前側焦点距離）を従来よりも小さくすることが可能となった。これにより、拡大倍率は従

50

来の光学系と同程度とすることを前提として、後側焦点距離であるレンズ系の主面の位置と受光部との距離を飛躍的に短くすることができ、長さが2～3メートル以内のX線顕微鏡を実現することが可能となった。

【0011】

上記X線顕微鏡において、前記凹面KBミラーの前記反射凹面は、楕円形状を含むものであり、前記試料保持部は、該楕円の焦点位置にあることが望ましい。

【0012】

上記X線顕微鏡において、前記凸面KBミラーの前記反射凸面は、一方曲線と他方曲線を含む双曲線のうち、前記一方曲線を含むものであり、前記受光部は、前記双曲線の焦点のうち他方曲線側の焦点位置にあることが望ましい。

10

【0013】

上記X線顕微鏡において、前記凸面KBミラーと前記受光部との距離よりも、前記凹面KBミラーと前記受光部との距離が長い形態を好ましく実施し得る。

【0014】

上記X線顕微鏡において、前記試料保持部と前記凹面KBミラーとの間に、前記凸面KBミラーと前記凹面KBミラーを含む結像系の主面が存在する形態を好ましく実施し得る。

【0015】

上記X線顕微鏡において、前記試料保持部の位置と前記受光部の位置との距離が2.5m以内である形態を好ましく実施し得る。

20

【0016】

上記X線顕微鏡において、前記凸面KBミラーは少なくとも2つ配置されており、前記凹面KBミラーも少なくとも2つ配置されており、一方の凸面KBミラーの法線と他の凸面KBミラーの法線は互いに非平行であり、一方の凹面KBミラーの法線と他の凹面KBミラーの法線は互いに非平行である形態を好ましく実施し得る。

【0017】

上記X線顕微鏡において、前記試料保持部と前記凹面KBミラーとの最短距離が6mm以上であることが望ましい。

【0018】

上記X線顕微鏡において、前記凸面KBミラーまたは前記凹面KBミラーのうち少なくとも一方は、光軸方向に移動可能に設置することが望ましい。

30

【0019】

上記X線顕微鏡において、前記試料保持部と前記凹面KBミラーの間に、第1の凹面KBミラーと第2の凹面KBミラーが配置されており、前記凹面KBミラーの法線と前記第1の凹面KBミラーの法線は互いに非平行であり、前記凸面KBミラーの法線と前記第2の凹面KBミラーの法線は互いに非平行であることが望ましい。

【0020】

前記第1の凹面KBミラーは、前記第2の凹面KBミラーよりも前記試料保持部に近く、前記第1の凹面KBミラーの反射凹面は双曲線を含んでおり、前記第2の凹面KBミラーの反射凹面は楕円を含んでいることが望ましい。

40

【発明の効果】

【0021】

本発明のX線顕微鏡は、X線源と、試料保持部と、凹面KBミラーと、凸面KBミラーと、前記試料保持部の位置と結像関係の位置にある受光部とを、光軸に沿って順に有する構成を有することにより、拡大倍率を保持しながら光学系の後側焦点距離を短縮することができ、これにより、従来のX線顕微鏡を、一気に、室内搬入サイズすなわち普及サイズにできるものであり、各種科学分野においてX線顕微鏡の利用拡大による産業上の利用価値は大きい。

【図面の簡単な説明】

【0022】

50

【図 1】図 1 は、本発明の実施の形態 1 における X 線顕微鏡の光学系の斜視図である。

【図 2】図 2 は、図 1 に示した X 線光学系の幾何学的な模式図（上段部分）と、参考のため当該 X 線光学系に用いた光学素子と同等の幾何光学的機能を有する可視光線光学系（下段部分）とを併記した図である。

【図 3】図 3 は、本発明の実施の形態 2 における X 線顕微鏡の光学系の斜視図である。

【図 4】図 4 は、実施の形態 2 における X 線顕微鏡による P S F を示す図である。

【図 5】図 5 は、実施の形態 3 における X 線顕微鏡の X 線光路を示すものである。

【図 6】図 6 は、比較形態 1 における X 線顕微鏡の X 線光路を示すものである。

【図 7】図 7 は、実施の形態 4 における X 線顕微鏡の X 線光路を示すものである。

【図 8】図 8 は、比較形態 2 における X 線顕微鏡の X 線光路を示すものである。

10

【図 9】図 9 は、実施の形態 5 における X 線顕微鏡の X 線光路を示すものである。

【図 10】図 10 は、比較形態 3 における X 線顕微鏡の X 線光路を示すものである。

【図 11】図 11 は、本発明の実施の形態 6 における X 線顕微鏡の光学系の斜視図である。

【図 12】図 12 は、実施の形態 6 における X 線顕微鏡の X 線光路（X 軸投影）を示すものである。

【図 13】図 13 は、実施の形態 6 における X 線顕微鏡の X 線光路（Y 軸投影）を示すものである。

【発明を実施するための形態】

【0023】

20

以下、本発明の実施の形態における X 線顕微鏡について説明する。本発明の X 線顕微鏡は、X 線源と、試料保持部と、凹面 K B ミラーと、凸面 K B ミラーと、試料保持部の位置と結像関係の位置にある受光部とを、光軸に沿って順に、少なくとも一つずつ有するものである。この構成により、X 線顕微鏡の拡大倍率を保持しながら、光学系の後側焦点距離を短縮することができる。以下、本発明の基本的要件である、X 線源、試料保持部、凹面 K B ミラー、凸面 K B ミラー、受光部について順に説明する。

【0024】

1. X 線源

X 線を放射する機能を有するものであれば特に制限されないが、実験室用途の小型の X 線管が好ましく用いられ、その他、放射光施設（S P r i n g - 8 等）を用いることもできる。可視光線による通常の光学顕微鏡と同様に、X 線顕微鏡でも、ケーラー照明や臨界照明を用いることが望ましく、これらの照明を実現できる光源を用いることが望ましい。なお、X 線領域では複雑なケーラー照明を行なうことは難しいため、通常、臨界照明を行なうか、視野程度の広さを有する X 線を適宜照射する。これにより観察対象となる試料に一樣な強度の X 線を照射することができ、ボケの少ない鮮明な結像を得ることができる。X 線のエネルギーについては特に制限なく、軟 X 線、X 線、硬 X 線を用いることができるが、200 nm 以内の高い分解能を得るため、好ましくは、2 k e V 以上のエネルギーを有する X 線、硬 X 線を用いることが望ましい。

30

【0025】

2. 試料保持部

40

試料保持部は、観察対象となる試料を X 線の光路上に保持する機能を有する器具であればどのようなものでよい。例えば、試料を単に載置するための台であってもよいし、試料を挟持するための 2 枚の誘電体平板であってもよいし、試料を固定するための誘電体単板、また、試料を吊すための棒状物等、さらには液体状の試料を保持する容器であってもよく、試料を X 線の光路上に保持する機能を有するあらゆる形態の器具を、試料保持部として用いることができる。試料保持部を構成する材料に特に制限はないが、試料保持部が X 線に直接当たる場合、X 線透過可能な材料を用いることが望ましい。また、X 線の照射による電荷の蓄積が起りにくい材料を選ぶことが望ましい。

【0026】

3. K B ミラー

50

上述のWolterミラーの反射面が、曲線の回転軌跡で構成されているのに対して、本発明に用いられるKBミラーは、一方向にのみ曲率を有する1次元集光ミラーである。KBミラーは、平板形状に近いWolterミラーに比べて表面の加工が容易である。KBミラーによるX線の入射角(KBミラー表面と光軸とのなす角)は、一般的には数ミリラジアン程度であり、入射したX線のうち80~90%程度が反射される。入射角が大きい場合は、KBミラーを透過してしまう割合が大きくなってしまふ。

【0027】

1枚のKBミラー全体の中で、反射表面が曲面形成されている部分は、X線が照射される範囲のみであっても十分であるが、KBミラーを使用しているうちに照射部分が劣化しても、KBミラーをスライドすることによりX線未照射の表面を使用できるように、曲率を有する前記一方向に直交する他方向に長い区間にわたって連続的にミラー形状を形成しておくことが好ましい。例えば、他方向のミラー形成区間の長さは、一方向のミラー形成区間の長さの好ましくは2~5倍、より好ましくは2~10倍、さらに好ましくは2~15倍とする。

【0028】

KBミラーの反射表面の形状精度(JIS B0182 基本事項306)は、好ましくは5nm以下、より好ましくは3nm以下、さらに好ましくは1nm以下である。また、反射表面の表面粗さ(JIS B0091:Rms)は、0.5nm以下とすることが好ましく、より好ましくは0.3nm以下、さらに好ましくは0.1nm以下である。

【0029】

なお、一般的に、「KBミラー」という用語は、法線方向が互いに直交する(例えば、X方向、Y方向)、2枚一組のミラー対を指す場合が多いが、本明細書において用いる「KBミラー」は、X線ミラー単体(1枚)のことを指すものとする。したがって、本発明のX線顕微鏡は、ミラー単体で使用する場合を含み、法線方向が互いに異なる複数枚のミラーを含む場合も含む。法線方向が互いに異なる複数枚のミラーを含む場合、各法線は、互いに、360度を(ミラーの枚数) \times 2で除した値の角度をなしていることが望ましい。例えば、KBミラーを2枚用いて結像させる場合、各ミラーの法線は、互いに、 $360 \text{度} \div (2 \times 2) = 90 \text{度}$ をなしていることが好ましい。

【0030】

また、本発明のX線顕微鏡は、凸面KBミラー1枚と凹面KBミラー1枚の1セットのみを含む場合のほか、凸面KBミラーと凹面KBミラーを複数セット用いる場合も含むものとする。本発明のX線顕微鏡は、凸面KBミラー1枚と凹面KBミラー1枚の1セットを最低限含めばよいのであり、更にその他に、第1の凹面KBミラーと第2の凹面KBミラーの1または複数のセット用いることもできる。

【0031】

3.1. 凹面KBミラー

上述のように、本発明のX線顕微鏡は、少なくとも、凹面KBミラーと凸面KBミラーとを含んでおり、このうち凹面KBミラーは、試料保持部に近い側に配置されるものである。凹面KBミラーの反射凹面の曲率や曲率分布は特に限定されないが、例えば、円弧状、楕円状、双曲線状、放物線状とすることができる。中でも、良好な結像特性を得る観点から、楕円状とすることが好ましい。また、楕円ミラーの焦点位置、特に試料保持部に近い焦点の位置に試料保持部を配置することが好ましい。

【0032】

3.2. 凸面KBミラー

上述のように、本発明のX線顕微鏡は、少なくとも、凹面KBミラーと凸面KBミラーとを含んでおり、凸面KBミラーは、受光部に近い側に配置されるものである。反射凸面の断面形状は特に限定されないが、例えば、円弧状、楕円状、双曲線状、放物線状とすることができる。中でも、良好な結像特性を得る観点から、双曲線状とすることが望ましい。また、一方曲線と他方曲線を含む双曲線のうち、一方曲線を含むものであり、受光部は、双曲焦点のうち他方曲線側の焦点位置とすることが好ましい。

【 0 0 3 3 】

4 . 受 光 部

本発明における受光部は、本発明のX線顕微鏡の凸面KBミラーと凹面KBミラーによる結像X線像を受光する部材である。受光する部材は、典型的には、アレイセンサーであり、好ましくは二次元アレイセンサーである。二次元アレイセンサーとして、例えば、CCD素子やCMOS素子を用いることができる。アレイセンサーの画素ピッチは、結像X線像を鮮明に受光する観点から、好ましくは20 μ m以下、より好ましくは9 μ m以下、さらに好ましくは3 μ m以下である。

【 0 0 3 4 】

受光部は、受光したX線を、X線より波長の長い光、典型的には紫外線や可視光線に変換する拡散板であってもよい。拡散板として、例えば、蛍光材料を含む基材を用いることができる。拡散板によって拡散された光を可視光線レンズで結像し、アレイセンサー、好ましくは二次元アレイセンサー、例えば、CCD素子やCMOS素子により撮影することにより、受光部におけるX線結像を取得することができる。

10

【 0 0 3 5 】

本願は、2015年9月25日に出願された日本国特許出願第2015-188850号に基づく優先権の利益を主張するものである。2015年9月25日に出願された日本国特許出願第2015-188850号の明細書の全内容が、本願に参考のため援用される。

【 0 0 3 6 】

(実施の形態1)

以下、本発明の実施の形態1におけるX線顕微鏡について説明する。

図1は、実施の形態1におけるX線顕微鏡の光学系の斜視図である。図1において、X線光学系の出発点であるX線源1から発せられたX線2は、顕微観察対象となる試料を保持する試料保持部3に照射され、試料保持部3を透過したX線2(発光や散乱光も含む)は、凹面KBミラー4の反射凹面、凸面KBミラー5の反射凸面、凹面KBミラー4の法線に対して直交する法線を有する凹面KBミラー6の反射凹面、凸面KBミラー5の法線に対して直交する法線を有する凸面KBミラー7の反射凸面に、順次反射し、試料保持部3の位置と結像関係の位置にある受光部8に到達する。図1の例では、楕円焦点と双曲焦点が一致しているため、凹面KBミラー4の反射凹面から発せられた光が、この反射凹面と凸面KBミラー5の反射凸面の計2回の反射を経て双曲焦点にすべて到達し、光路長がすべて等しくなるため、X線が収差なく集光する。なお、楕円焦点と双曲焦点が一致していなくても、集光は可能である。凹面KBミラー4や凸面KBミラー5は、円筒面ミラーなどの他の凹面ミラーや凸面ミラーであってもよいが、球面収差を小さくする観点から、図1のように、凹面KBミラー4として楕円凹面ミラーを用い、凸面KBミラー5として双曲凹面ミラーを用いることが望ましい。X線2が受光部8において結像するためには、「集光」の条件と「コマ収差抑制」の条件が必要であり、コマ収差抑制のためにはX線を図1のように偶数回反射させる必要がある。

30

【 0 0 3 7 】

凹面KBミラー4は、X軸方向に楕円曲率を有しY軸方向に曲率を有さず、これにより、X線をX軸方向に集光する機能を有している。凸面KBミラー5は、X軸方向に双曲線の曲率を有しY軸方向に曲率を有さず、これにより、X線の進行方向をX軸方向にのみ変更する機能を有している。他方、凹面KBミラー6は、Y軸方向に楕円曲率を有しX軸方向に曲率を有さず、これにより、X線をY軸方向に集光する機能を有している。凸面KBミラー7は、Y軸方向に双曲線の曲率を有しX軸方向に曲率を有さず、これにより、X線の進行方向をY軸方向にのみ変更する機能を有している。凹面KBミラー4と凸面KBミラー5によるX軸方向の拡大倍率と、凹面KBミラー6と凸面KBミラー7によるY軸方向の拡大倍率が一致するとき、受光部8上で歪みのない試料像が得られる。

40

【 0 0 3 8 】

X軸方向の拡大倍率とY軸方向の拡大倍率が一致していなくても、受光部8で得られる

50

試料像を、可視光等の光学系により、或いは電子情報上、伸縮させることにより、X軸方向の拡大倍率とY軸方向の拡大倍率が等しくなるように補正し、歪みのない試料像を得ることができる。

【0039】

図2は、図1に示したX線光学系の幾何学的な模式図(上段部分)と、参考のため当該X線光学系に用いた光学素子と同等の幾何光学的機能を有する可視光線光学系(下段部分)とを併記した図である。なお、図2の上段部分では、理解を容易にするため、Y軸方向の集光のための凹面KBミラー6、凸面KBミラー7は、図示していない。図2の上段部分において、X線光学系の出発点であるX線源1から発せられたX線2は、顕微観察対象となる試料を保持する試料保持部3に照射され、試料保持部3を透過したX線2は、凹面KBミラー4の反射凹面、凸面KBミラー5の反射凸面に、順次反射し、試料保持部3の位置と結像関係の位置にある受光部8に到達する。受光部8において検出されるX線強度分布を特定することにより、試料の像を把握することができる。

10

【0040】

図2において、凹面KBミラー4と凸面KBミラー5から形成される集光光学系の主面は、点線で示された位置となる。試料保持部3と主面との距離(前側焦点距離) f と、主面と受光部8との距離(後側焦点距離) L と、集光光学系の拡大倍率 Mag の関係は、下記(1)式によって示されるものとなる。

$$Mag = L / f \quad \dots (1)$$

【0041】

この(1)式を用い、後述の実施の形態3~5において本発明のX線顕微鏡の光学系短縮のメカニズムについて説明する。なお、試料保持部3の位置と受光部8の位置との距離($L + f$)は、2.5m以内とすることが好ましい。より好ましくは2.0m以内、さらに好ましくは1.8m以内である。これを実現するためには、 f の値は小さい方が望ましいが、試料保持部3と凹面KBミラー4との間のワーキングディスタンスをある程度確保するためには、6mm以上とすることが好ましく、より好ましくは8mm以上、さらに好ましくは10mm以上である。 f の値の上限は、例えば、40mm以下、より好ましくは20mm以下、より好ましくは16mm以下である。

20

【0042】

(実施の形態2)

図3は、実施の形態2におけるX線顕微鏡の光学系の斜視図である。実施の形態2におけるX線顕微鏡が、実施の形態1におけるX線顕微鏡と異なる点は、実施の形態2では、凹面KBミラー4および凸面KBミラー5が存在していない点である。その他の点は、実施の形態1のX線顕微鏡と同じものである。

30

【0043】

実施の形態2におけるX線顕微鏡の結像特性を評価するため、X線源が理想的な点光源であるとの条件を与えて、受光部8におけるX線強度分布である点拡がり関数(PSF: Point Spread Function)を計算した。図4は、かかる点拡がり関数を示したものであり、横軸は、Y軸上のスケール(500nmが中心)を示したものであり、縦軸は、受光部8におけるX線強度を示したものである。図4から分かるように、中央ピークの半値幅(FWHM)は38nmであり、高い空間分解能を備えていることがわかる。なお、計算に用いた詳細な条件は、下記の通りである。

40

Mag : 181倍

L : 0.7m

f : 4.0mm

凹面KBミラー6と凸面KBミラー7のレンズ系の NA : 1.3×10^{-3}

【0044】

(実施の形態3)

実施の形態2と同様に、凹面KBミラー4および凸面KBミラー5が存在していないX線顕微鏡を想定したX線光路シミュレーションを行なった。図5は、試料保持部(横軸の

50

ゼロ点) から 120 mm 離れた場所までの、X 線光路を示すものであり、X 線光路の途中には、凹面 K B ミラー 6 と凸面 K B ミラー 7 が順次配置されている。

【0045】

(比較形態 1)

図 6 は、実施の形態 3 に示した凹面 K B ミラー 6 および凸面 K B ミラー 7 の光軸方向における位置と同位置に、凹面 K B ミラー 6 および凸面 K B ミラー 7 の代わりに、従来と同様の 2 つの凹面 K B ミラー (凹面 K B ミラー 19 および凹面 K B ミラー 20) を配置した光学系の X 線光路を示すものである。

【0046】

(実施の形態 4)

実施の形態 2 と同様に、凹面 K B ミラー 4 および凸面 K B ミラー 5 が存在していない X 線顕微鏡を想定した X 線光路シミュレーションを行なった。図 7 は、試料保持部 (横軸のゼロ点) から 120 mm 離れた場所までの X 線光路を示すものであり、X 線光路の途中には、実施の形態 3 の例とは異なる位置に凹面 K B ミラー 6 と凸面 K B ミラー 7 が順次配置されている。

【0047】

(比較形態 2)

図 8 は、実施の形態 4 に示した凹面 K B ミラー 6 および凸面 K B ミラー 7 と光軸方向における同位置に、凹面 K B ミラー 6 および凸面 K B ミラー 7 の代わりに、従来と同様の 2 つの凹面 K B ミラー (凹面 K B ミラー 19 および凹面 K B ミラー 20) を配置した光学系の X 線光路を示すものである。

【0048】

(実施の形態 5)

実施の形態 2 と同様に、凹面 K B ミラー 4 および凸面 K B ミラー 5 が存在していない X 線顕微鏡を想定した X 線光路シミュレーションを行なった。図 9 は、試料保持部 (横軸のゼロ点) から 120 mm 離れた場所までの X 線光路を示すものであり、X 線光路の途中には、実施の形態 3, 4 の例とは異なる位置に凹面 K B ミラー 6 と凸面 K B ミラー 7 が順次配置されている。

【0049】

(比較形態 3)

図 10 は、実施の形態 5 に示した凹面 K B ミラー 6 および凸面 K B ミラー 7 と光軸方向における同位置に、凹面 K B ミラー 6 および凸面 K B ミラー 7 の代わりに、従来と同様の 2 つの凹面 K B ミラー (凹面 K B ミラー 19 および凹面 K B ミラー 20) を配置した光学系の X 線光路を示すものである。

【0050】

(実施の形態 6)

図 11 は、本発明の実施の形態 6 における X 線顕微鏡の光学系の斜視図である。実施の形態 6 における X 線顕微鏡が実施の形態 1 における X 線顕微鏡と異なる点は、実施の形態 1 では X 軸方向の集光のために凹面 K B ミラー 4 および凸面 K B ミラー 5 を用いているのに対して、実施の形態 6 では X 軸方向の集光のために第 1 の凹面 K B ミラー 21 および、同じく凹面である第 2 の凹面 K B ミラー 22 を用いている点である。その他の点は、実施の形態 1 の X 線顕微鏡と同じものである。

【0051】

第 1 の凹面 K B ミラー 21 および第 2 の凹面 K B ミラー 22 は、X 軸方向に曲率を有し Y 軸方向に曲率を有さず、これにより、X 線を X 軸方向に集光する機能を有している。

他方、凹面 K B ミラー 6 は、Y 軸方向に曲率を有し X 軸方向に曲率を有さず、これにより、X 線を Y 軸方向に集光する機能を有している。また、凸面 K B ミラー 7 は Y 軸方向に曲率を有し X 軸方向に曲率を有さず、これにより、X 線の進行方向を Y 軸方向にのみ変更する機能を有している。

【0052】

10

20

30

40

50

上述の実施の形態 1 における X 線顕微鏡は試料の拡大倍率を大きくする効果が高いものであるが、ミラーの NA が大きい場合は、拡大倍率が高くなりすぎる。特に試料に近いミラー（実施の形態 1 では X 軸方向集光ミラーのペアである凹面 KB ミラー 4 と凸面 KB ミラー 5）ではミラーの NA が大きくなるため、拡大倍率が高くなりすぎる。実用的には、縦横（X 軸方向と Y 軸方向）の拡大倍率は一致していることが望ましい。本実施の形態 6 における X 線顕微鏡では、試料に近い側のミラーペア（第 1 の凹面 KB ミラー 2 1 および第 2 の凹面 KB ミラー 2 2）を両方とも凹面鏡にすることにより X 軸方向の拡大倍率を適度に抑え、X 線顕微鏡の縦横倍率を一致するように調整することができる。

【 0 0 5 3 】

より好ましくは、第 2 の凹面 KB ミラー 2 2 よりも試料保持部に近い場所にある第 1 の凹面 KB ミラー 2 1 の反射凹面は双曲線を含んだものであり、第 2 の凹面 KB ミラー 2 2 の反射凹面は楕円を含んだものであることが望ましい。図 1 1 の例では、第 2 の凹面 KB ミラー 2 2 の楕円焦点と第 1 の凹面 KB ミラー 2 1 の双曲焦点を一致させているため、実施の形態 1 の場合と同様に、試料の 1 点から発した X 線が像面の 1 点に集まる。したがって、試料から像面までの光路長がすべて等しくなり、鮮鋭な像を得ることができる。

【 0 0 5 4 】

図 1 2 は、実施の形態 6 における X 線顕微鏡の第 1 の凹面 KB ミラー 2 1 および第 2 の凹面 KB ミラー 2 2 付近の X 線光路（X 軸投影）を示すものであり、図 1 3 は、実施の形態 6 における X 線顕微鏡の凹面 KB ミラー 6 および凸面 KB ミラー 7 付近の X 線光路（Y 軸投影）を示すものである。この X 線顕微鏡の集光性能は下記表 1 の通りである。

【 0 0 5 5 】

10

20

【表 1】

種類		第1凹面KBミラー-21	第2凹面KBミラー-22	凹面KBミラー-6	凸面KBミラー-7
曲線	式	$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$	$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$	$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$	$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$
	a	0.095m	1.573m	0.0845m	1.479m
	b	$4.075e^{-4}$ m	$5.619e^{-3}$ m	$1.254e^{-3}$ m	$1.853e^{-3}$ m
見込み角		16.86mrad	14.50mrad	15.68mrad	5.22mrad
NA		5.057×10^{-3}	5.043×10^{-3}	5.043×10^{-3}	
焦点距離f		21.47mm	22.12mm	22.12mm	
拡大倍率		144.6倍	144.6倍	140.4倍	
L+f		3127mm			

10

20

30

40

【 0 0 5 6 】

(考察)

図5～10において、レンズ系の主面の位置は、いずれも点線で表している。

図5(実施の形態3)、図6(比較形態1)を比較すると、比較形態1では、レンズの主面の位置が、試料保持部から70mm(図6のf値参照)離れているのに対して、実施の形態3では、レンズの主面の位置が、試料保持部から12mm(図5のf値参照)と、非常に短縮された数値となっている。fの値が小さくなれば、上述の式(1)から分かるように、顕微鏡の拡大倍率Magを同程度とする前提において、Lの値を小さくする設計が可能となる。図6の例では、Lの値が12.6mであるのに対して、図5の例では、L

50

の値が 2.0 m と、非常に短縮されている。したがって、X線顕微鏡は、実験室に搬入可能な程度にコンパクトに設計できる。

【0057】

同様に、図7（実施の形態4）、図8（比較形態2）を比較しても、fの値は22 mm から4.0 mm に短縮され、主面の位置は、試料保持部3の位置に近づいている。これに伴い、図8の例では、Lの値が3.8 m であるのに対して、図7の例では、Lの値が0.7 m と、非常に短縮されている。したがって、X線顕微鏡は、実験室に搬入可能な程度にコンパクトに設計できる。

【0058】

同様に、図9（実施の形態5）、図10（比較形態3）を比較しても、fの値は43 mm から11 mm に短縮され、主面の位置は、試料保持部3の位置に近づいている。これに伴い、図10の例では、Lの値が7.7 m であるのに対して、図9の例では、Lの値が2.0 m と、非常に短縮されている。したがって、X線顕微鏡は、実験室に搬入可能な程度にコンパクトに設計できる。

【0059】

上記実施の形態3～5は、1次元集光の光学系を例にして本発明の効果を示したものであるが、2次元の集光を行なう場合は、実施の形態1において説明した通り、X軸方向とY軸方向のそれぞれに凹面KBミラーと凸面KBミラーのセットを用いる。例えば、実施の形態3（図5）のミラー系と、実施の形態4（図7）のミラー系を光軸周りに90度回転させたミラー系の双方を用いれば、ミラー同士が干渉することなく2次元の集光光学系を構成することができる。なお、図5のミラー系の後側焦点距離（L値）が2.0 m であり、図7のミラー系の後側焦点距離（L値）が0.7 m であることから、例えば図7のミラー系のNA値や拡大倍率を調整するなどして、双方の後側焦点距離を一致させることができる。この調整の際に、X方向の拡大倍率とY方向の拡大倍率が異なるものとなる場合もあるが、上記実施の形態において説明したように、像面の歪みは、光学的或いは電子的に補正することができる。いずれにしても、2次元の集光光学系を構成しても、後側焦点距離が2.0 m と非常にコンパクトなX線顕微鏡を実現することが可能である。

【0060】

上記実施の形態6は、Y軸方向の集光のために凹面KBミラー6および凸面KBミラー7を用い、X軸方向の集光のために第1の凹面KBミラー21と第2の凹面KBミラー22を用いているX線顕微鏡である。上記表1からわかるように、本実施の形態のX線顕微鏡では、試料保持部3に位置に近い第1の凹面KBミラー21と第2の凹面KBミラー22が共に凹面の反射面を有していることにより主面の位置を試料から離すことができ、X軸方向の拡大倍率を低く抑えることができる。これにより、X軸方向の拡大倍率とY軸方向の拡大倍率を近い、すなわち縦横比が1に近い顕微鏡像を得ることができる。また、試料保持部3の位置と受光部8の位置との距離（L+f）は3127 mm であり、装置全体の小型化も達成できている。

【0061】

以上のように、従来のX線顕微鏡では、拡大倍率を一定程度得るため、主面を試料保持部3の位置から離さざるを得なかったものを、本発明のX線顕微鏡では、主面の位置を、試料保持部3の位置に大きく近づけることができるようになったものであり、これに伴い、Lの値を小さくし、実験室に搬入可能なX線顕微鏡を提供することができる。

【産業上の利用可能性】

【0062】

本発明のX線顕微鏡は、拡大倍率を保持しながら光学系の後側焦点距離を短縮ことができ、普及サイズすなわち室内搬入サイズではなかった従来のX線顕微鏡を、普及可能なコンパクトサイズにできるものであり、各種科学分野においてX線顕微鏡の利用による産業上の利用価値は大きい。

【符号の説明】

【0063】

10

20

30

40

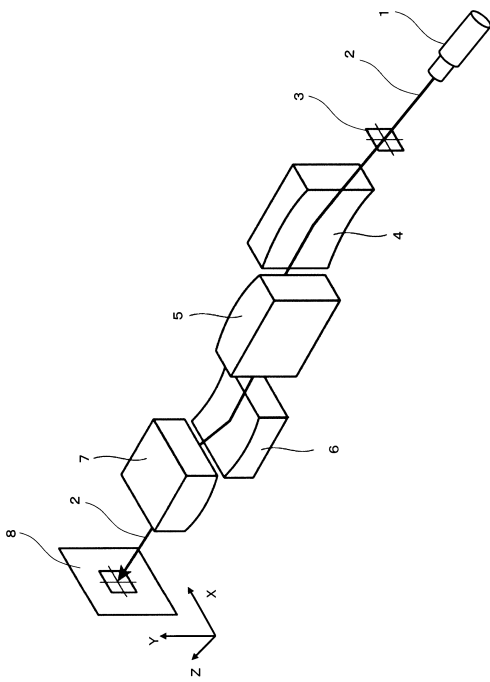
50

- 1 X線源
- 2 X線
- 3 試料保持部
- 4 凹面KBミラー
- 5 凸面KBミラー
- 6 凹面KBミラー
- 7 凸面KBミラー
- 8 受光部
- 11 可視光源
- 12 可視光線
- 13 試料保持部
- 14 可視光凸レンズ
- 15 可視光凹レンズ
- 18 受光部
- 19 凹面KBミラー
- 20 凹面KBミラー
- 21 第1の凹面KBミラー
- 22 第2の凹面KBミラー

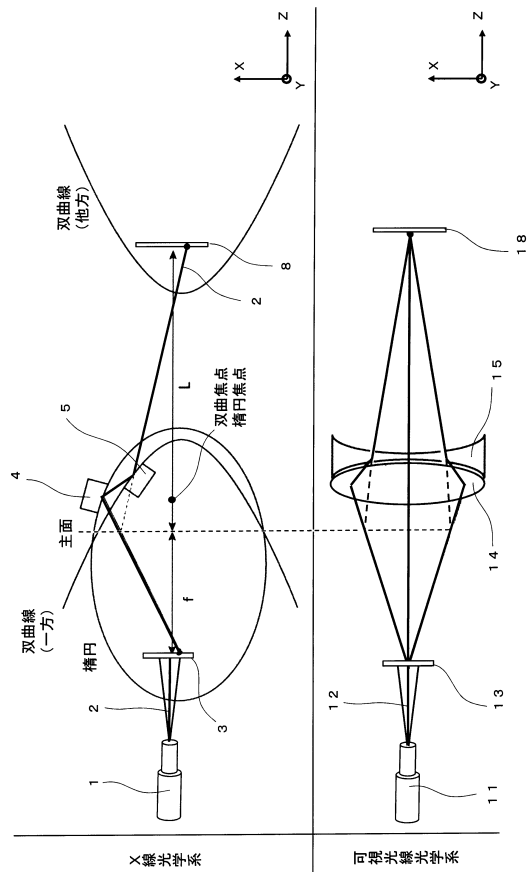
10

20

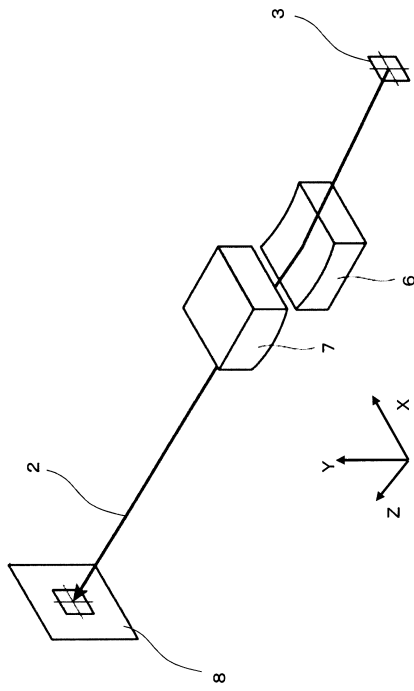
【図1】



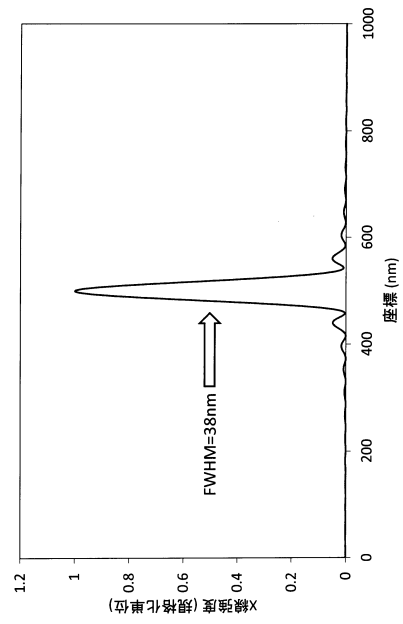
【図2】



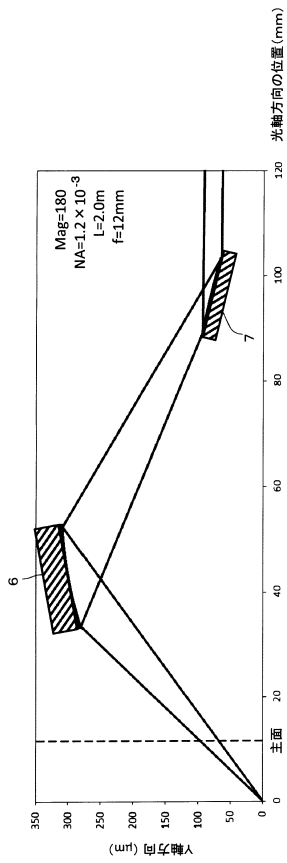
【図3】



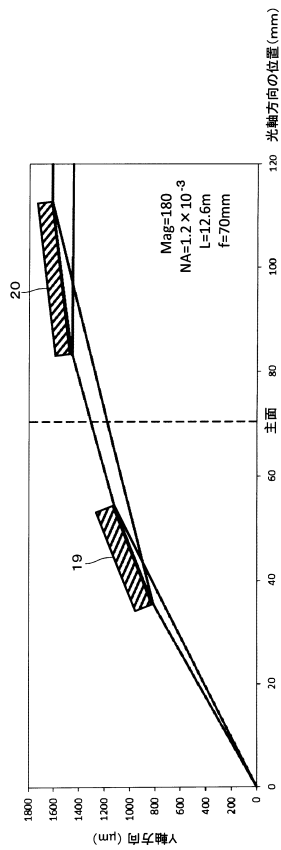
【図4】



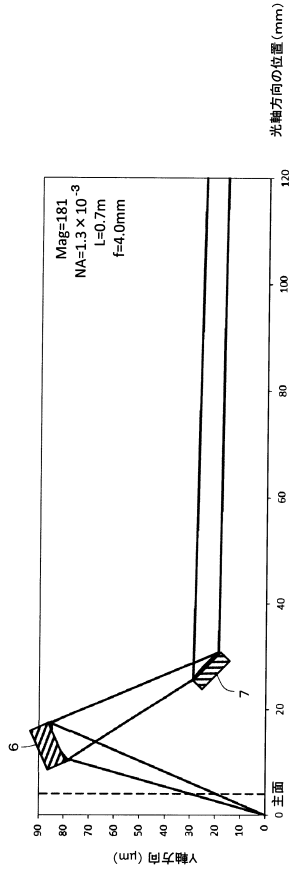
【図5】



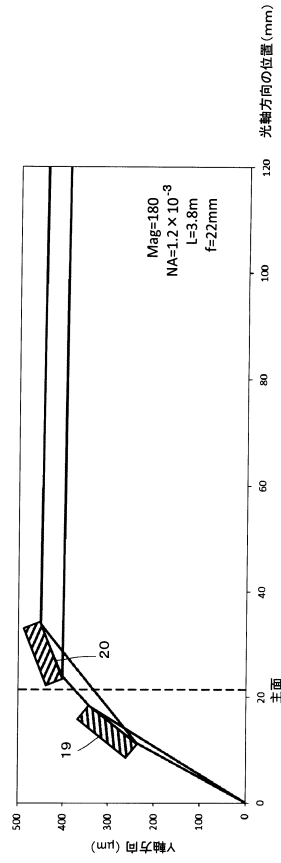
【図6】



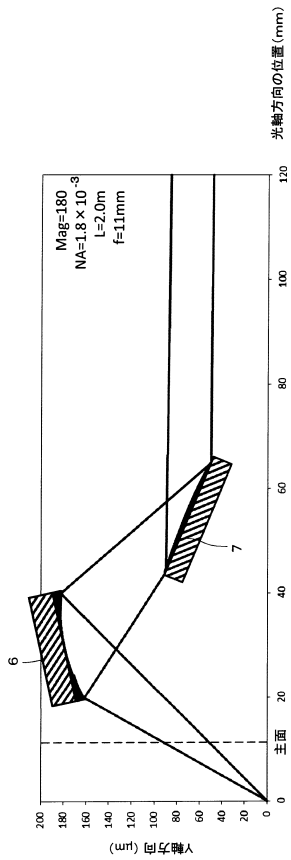
【図 7】



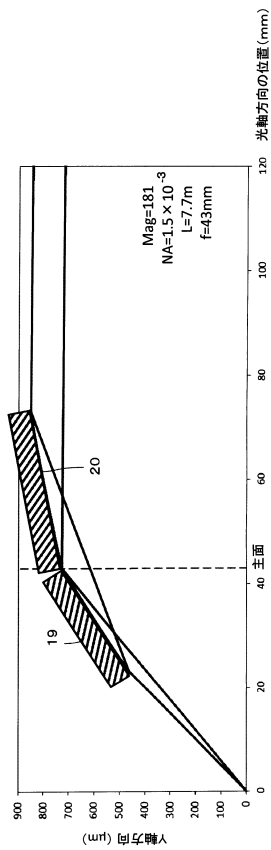
【図 8】



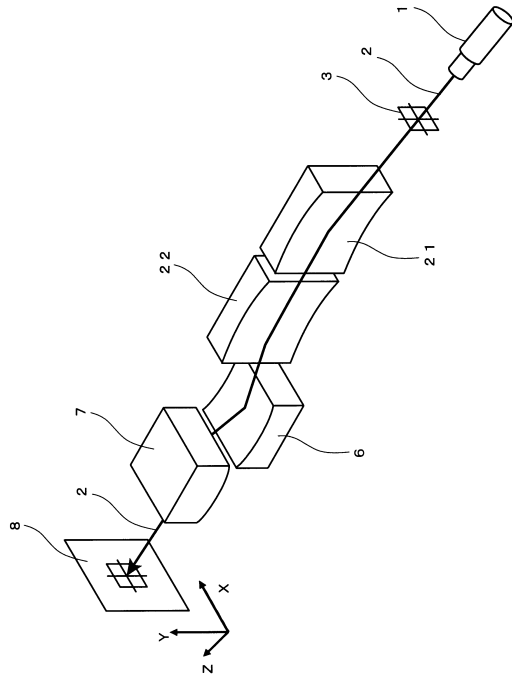
【図 9】



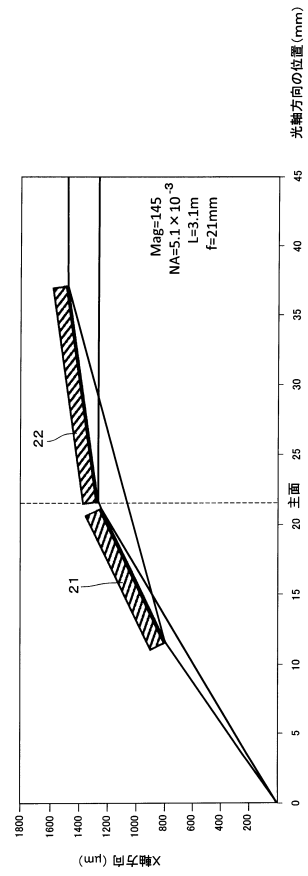
【図 10】



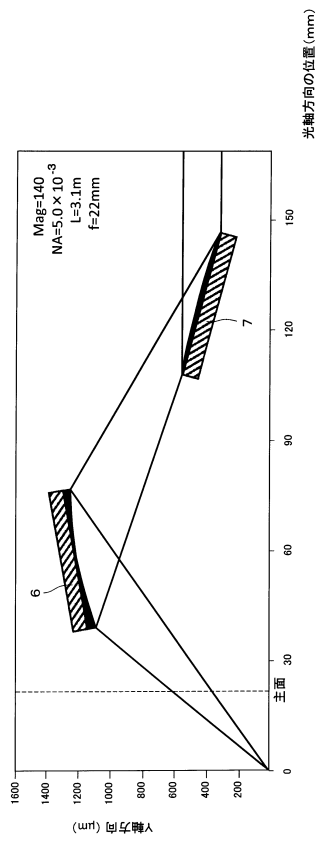
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 1 3】



フロントページの続き

(72)発明者 山田 純平
大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内

審査官 藤本 加代子

(56)参考文献 特開2014-13169(JP,A)
特開2013-221874(JP,A)
特開平9-145899(JP,A)
松山智至 他, Advanced Kirkpatrick-Baezミラー光学系を用いた高分解能かつ色収差のない硬
X線顕微鏡の開発, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 日本, 公益社団法
人精密工学会, 2014年 3月 1日, No. R46
永井宏明 他, 極端紫外光と結像光学系, 光学, 日本, 一般社団法人日本光学会, 1999年
8月 2日, 第28巻第12号, 第16-21頁
株式会社ジェイテック, 平成22年度戦略的基板技術高度化支援事業 「放射光用ミラーに関す
る加工技術の高精度化」, 近畿経済産業局 研究開発成果報告書, 日本, 経済産業省 中小企業
庁, 2011年 9月30日

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G21K 7/00
G21K 1/00
G21K 1/06
JSTPlus(JDreamIII)