

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-138772
(P2016-138772A)

(43) 公開日 平成28年8月4日(2016.8.4)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO1N 23/04 (2006.01)	GO1N 23/04	2G001
GO1T 1/17 (2006.01)	GO1T 1/17 F	2G059
GO1T 7/00 (2006.01)	GO1T 1/17 A	2G188
GO1N 23/201 (2006.01)	GO1T 7/00 A	
GO1N 21/33 (2006.01)	GO1N 23/201	

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 26 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2015-12864 (P2015-12864)
(22) 出願日 平成27年1月27日 (2015.1.27)

(71) 出願人 503359821
国立研究開発法人理化学研究所
埼玉県和光市広沢2番1号
(74) 代理人 110001933
特許業務法人 佐野特許事務所
(72) 発明者 ▲高▼橋 幸生
埼玉県和光市広沢2番1号 独立行政法人
理化学研究所内
(72) 発明者 鈴木 明大
埼玉県和光市広沢2番1号 独立行政法人
理化学研究所内
(72) 発明者 下村 啓
埼玉県和光市広沢2番1号 独立行政法人
理化学研究所内

最終頁に続く

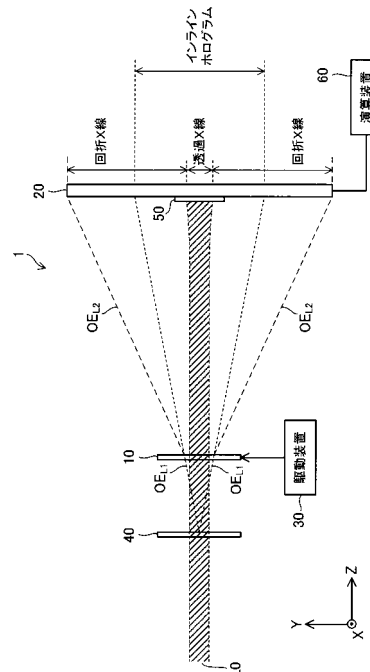
(54) 【発明の名称】 イメージング装置及び方法

(57) 【要約】

【課題】 X線タイコグラフィにおいて検出器に必要な検出ダイナミックレンジを圧縮する。

【解決手段】 X線の入射光L0が照射される試料10の下流側に二次元検出器20を配置する。試料10からの透過X線を遮蔽する遮蔽体50が試料10及び二次元検出器20間に配置される。試料10の上流側に参照光源用構造体40を配置する。参照光源用構造体40は、入射光L0の一部を散乱して散乱光をインラインホログラムの参照光として試料10に照射する。二次元検出器20の検出面には、試料10の構造に応じた回折X線パターン及びインラインホログラムが形成される。それらの検出結果である光強度検出パターンを試料10をステップ移動させながら順次取得し、複数の光強度検出パターンに対して反復的位相回復アルゴリズムによる演算を適用することで試料10の像を生成する。

【選択図】 図7



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

入射光が照射される試料の上流側に配置され、前記入射光の一部を散乱させて散乱光を前記試料に向けて放射する散乱用構造体と、

前記試料の下流側に配置され、前記入射光に基づいて前記試料から到来する光の強度を所定の二次元平面内で検出する二次元検出器と、

前記試料からの前記二次元検出器に向かう光の内、少なくとも最大強度を持つ光の前記二次元検出器への到達を遮蔽する遮蔽体と、

前記二次元検出器の検出結果に基づき前記試料の像を生成する演算手段と、を備えたことを特徴とするイメージング装置。

10

【請求項 2】

前記散乱用構造体は、前記入射光の光軸に平行な軸を持った凸型又は凹型の柱状構造部を有し、

前記柱状構造部の断面積は、前記試料の位置における前記入射光の広がり面積よりも小さく、

前記試料の位置における前記散乱用構造体からの散乱光の広がり大きさは、前記試料の位置における前記入射光の広がり大きさよりも大きい

ことを特徴とする請求項 1 に記載のイメージング装置。

【請求項 3】

前記遮蔽体は、少なくとも、前記入射光に基づく前記試料の透過光の前記二次元検出器への到達を遮蔽する

ことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のイメージング装置。

20

【請求項 4】

前記光軸に直交する方向成分を持つ方向に前記試料をステップ移動させながら前記二次元検出器による検出を繰り返し行うことで第 1 ~ 第 n の光強度検出パターンを前記二次元検出器から取得し (n は 2 以上の整数)、

第 i の光強度検出パターンを取得するときの前記試料への前記入射光の照射領域は、第 j の光強度検出パターンを取得するときの前記試料への前記入射光の照射領域と一部において重なり (i は n 以下の整数、 j は i 以外且つ n 以下の何れかの整数)、

前記演算手段は、前記第 1 ~ 第 n の光強度検出パターンに基づき前記試料の像を生成する

ことを特徴とする請求項 1 ~ 3 の何れかに記載のイメージング装置。

30

【請求項 5】

前記入射光は、干渉性を有する X 線を含む

ことを特徴とする請求項 1 ~ 4 の何れかに記載のイメージング装置。

【請求項 6】

入射光が照射される試料の上流側に、前記入射光の一部を散乱させて散乱光を前記試料に向けて放射する散乱用構造体を配置するとともに、前記試料の下流側に、前記入射光に基づいて前記試料から到来する光の強度を所定の二次元平面内で検出する二次元検出器を配置し、

前記試料からの前記二次元検出器に向かう光の内、少なくとも最大強度を持つ光の前記二次元検出器への到達を遮蔽した状態で、前記二次元検出器の検出結果に基づき前記試料の像を生成する

ことを特徴とするイメージング方法。

40

【請求項 7】

前記散乱用構造体は、前記入射光の光軸に平行な軸を持った凸型又は凹型の柱状構造部を有し、

前記柱状構造部の断面積は、前記試料の位置における前記入射光の広がり面積よりも小さく、

前記試料の位置における前記散乱用構造体からの散乱光の広がり大きさは、前記試料

50

の位置における前記入射光の広がり大きさよりも大きいことを特徴とする請求項 6 に記載のイメージング方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、イメージング装置及び方法に関する。

【背景技術】

【0002】

コヒーレント光を利用したイメージング技術として、X線タイコグラフィが提案されている（例えば非特許文献 1 参照）。

10

【0003】

図 19 に X 線タイコグラフィの原理図を示す。X 線タイコグラフィでは、観察対象である試料をステップ移動させながら、コヒーレントな（干渉性に優れた）X 線を試料の各位置に照射し、試料の各位置に X 線を照射したときの透過 X 線強度と回折 X 線強度パターンを二次元 X 線検出器で検出する。結果、複数の透過及び回折強度パターンが得られ、その複数の透過及び回折強度パターンに対して反復的位相回復アルゴリズムによる演算を適用することにより、試料の観察像を生成する。反復的位相回復アルゴリズムは、例えば下記非特許文献 2 に開示されている。

【0004】

一般的な X 線顕微鏡では、レンズ等の結像光学素子の作成精度が分解能を制限する要因となっており、10 nm（ナノメートル）より優れた分解能を達成することが難しい。X 線タイコグラフィでは、レンズによる結像の代わりに計算機による位相回復計算を行うため、結像光学素子によって分解能が制限されることがないという特長がある。この特長が注目され、世界中に点在する大型放射光施設で X 線タイコグラフィの研究が進められており、金属ナノ粒子などの材料試料では 10 nm 程度の高い分解能が既の実現されている。

20

【0005】

また、インラインホログラム等の利用も別途研究されている（非特許文献 3 参照；非特許文献 3 の対応 URL は “https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcrsj1959/18/3/18_3_236/_article”）。

【先行技術文献】

30

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献 1】大阪大学、“「高空間分解能」かつ「高感度」な革新的 X 線顕微法を開発”、[online]、平成 25 年 3 月、大阪大学、[平成 26 年 12 月 24 日検索]、インターネット <http://www.osaka-u.ac.jp/ja/news/ResearchRelease/2013/03/20130304_2>

【非特許文献 2】Andrew M. Maiden、他 1 名、“An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging”、Ultramicroscopy、(オランダ)、平成 21 年、109 号、p. 1256 - 1262

【非特許文献 3】青木禎男、他 1 名、“X 線ホログラフィによる顕微法”、日本結晶学会誌、1976 年、18 号、No. 3、p. 236 - 240

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

X 線タイコグラフィで試料像を得るためには、回折 X 線はもちろん、透過 X 線も取得しなければならないが、透過 X 線の強度は回折 X 線の強度に対して非常に大きい。このため、二次元検出器のダイナミックレンジは相応に大きい必要がある。特に、生体細胞などの生物試料を観察対象にする場合、生物試料が酸素、炭素及び窒素などの軽元素で構成されているため、X 線の散乱能が小さく、通常、透過 X 線の強度に対して回折 X 線の強度が 10 万分の 1 以下になる。故に、生物試料を観察対象にする場合には特に大きなダイナミッ

50

クレンジが二次元検出器に要求されることになる。

【0008】

しかし、ダイナミックレンジの大きい二次元検出器の開発には膨大な費用と時間を要する。必要なダイナミックレンジを有する二次元検出器が現存していたとしても、ダイナミックレンジの拡大は二次元検出器の入手費用の増大につながる。例えば、 10^6 光子/ピクセル/秒の検出性能を持つピクセルアレイ検出器が実用化されているが、そのような二次元検出器は入手費用（例えば数千万円）が相当に高く、利用しにくい。

【0009】

尚、検出器に関し、単位“光子/ピクセル/秒”で示された数値は、各ピクセルにおいて1秒当たりを検出できる最大の光子数を表す。 10^m 光子/ピクセル/秒であれば、各ピクセルにおいて1秒当たり、1の光子と 10^m の光子を区別して検出できる（ m は自然数）。1の光子と 10^m の光子を区別して検出できることは、0の光子と1の光子と 10^m の光子を区別して検出できることをも意味する。以下では、二次元検出器の検出性能を示す、単位“光子/ピクセル/秒”で示された数値を、検出ダイナミックレンジ又は二次元検出器のダイナミックレンジと呼ぶ。検出ダイナミックレンジ又は二次元検出器のダイナミックレンジは、単位時間当たりの光子検出ダイナミックレンジとも言うべき、単位時間当たりで識別可能な光子数の最小値と最大値の比率を意味する。検出時間（即ち、検出に用いる時間）が増大すれば、二次元検出器で識別可能な光子数の比率は増大する。即ち例えば、 10^6 光子/ピクセル/秒であれば、 1000 秒かけることによって、各ピクセルにおいて1の光子と 10^9 の光子を区別して検出できる。

【0010】

そこで本発明は、必要な検出ダイナミックレンジの低減に寄与するイメージング装置及び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】

【0011】

本発明に係るイメージング装置は、入射光が照射される試料の上流側に配置され、前記入射光の一部を散乱させて散乱光を前記試料に向けて放射する散乱用構造体と、前記試料の下流側に配置され、前記入射光に基づいて前記試料から到来する光の強度を所定の二次元平面内で検出する二次元検出器と、前記試料からの前記二次元検出器に向かう光の内、少なくとも最大強度を持つ光の前記二次元検出器への到達を遮蔽する遮蔽体と、前記二次元検出器の検出結果に基づき前記試料の像を生成する演算手段と、を備えたことを特徴とする。

【0012】

遮蔽体を設けることにより、二次元検出器に求められる検出ダイナミックレンジを低減することが可能となる。遮蔽によって欠落する試料構造情報については、散乱用構造体からの散乱光に基づく二次元検出器の検出結果により補完可能である。つまり、良好なる像の生成を担保しつつ、二次元検出器に求められる検出ダイナミックレンジを低減することが可能となる。

【0013】

本発明に係るイメージング方法は、入射光が照射される試料の上流側に、前記入射光の一部を散乱させて散乱光を前記試料に向けて放射する散乱用構造体を配置するとともに、前記試料の下流側に、前記入射光に基づいて前記試料から到来する光の強度を所定の二次元平面内で検出する二次元検出器を配置し、前記試料からの前記二次元検出器に向かう光の内、少なくとも最大強度を持つ光の前記二次元検出器への到達を遮蔽した状態で、前記二次元検出器の検出結果に基づき前記試料の像を生成することを特徴とする。

【0014】

上記遮蔽によって、二次元検出器に求められる検出ダイナミックレンジを低減することが可能となる。遮蔽によって欠落する試料構造情報については、散乱用構造体からの散乱光に基づく二次元検出器の検出結果により補完可能である。つまり、良好なる像の生成を担保しつつ、二次元検出器に求められる検出ダイナミックレンジを低減することが可能と

10

20

30

40

50

なる。

【発明の効果】

【0015】

本発明によれば、必要な検出ダイナミックレンジの低減に寄与するイメージング装置及び方法を提供することが可能である。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】本発明の参考実施形態に係るイメージング装置の構成を示す斜視図である。

【図2】本発明の参考実施形態に係るイメージング装置の構成を示す側面図である。

【図3】試料のステップ移動と入射光の照射領域の位置変化を説明するための図である。

10

【図4】本発明の参考実施形態に係り、X線タイコグラフィによる試料像の構築動作フローチャートである。

【図5】フーリエ反復位相回復法の基本アルゴリズムを示す図である。

【図6】本発明の参考実施形態のシミュレーションにおける、テスト画像と光強度検出パターンを示す図である。

【図7】本発明の第1実施形態に係るイメージング装置の構成を示す側面図である。

【図8】本発明の第1実施形態に係り、参照光源用構造体の一例の斜視図及び側面図である。

【図9】本発明の第1実施形態に係り、X線タイコグラフィによる試料像の構築動作フローチャートである。

20

【図10】本発明の第1実施形態のシミュレーションに係り、第1仮想イメージング装置（参照光源用構造体：無し、且つ、遮蔽体：無し）による光強度検出パターン及び再構成像を示す図である。

【図11】本発明の第1実施形態のシミュレーションに係り、第2仮想イメージング装置（参照光源用構造体：無し、且つ、遮蔽体：有り）による光強度検出パターン及び再構成像を示す図である。

【図12】本発明の第1実施形態のシミュレーションに係り、第3仮想イメージング装置（参照光源用構造体：有り、且つ、遮蔽体：有り）による光強度検出パターン及び再構成像を示す図である。

【図13】本発明の第1実施形態に係り、参照光源用構造体の他の例の斜視図である。

30

【図14】本発明の第1実施形態に係り、実験で用いた参照光源用構造体のSEM像を示す図である。

【図15】本発明の第1実施形態に係り、実験で用いた試料（ジューメンスターテストチャート）のSEM像を示す図である。

【図16】本発明の第1実施形態に係り、実験で得られた光強度検出パターンを示す図である。

【図17】本発明の第1実施形態に係り、実験で得られた試料の再構成像を示す図である。

【図18】本発明の第3実施形態に係るイメージング装置の概略構成図である。

【図19】従来技術に係り、X線タイコグラフィの原理図である。

40

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、本発明の実施形態の例を、図面を参照して具体的に説明する。参照される各図において、同一の部分には同一の符号を付し、同一の部分に関する重複する説明を原則として省略する。尚、本明細書では、記述の簡略化上、情報、信号、物理量又は部材等を参照する記号又は符号を記すことによって、該記号又は符号に対応する情報、信号、物理量又は部材等の名称を省略又は略記することがある。

【0018】

<<参考実施形態>>

まず、後述の第1実施形態等との対比に供される参考実施形態を説明する。図1及び図

50

2 は、参考実施形態に係るイメージング装置の構成を示す斜視図及び側面図である。

【0019】

図1及び図2において、符号L0により参照される斜線領域は試料10への入射光を表している。但し、図1及び図2では、試料10を透過した光の領域に対しても斜線を付している（後述の図7でも同様）。入射光L0は、干渉性を有する光、即ちコヒーレント光である。但し、現実には完全にコヒーレントな光は存在しないので、ここにおけるコヒーレント光とは、空間的にも時間的にも非常にコヒーレンスの高い光であると解されるべきである。

【0020】

入射光L0は、任意の波長の光でありうるが、特にX線であることが想定される。ここでは、入射光L0は、6.5 keV（エレクトロンボルト）のエネルギーを有するX線（コヒーレントX線）であるものとする。入射光L0は、放射光施設にて発生されるX線領域の放射光を集束することで形成される集束X線であって良い。図1において、一点鎖線AX_{OPT}は入射光L0の光軸を表している。参考実施形態で述べる光は全て入射光L0に基づく光であるとする。

10

【0021】

X軸、Y軸及びZ軸は互いに直交している。光軸AX_{OPT}はZ軸に対して平行であり、入射光L0は、Z軸の負側から正側に向けて進行するものとする。尚、X軸及びY軸に平行な二次元平面、Y軸及びZ軸に平行な二次元平面、Z軸及びX軸に平行な二次元平面を、夫々、XY面、YZ面、ZX面と呼ぶ。

20

【0022】

入射光L0は試料10に対して照射される。試料10は、X軸及びY軸方向に対して広がりを持つ試料であり、更に、Z軸方向に対しての厚みも有する。試料10は、どのような試料でも良い。例えば、試料10は、金属から成る試料でも良いし、生物試料でも良い。但し、試料10に照射された入射光L0の内、一部は散乱及び回折するが、残りは試料10を透過するものとする。試料10に照射された入射光L0（6.5 keVのX線）の内、大部分が試料10を透過するような、厚みの少ない試料10が想定される。

【0023】

入射光L0は、試料10よりも上流側に設けられた光学系（不図示）により、試料10の位置において集光せしめられる。図1において、点Oは入射光L0の集光点の中心位置を表している。上流とは、入射光L0の進行の向きにとっての上流を指し、当然、入射光L0は上流側から下流側に向けて進行する。入射光L0は、Z軸に直交する十字に沿って斑点状に広がる。即ち、XY面内において、入射光L0は複数の斑点の光から形成される共に当該複数の斑点は十字方向に並んでいる（即ち例えばX軸及びY軸方向に沿って並んでいる）。以下では、その複数の斑点の中心に位置する、最も光の強度の強い斑点を入射光L0と捉えて注目し、注目した斑点の大きさ（詳細には、注目した斑点の広がり外縁を示す円の直径）をスポット径と呼ぶ。特に、試料10の位置における入射光L0のスポット径を記号SRで表す。ここでは、試料10の位置において入射光L0が真円状に集光されていると考え、且つ、スポット径SRが1 μm（マイクロメートル）であるとする。

30

【0024】

XY面上において、試料10の大きさ（広がり面積）は、試料10の位置における入射光L0の大きさ（広がり面積）よりも大きい。試料10は、Z軸方向に厚みを有する板形状を有し、ここでは例として、試料10がXY面において1 μmよりも大きな辺を有する長方形又は正方形の形状を持っているものとする。Z軸方向における試料10の厚さは、X軸及びY軸方向において不均一であって良い。例えば、Z軸方向における試料10の厚さは、X軸及びY軸方向において数10 nm～数10 μmの範囲内で分布する。

40

【0025】

二次元検出器20は、試料10の下流側に設けられる二次元X線検出器である。二次元検出器20は、入射光L0に基づく試料10からの光を受け、受けた光の強度を所定の二次元平面内で検出する。ここにおける二次元平面はXY面に平行である。二次元検出器2

50

0 は X Y 面に平行な検出面を有し、検出面内の各位置における光の強度（受光強度）を検出する。

【 0 0 2 6 】

二次元検出器 2 0 の検出面内の領域を、便宜上、透過 X 線の受光領域 2 1 と、回折 X 線の受光領域 2 2 とに分類することができる。試料 1 0 に照射された入射光 L 0 の内、試料 1 0 にて散乱されることなく透過した光を透過 X 線と呼ぶ。受光領域 2 1 は透過 X 線を受ける領域である。受光領域 2 1 の中心は、通常、検出面の中心と一致する。以下では、受光領域 2 1 の中心（透過 X 線を受ける受光領域の中心）と、検出面の中心（即ち二次元検出器 2 0 の中心）とが一致しているものとする。透過 X 線は受光領域 2 2 には入射しない。受光領域 2 2 は、試料 1 0 に照射された入射光 L 0 の内、試料 1 0 にて散乱された光を受ける。試料 1 0 にて散乱された光は、受光領域 2 2 において試料 1 0 の構造に応じた回折縞を形成する。この回折縞を形成する試料 1 0 からの散乱光を回折 X 線と呼び、この回折縞を表す受光領域 2 2 における受光強度パターンを回折 X 線強度パターン又は回折強度パターンと呼ぶ。また、受光領域 2 1 における受光強度パターンを透過 X 線強度パターン又は透過強度パターンと呼ぶ。

10

【 0 0 2 7 】

透過 X 線だけを利用する場合、図 1 のシステムを、 $1 \mu\text{m}$ の分解能を持ったレンズによる X 線顕微鏡と見立てることができる。 $1 \mu\text{m}$ の分解能を持ったレンズを通して観測できるものは、 $1 \mu\text{m}$ 以上のサイズの情報に限られる。しかし、回折 X 線を見ることで $1 \mu\text{m}$ よりも小さい情報を得ることができる。

20

【 0 0 2 8 】

図 3 に示す如く、イメージング装置は、試料 1 0 を X 軸方向又は Y 軸方向にステップ移動させるための駆動装置 3 0 を備えている。ステップ位置 $P_1 \sim P_n$ は、X Y 面に平行な面であって且つ試料 1 0 内に位置する共通な平面上に配置された互いに異なる位置である。図 3 では 9 つのステップ位置 $P_1 \sim P_9$ が示されているが、 n は 2 以上の整数であれば任意である。駆動装置 3 0 は、集光点 O の位置がステップ位置 $P_1 \sim P_n$ の何れかと一致するように試料 1 0 をステップ移動させることができる。尚、駆動装置 3 0 により、試料 1 0 が X 軸方向及び Y 軸方向と異なる方向に移動されることが有り得て良い（この場合、ステップ位置 $P_1 \sim P_n$ は、X Y 面から傾いた平面上に配置された互いに異なる位置となる）。但し、試料 1 0 のステップ移動の方向は、入射光 L 0 の光軸 $A X_{O P T}$ に直交する方向成分を持っているものとする。

30

【 0 0 2 9 】

X Y 面内について考えると、集光点 O の位置がステップ位置 P_i と一致せしめられているとき、試料 1 0 内の領域であって且つステップ位置 P_i を中心とする直径 $1 \mu\text{m}$ の円の内側領域に入射光 L 0 が集光及び照射される（ i は整数）。

【 0 0 3 0 】

X 軸及び Y 軸方向の夫々において、互いに隣接する 2 つのステップ位置の間隔はスポット径 $S R$ （ここでは $1 \mu\text{m}$ ）よりも小さい。従って、集光点 O の位置が第 1 ステップ位置と一致しているときの試料 1 0 への入射光 L 0 の照射領域は、集光点 O の位置が第 2 ステップ位置と一致しているときの試料 1 0 への入射光 L 0 の照射領域と一部において重なり合う。ここにおける第 1 ステップ位置は、ステップ位置 $P_1 \sim P_n$ の内の任意の 1 つを指し、第 2 ステップ位置は第 1 ステップ位置と異なる 1 以上のステップ位置を指す。例えば、集光点 O の位置がステップ位置 P_5 と一致しているときの試料 1 0 への入射光 L 0 の照射領域（図 3 の 9 つの円における中央の円の内部領域）は、集光点 O の位置がステップ位置 P_2 、 P_4 、 P_6 、 P_8 と一致しているときの試料 1 0 への入射光 L 0 の照射領域の夫々と一部において重なり合う。

40

【 0 0 3 1 】

図 4 は、参考実施形態のイメージング装置の X 線タイコグラフィによる試料像の構築動作フローチャートである。まず、ステップ S 1 において変数 i に 1 が代入される。続くステップ S 2 において、駆動装置 3 0 により、集光点 O の位置がステップ位置 P_i と一致す

50

るように試料 10 が駆動される。続くステップ S 3 において、二次元検出器 20 の検出面内の全検出結果（受光強度の検出結果の全て）を第 i の光強度検出パターンとして取得する。参考実施形態では、透過強度パターンと回折強度パターンを二次元検出器 20 で同時に取得したもの（即ち、同時に検出された透過強度パターン及び回折強度パターンから成る検出パターン）が第 i の光強度検出パターンとなる。

【0032】

その後、ステップ S 4 において、イメージング装置の制御部（不図示）により、変数 i が所定値 n （例えば 100）と一致しているか否かが確認される。“ $i = n$ ”の場合にはステップ S 6 に進む。一方、“ $i < n$ ”の場合にはステップ S 5 にて変数 i に 1 を加算してからステップ S 2 に戻り、ステップ S 2 以降の処理が繰り返される。結果、ステップ S 6 に至る時点では第 1 ~ 第 n の光強度検出パターンが取得済みとなる。第 i の光強度検出パターンは、集光点 O の位置をステップ位置 P_i と一致させた状態において、試料 10 からの透過強度パターン及び回折強度パターンを同時に検出したものである。

10

【0033】

ステップ S 6 において、イメージング装置の演算部（不図示）は、ステップ S 3 にて取得された第 1 ~ 第 n の光強度検出パターンに対し反復的位相回復アルゴリズムによる所定の演算を施すことで、試料 10 の像を生成する。反復的位相回復アルゴリズムとして、X 線タイコグラフィに適用可能な公知の反復的位相回復アルゴリズムを用いることができる。例えば、上記非特許文献 2 に記載の方法に基づく反復的位相回復アルゴリズムを用いて良い。

20

【0034】

ここで、公知事項ではあるが反復的位相回復アルゴリズムについて簡単に説明する。振幅のみが既知で位相が得られない状況においてフーリエ変換を繰り返し行うことによって位相を求める方法は、フーリエ反復位相回復法として知られている。ステップ S 6 の反復的位相回復アルゴリズム（換言すれば反復的位相回復法）は、フーリエ反復位相回復法に属する。

【0035】

図 5 は、フーリエ反復位相回復法の基本アルゴリズムを示す図である。図 5 において、物体（厳密には、物体に対する入射波と物体とが相互作用して物体から発せられる物体波）を f で表し、物体 f に対してフーリエ変換 FT を施したもの（厳密には、検出面での回折波）を F で表す。ここにおける物体は試料 10 である。

30

【0036】

f と F は複素関数として表される。複素関数 f の振幅、位相を、それぞれ $|f|$ 、 ϕ_f で表し、複素関数 F の振幅、位相を、それぞれ $|F|$ 、 ϕ_F で表す。一般的に、回折実験によって得られる物理量は、回折強度、即ち振幅 $|F|$ のみであり、位相 ϕ_F は得られない。もし何らかの方法で位相 ϕ_F が求められれば、 F に逆フーリエ変換 FT^{-1} を施すことで物体 f が得られる。フーリエ反復位相回復法では、図 5 に示すように、実空間において実空間拘束条件を且つ逆空間（周波数空間）において逆空間拘束条件を課しながら、フーリエ変換と逆フーリエ変換を逐次的に交互に繰り返す反復計算により位相を得る。

40

【0037】

X 線タイコグラフィにおける反復的位相回復アルゴリズムでは、複数の光強度検出パターンを取得するときの試料 10 への入射光 L_0 の照射領域が互いに重なっているという事実及びその重なり領域を実空間拘束条件として用い且つ第 1 ~ 第 n の光強度検出パターンを逆空間拘束条件として用いて上記反復計算を行う。これにより、試料 10 の通過に伴う入射光 L_0 の波面のゆがみを、XY 面上の各位置における入射光 L_0 の位相変化量として導出し、その導出結果から試料 10 の像を生成（再構築）することができる。

【0038】

図 6 (a) 及び (b) を参照し、参考実施形態のイメージング装置に対する計算機シミュレーションの結果を説明する。図 6 (a) は、当該シミュレーションにおいて試料 10 として想定されたテスト画像 300 を示している。テスト画像 300 は、試料 10 による

50

位相変化量を X Y 面に投影した二次元像（二次元投影像）である。位相変化量とは、入射光 L 0 が試料 1 0 を通過したときの入射光 L 0 の位相変化量を指す。

【 0 0 3 9 】

図 6 (a) において、黒に近い領域ほど位相変化量が大きく、白に近い領域ほど位相変化量が小さい。つまり例えば、入射光 L 0 がテスト画像 3 0 0 中に表現された女性の髪の毛領域に照射されたとき、位相変化量は 0 . 0 1 ラジアン程度であり、入射光 L 0 が当該女性の頬領域に照射されたとき、位相変化量は 0 . 0 0 5 ラジアン程度である。テスト画像 3 0 0 における位相変化量の最大値は 0 . 0 1 ラジアンに設定されている。0 . 0 1 ラジアンの位相変化量は、6 . 5 k e V のエネルギーの X 線に対して厚さ 5 0 n m (ナノメートル) のたんぱく質に相当している。つまり、厚さ 5 0 n m のたんぱく質に入射光 L 0 を照射したときに観測される位相変化量の最大値は 0 . 0 1 ラジアンである。

10

【 0 0 4 0 】

図 6 (b) の光強度検出パターン 3 2 0 は、図 6 (a) の領域 3 1 0 に入射光 L 0 を照射したときに図 1 の二次元検出器 2 0 にて取得されることになる透過及び回折強度パターンのシミュレーション結果を示している。

【 0 0 4 1 】

原理上、回折強度パターンでは、試料 1 0 (ここではテスト画像 3 0 0) の構造を示す空間周波数成分の内、より低い周波数成分の情報が検出面の中心に近い位置にて検出され、より高い周波数成分の情報が検出面の中心から離れた位置にて検出される。試料 1 0 (ここではテスト画像 3 0 0) の構造を示す空間周波数成分の内、相対的に低い空間周波数成分の情報及び相対的に高い空間周波数成分の情報を、夫々、低分解能情報及び高分解能情報と呼ぶ。光強度検出パターン 3 2 0 は低分解能情報及び高分解能情報を内包している。光強度検出パターン 3 2 0 において、検出面の中心に対し相対的に近い位置に低分解能情報が含まれ、検出面の中心に対し相対的に遠い位置に高分解能情報が含まれる。

20

【 0 0 4 2 】

光強度検出パターン (透過及び回折強度パターン) 3 2 0 から分かるように、透過 X 線の強度に対して回折 X 線の強度は相当に小さく、また回折 X 線の強度は回折角の増大に伴って減少する。二次元検出器 2 0 の検出結果から、より高い分解能の情報を得ようとする場合には、回折角のより大きい、従って強度のより小さい回折 X 線を検出する必要がある。故に、目的の分解能が上げれば上がるほど、広い光子ダイナミックレンジを有する透過及び回折強度パターンを取得する必要がある。

30

【 0 0 4 3 】

図 1 のイメージング装置において、1 5 n m 以下の分解能を達成するためには、 $1 0^9$ 光子/ピクセルの光子ダイナミックレンジを有する透過及び回折強度パターンを取得する必要がある。当該シミュレーションでは、 $1 0^9$ 光子/ピクセルの光子ダイナミックレンジを有する透過及び回折強度パターンが図 6 (b) の光強度検出パターン 3 2 0 として求められている。 $1 0^9$ 光子/ピクセルの光子ダイナミックレンジを有する透過及び回折強度パターンとは、1 の光子数と $1 0^9$ の光子数が識別して検出された透過及び回折強度パターン (即ち、二次元検出器 2 0 における受光 X 線の光子数の最小値と最大値の比が $1 0^9$ である透過及び回折強度パターン) を意味する。比較的安価に手に入る $1 0^3$ 光子/ピクセル/秒の検出性能を有する二次元検出器を図 1 の二次元検出器 2 0 として用いたならば、 $1 0^6$ 秒の検出時間を使ってようやく、 $1 0^9$ 光子/ピクセルの光子ダイナミックレンジを有する透過及び回折強度パターンを取得できる。但し、検出時間の増大は無限に許されるものではなく、検出時間は短い方が効率が良い。仮に、 $1 0^6$ 光子/ピクセル/秒の検出性能を有する二次元検出器を図 1 の二次元検出器 2 0 として用いたならば、 $1 0^3$ 秒の検出時間で、 $1 0^9$ 光子/ピクセルの光子ダイナミックレンジを有する透過及び回折強度パターンを取得できる。検出時間を $1 0^3$ 秒と定めたとき、 $1 0^3$ 光子/ピクセル/秒の検出性能では、 $1 0^6$ 光子/ピクセルの光子ダイナミックレンジしか達成できず、所望の分解能を得ることができない。

40

【 0 0 4 4 】

50

このことから分かるように、検出ダイナミックレンジの大きい二次元検出器（即ち、単位「光子/ピクセル/秒」で示される検出性能が高い二次元検出器）を用いれば、定められた検出時間で、より高い分解能を実現することができる。但し、検出ダイナミックレンジの大きい二次元検出器の開発には膨大な費用と時間を要する。必要な検出ダイナミックレンジを有する二次元検出器が現存していたとしても、検出ダイナミックレンジの拡大は二次元検出器の入手費用の増大につながる。

【0045】

<<第1実施形態>>

より低い検出ダイナミックレンジで試料像を構築できる実施形態として、本発明の第1実施形態を説明する。第1実施形態並びに後述の第2及び第3実施形態は参考実施形態を基礎とする実施形態であり、第1～第3実施形態において特に述べない事項に関しては、矛盾の無い限り、参考実施形態の記載を第1～第3実施形態に適用して良い。参考実施形態の記載及び第1～第3実施形態の記載間で矛盾する事項については、後者の記載が第1～第3実施形態では優先される。

10

【0046】

図7は、第1実施形態に係るイメージング装置1の構成を示す側面図である。イメージング装置1は、上述の二次元検出器20及び駆動装置30に加えて、参照光源用構造体（散乱用構造体）40、遮蔽体50及び演算装置60を備える。入射光L0、試料10、二次元検出器20及び駆動装置30の性質、構成及び機能、並びに、それらの関係は上述した通りである。

20

【0047】

入射光L0は、試料10及び参照光源用構造体40よりも上流側に設けられた光学系（不図示）により、試料10の位置において集光せしめられる。

【0048】

参照光源用構造体40（以下、構造体40と略記することがある）は、試料10の上流側に設けられる構造体であり、入射光L0は、まず構造体40に入射され、その後試料10に照射される。このため、入射光L0の一部は構造体40にて散乱され、構造体40からの散乱光L1が試料10及び二次元検出器20に向けて放射される。図7において、構造体40の中心から二次元検出器20まで伸びる2本の直線状の破線 OE_{L1} は、構造体40から出射される散乱光L1の外縁を模式的に示したものである。

30

【0049】

一方、図7において、試料10上の2つの点から二次元検出器20まで伸びる2本の直線状の破線 OE_{L2} は、試料10から出射される散乱光L2の外縁を模式的に示したものである。散乱光L2は、構造体40を介して試料10に照射された入射光L0が試料10にて散乱したものである。尚、試料10及び構造体40間の間隔は、散乱光L1の試料10上での照射面積が入射光L0による照射面積（即ち入射光L0の試料10上での照射面積）よりも大きくなるように、調整される。

【0050】

遮蔽体50は、試料10と二次元検出器20との間に配置され、二次元検出器20の検出面内の所定の遮蔽対象領域に対する試料10からの光を遮蔽する。数100 μm 以上の厚みを有するタンタル又は鉛等にて遮蔽体50を形成すれば、試料10からの光（X線）を完全に遮蔽することができる。

40

【0051】

例えば、二次元検出器20が検出しようとする受光強度の最小値が一定であると仮定した場合、検出面にて受光される光の最大強度が減少すれば、二次元検出器20に必要な検出ダイナミックレンジは小さくなる。従って、試料10から二次元検出器20に向かう光の内、少なくとも最大強度を持つ光が二次元検出器20（より詳細には二次元検出器20の検出面）に到達しないように、遮蔽体50は、試料10及び二次元検出器20間に配置される。試料10から二次元検出器20に向かう光の内、最大強度を持つ光は透過X線に含まれており、従って、上記の遮蔽対象領域は透過X線の受光領域21（遮蔽体50が無

50

かったならば透過 X 線を受光することになる領域)を含む領域である。

【0052】

回折 X 線の内、回折角が比較的小さな回折 X 線である低角回折 X 線の強度は、回折角が比較的大きな回折 X 線である高角回折 X 線の強度よりも相当に大きい。故に、検出面の受光領域の内、回折角が所定角度以下の低角回折 X 線を受ける受光領域をも遮蔽対象領域に含めるようにしても良い。本実施形態では、検出面の受光領域の内、回折角が所定角度以下の低角回折 X 線を受ける受光領域をも遮蔽対象領域に含めている。即ち、遮蔽体 50 により、透過 X 線及び低角回折 X 線の二次元検出器 20 (より詳細には二次元検出器 20 の検出面) への入射が遮蔽されている。遮蔽体 50 を設けることで、定められた検出時間で所望の分解能を得るために求められる、二次元検出器 20 の検出ダイナミックレンジを低減させることが可能となる。

10

【0053】

遮蔽体 50 の配置により透過強度パターン (透過 X 線強度パターン) が検出面に形成されなくなるが、一方において構造体 40 から散乱光 L1 が放射されるため、散乱光 L1 を参照光とするインラインホログラムが検出面に形成される。つまり、二次元検出器 20 では、回折強度パターン (回折 X 線強度パターン) とインラインホログラムが同時に取得される。透過 X 線が持つ試料構造情報 (試料 10 の構造について透過 X 線が持っている情報) は、試料 10 の位置における入射光 L0 のサイズ以上の試料情報である。即ち、透過 X 線が持つ試料構造情報は、試料 10 の構造を示す空間周波数成分の内、試料 10 の位置での入射光 L0 のサイズ (或る一次元方向のサイズで考えた場合、スポット径 SR : ここでは $1 \mu\text{m}$) 以上の構造についての空間周波数成分の情報 (例えば $1 \mu\text{m}^{-1}$ や $2 \mu\text{m}^{-1}$ の情報) である。故に、試料 10 の位置での入射光 L0 のサイズより小さな構造体を構造体 40 に利用すれば、透過 X 線が持つ試料構造情報をインラインホログラムで補完することが可能である。

20

【0054】

インラインホログラムは、周知の如く、物体光と参照光をホログラム面に同時照射したときにホログラム面に形成される干渉縞である。ここにおけるホログラム面は二次元検出器 20 の検出面である。参照光は参照光源用構造体 40 の散乱光 L1 である。つまり、参照光源用構造体 40 は、インラインホログラム形成用の参照光源として機能する。参照光が試料 10 に照射されたときに試料 10 にて参照光が散乱されるが、その散乱によって試料 10 から発せられる光 (即ち、参照光に基づく試料 10 からの散乱光) が物体光である。

30

【0055】

図 8 (a) 及び (b) に、参照光源用構造体 40 の例である円柱構造体 40 A の斜視図及び側面図を示す。円柱構造体 40 A を、任意の種類 of 金属にて形成することができる。但し、X 線の散乱能を高めるべく重金属にて円柱構造体 40 A を形成すると良く、例えば、金又はタンタルで円柱構造体 40 A を形成すると良い (後述される参照光源用構造体 40 の他の例においても同様)。

【0056】

円柱構造体 40 A は、板状体 41 A 上に柱体 42 A を設けた構造体である。板状体 41 A は、XY 面に平行な上面及び下面を有し、Z 軸方向に厚みを有する板状の物質 (金属又は非金属) である。ここで、板状体 41 A の上面及び下面の内、上面の方が試料 10 に近いものとする。板状体 41 A の厚みは数 10 nm ~ 100 nm 程度であり、板状体 41 A において X 線による吸収が小さい。X 軸及び Y 軸方向において、板状体 41 A の大きさは円柱構造体 40 A の位置における入射光 L0 の大きさよりも大きい。柱体 42 A は、板状体 41 A の上面から試料 10 に向けて垂直に伸びる金属製の柱体である。柱体 42 A の軸は Z 軸に平行である。板状体 41 A の中心及び柱体 42 A の軸が入射光 L0 の光軸 AX。PT 上に位置するように、円柱構造体 40 A が形成及び配置される。ここでは、柱体 42 A が真円の底面を有する円柱であるとし、その真円の直径を R にて表す。

40

【0057】

50

円柱構造体 40A に例示される構造体 40 は、第 1 及び第 2 必要条件を満たすように形成される。円柱構造体 40A において、第 1 必要条件は、直径 R が試料 10 の位置での入射光 L0 のスポット径 SR (ここでは $1\ \mu\text{m}$) よりも小さい、という条件である。例えば、直径 R は、 $100\ \text{nm} \sim 200\ \text{nm}$ の範囲内から選ばれる。柱体 42A の高さは、例えば $500\ \text{nm} \sim 1\ \mu\text{m}$ の範囲内から選ばれる。

【0058】

第 2 必要条件は、試料 10 の位置において、散乱光 L1 の X 及び Y 軸方向における広がり大きさが入射光 L0 の X 及び Y 軸方向における広がり大きさよりも大きい、という条件である。第 2 必要条件の充足により、試料 10 の位置において、試料 10 に対する入射光 L0 の照射領域の全体を試料 10 に対する散乱光 L1 の照射領域に内包させる。散乱光 L1 の X 及び Y 軸方向における広がり大きさは、例えば、散乱光 L1 の X 及び Y 軸方向に夫々における広がり大きさであると考えても良いし、散乱光 L1 の X 及び Y 軸方向における広がり面積であると考えても良い。入射光 L0 についても同様である。円柱構造体 40A に関し第 2 必要条件が満たされるように、柱体 42A の直径 R 及び高さ、円柱構造体 40A の材質、並びに、円柱構造体 40A 及び試料 10 間の間隔が決定される。

10

【0059】

検出面に形成されるインラインホログラムには、原理上、試料 10 の構造情報の内、直径 R と同じ大きさを持つ構造及び直径 R より大きな構造についての空間周波数成分の情報が含まれることになる。例えば、直径 R が $100\ \text{nm}$ であるとき、 $100\ \text{nm}^{-1}$ 、 $500\ \text{nm}^{-1}$ 、 $1\ \mu\text{m}^{-1}$ 及び $2\ \mu\text{m}^{-1}$ などの空間周波数成分の情報がインラインホログラムに含まれることになる。

20

【0060】

これに対し、透過 X 線が持つ試料構造情報 (試料 10 の構造について透過 X 線が持っている情報) は、試料 10 の構造を示す空間周波数成分の内、スポット径 SR 以上の構造についての空間周波数成分の情報 (例えば $1\ \mu\text{m}^{-1}$ や $2\ \mu\text{m}^{-1}$ の情報) である。故に、第 1 必要条件を満たすことで、透過 X 線が持つ試料構造情報をインラインホログラムにて補完することが可能となる。但し、第 1 必要条件を満たしていても、試料 10 の位置において参照光 L1 のサイズが入射光 L0 のサイズ ($1\ \mu\text{m}$) よりも小さかったならば、 $1\ \mu\text{m}^{-1}$ 以上の構造についての空間周波数成分の情報がインラインホログラムに含まれないことになる (例えば、試料 10 の位置における参照光 L1 の直径が $0.5\ \mu\text{m}$ であるとした場合、概念的に考えると、直径 $0.5\ \mu\text{m}$ の光で直径 $1\ \mu\text{m}$ の構造を見ることはできない)。故に、第 2 必要条件の充足が要求される。

30

【0061】

また、回折角が所定角度以下の低角回折 X 線を受ける受光領域までもが遮蔽対象領域に含められる場合、構造体 40 が無かったならば、透過 X 線が示す情報 (例えば $1\ \mu\text{m}^{-1}$ の情報) に加えて低角回折 X 線が示す構造情報 (例えば $500\ \text{nm}^{-1}$ の情報) も検出面の検出結果から欠落することになり、構造体 40 の設置により、その欠落した情報はインラインホログラムに含まれることになる。換言すれば、そうなるように参照光源用構造体 40 の構造及び遮蔽版 50 の大きさ等が決定される。

【0062】

尚、図 8 (a) 及び (b) に示す円柱構造体 40A において、例えば、柱体 42A の直径 R を小さくし過ぎるとインラインホログラム用の参照光が弱くなりすぎて、インラインホログラムが回折 X 線に埋もれてしまう。また例えば、柱体 42A の高さを大きくし過ぎると参照光が強くなりすぎてインラインホログラム以外の回折 X 線を観測し難くなる。検出面におけるインラインホログラムと回折 X 線の強度バランスを考慮して、円柱構造体 40A の具体的構造を決定すると良い。

40

【0063】

また、試料 10 の構造を示す空間周波数成分の内、より低い空間周波数成分の情報が検出面の中心に近い位置にて検出され且つより高い空間周波数成分の情報が検出面の中心から離れた位置にて検出されると上述したが、それは回折強度パターンに当てはまる事象で

50

あって、それと同じことは、原理上、インラインホログラムに当てはまらない。故に、検出面の中央付近が遮蔽体 50 にて遮蔽されているからといって、透過 X 線が持つ情報及び低角回折 X 線の持つ情報がインラインホログラムに内包されないといったことは無い。

【0064】

図 9 は、イメージング装置 1 の X 線タイコグラフィによる試料像の構築動作フローチャートである。まず、ステップ S 11 において変数 i に 1 が代入される。続くステップ S 12 において、駆動装置 30 により、集光点 O の位置がステップ位置 P_i と一致するように試料 10 が駆動される。続くステップ S 13 において、二次元検出器 20 の検出面内の全検出結果（受光強度の検出結果の全て）を第 i の光強度検出パターンとして取得する。第 1 実施形態では、インラインホログラムと回折強度パターンを二次元検出器 20 で同時に取得したもの（即ち、同時に検出されたインラインホログラム及び回折強度パターンから成る検出パターン）が第 i の光強度検出パターンとなる。

10

【0065】

その後、ステップ S 14 において、イメージング装置 1 の制御部（不図示）により、変数 i が所定値 n （例えば 100）と一致しているか否かが確認される。“ $i = n$ ” の場合にはステップ S 16 に進む。一方、“ $i < n$ ” の場合にはステップ S 15 にて変数 i に 1 を加算してからステップ S 12 に戻り、ステップ S 12 以降の処理が繰り返される。結果、ステップ S 16 に至る時点では第 1 ~ 第 n の光強度検出パターンが取得済みとなる。第 i の光強度検出パターンは、集光点 O の位置をステップ位置 P_i と一致させた状態において、試料 10 からのインラインホログラム及び回折強度パターンを同時に検出したものである。

20

【0066】

ステップ S 16 において、演算装置 60 は、ステップ S 13 にて取得された第 1 ~ 第 n の光強度検出パターンに対し反復的位相回復アルゴリズムによる所定の演算を施すことで、試料 10 の像を生成する。演算装置 60 は、CPU (Central Processing Unit)、ROM (Read Only Memory) 及び RAM (Random Access Memory) 等から形成されるコンピュータであって良い。ステップ S 16 における反復的位相回復アルゴリズムは、参考実施形態における反復的位相回復アルゴリズムと同じである。

【0067】

[シミュレーション]

二次元検出器 20 に必要となる検出ダイナミックレンジの圧縮効果を検証するために、計算機による以下の第 1 ~ 第 3 シミュレーションを行った。第 1 ~ 第 3 シミュレーションでは、テスト画像 300 (図 6 (a) 参照) が試料 10 として用いられる。

30

【0068】

第 1 シミュレーションでは、イメージング装置 1 から構造体 40 及び遮蔽体 50 を削除した第 1 仮想イメージング装置（即ち、参考実施形態のイメージング装置）を用いることを想定した。第 1 仮想イメージング装置にて取得される光強度検出パターンは、透過及び回折強度パターンである。

【0069】

図 10 (a) に、第 1 仮想イメージング装置において、試料 10 の或る一点に入射光 L_0 を照射したときの光強度検出パターン（透過及び回折強度パターン）のシミュレーション結果を示す。例えば、 10^6 光子/ピクセル/秒の検出性能を有する二次元検出器 20 を用い且つ検出時間が 1 秒に設定された検出条件で取得される光強度検出パターンが、図 10 (a) の光強度検出パターンに相当すると考えて良い。或いは例えば、 10^3 光子/ピクセル/秒の検出性能を有する二次元検出器 20 を用い且つ検出時間が 10^3 秒に設定された検出条件で取得される光強度検出パターンが、図 10 (a) の光強度検出パターンに相当すると考えて良い。後述の第 2 及び第 3 仮想イメージング装置に対するシミュレーションについても同様である。図 10 (b) は、第 1 仮想イメージング装置において、第 1 ~ 第 n の光強度検出パターンから反復的位相回復アルゴリズムにより生成されるテスト画像 300 の再構成像の一部のシミュレーション結果である。構造体 40 及び遮蔽体 50 を

40

50

用いない場合、上記のような検出条件では、 10^6 光子/ピクセルの光子ダイナミックレンジまでしか光強度検出パターン（透過及び回折強度パターン）を検出できないため、透過X線だけが際立ち、回折強度パターンが雑音に埋もれてしまうことが分かる。再構成像の分解能は悪く、回折強度パターンに対する雑音の影響が顕著に再構成像に現れている。

【0070】

第2シミュレーションでは、イメージング装置1から構造体40のみ削除した第2仮想イメージング装置を用いることを想定した。第2仮想イメージング装置にて取得される光強度検出パターンには回折強度パターンしか含まれない。

【0071】

図11(a)に、第2仮想イメージング装置において、試料10の或る一点に入射光L0を照射したときの光強度検出パターン（回折強度パターン）のシミュレーション結果を示す。図11(a)において、中央付近の黒い正方形領域は遮蔽体50によってX線の入射が遮蔽されている領域に相当する。図11(b)は、第2仮想イメージング装置において、第1～第nの光強度検出パターンから反復的位相回復アルゴリズムにより生成されるテスト画像300の再構成像の一部のシミュレーション結果である。遮蔽体50により強度の大きな透過X線及び低角回折X線を遮蔽することで、取得される光強度検出パターンの光子ダイナミックレンジが 10^6 光子/ピクセルであっても、その光強度検出パターンの中に高分解能回折強度パターン（即ち、試料構造を示す空間周波数成分の内、比較的高い空間周波数成分の情報）が内包される。しかしながら、低分解能情報が欠落しているため、図11(b)に示すような低分解能情報が欠如した像が再構成される。

10

20

【0072】

第3シミュレーションでは、イメージング装置1そのものを第3仮想イメージング装置として用いることを想定した。第3仮想イメージング装置にて取得される光強度検出パターンには、インラインホログラムと回折強度パターンが含まれる。

【0073】

図12(a)に、第3仮想イメージング装置において、試料10の或る一点に入射光L0を照射したときの光強度検出パターン（インラインホログラム及び回折強度パターン）のシミュレーション結果を示す。図12(a)において、中央付近の黒い正方形領域は遮蔽体50によってX線の入射が遮蔽されている領域に相当する。図12(b)は、第3仮想イメージング装置において、第1～第nの光強度検出パターンから反復的位相回復アルゴリズムにより生成されるテスト画像300の再構成像の一部のシミュレーション結果である。構造体40及び遮蔽体50を用いた場合、取得される光強度検出パターンの光子ダイナミックレンジが 10^6 光子/ピクセルであっても、その光強度検出パターンの中に、構造体40からの散乱光を参照光とするインラインホログラムと高分解能回折強度パターン（即ち、試料構造を示す空間周波数成分の内、比較的高い空間周波数成分の情報）が内包される。インラインホログラムは試料10（ここではテスト画像300）の低分解能情報を含んでいるため、遮蔽体50によって透過X線及び低角回折X線を遮蔽しても、オリジナル画像（300）と同等の再構成像を生成することができる。

30

【0074】

図7では、検出器20の中心を中心を持つ領域であって且つ検出器20の一部領域にのみインラインホログラムが形成されるとの考えを便宜上採用しており、その考えに符合するように、図12(a)には、インラインホログラム形成領域の外形を示すものとして破線円を示している。しかし実際には、二次元検出器20の検出面の全体に亘ってインラインホログラムの情報を示すX線が入射する。つまり、図12(a)に示す光強度検出パターンの全体に亘ってインラインホログラムの情報が含まれている、と考えることもできる。

40

【0075】

反復的位相回復アルゴリズムを用いたステップS16の演算では、反復計算の繰り返しの途中で、試料10の像の再構成と共に試料10にあたるX線の振幅及び位相も導出される。故に、構造体40に基づく参照光が試料10に照射されていても何ら問題は無く、イン

50

ラインホログラムの情報と回折 X 線の情報が 1 つの光強度検出パターンに混在していても何ら問題は無い。構造体 40 に基づく参照光の試料 10 への照射の有無に関係なく、反復計算の繰り返しの中で試料 10 にあたる X 線の振幅及び位相が明らかとなり（どのような X 線が試料 10 にあっているのかが解析され）、これに連動して試料 10 の像が再構成される。

【0076】

尚、参考実施形態において検出面に形成される透過強度パターン（透過 X 線強度パターン）もインラインホログラムの一種であると考えて良い。透過強度パターンとしてのインラインホログラムにおいては、試料 10 の中にある直径 $1 \mu\text{m}$ の球形の発光点からの光を参照光と考えれば良い。その発光点からの光の一部は試料 10 にて散乱され、残りは二次元検出器 20 に向けて試料 10 を素通りするが、その発光点からの光が試料 10 によって散乱された光を物体光と考えれば良い。

10

【0077】

第 1 実施形態は、透過強度パターンに基づくインラインホログラムの代わりに、構造体 40 を用いたインラインホログラムを光強度検出パターンに含めるようにしたものであり、用いる反復的位相回復アルゴリズムは参考実施形態及び第 1 実施形態間で同じであって良い。

【0078】

[参照光源用構造体の変形例]

参照光源用構造体 40 の変形例について説明する。上述の円柱構造体 40 A は、円柱部分に金属が配置された凸型の円柱構造体である。構造体 40 として、円柱状に金属を取り除いた凹型の円柱構造体が採用されても良い。

20

【0079】

図 13 に、参照光源用構造体 40 の例である凹型の円柱構造体 40 B の斜視図を示す。円柱構造体 40 B を、任意の種類金属（例えばタンタル又は金）にて形成することができる。円柱構造体 40 B は、板状体 41 B に柱状開口部 42 B を設けた部材である。板状体 41 B は、XY 面に平行な上面及び下面を有し、Z 軸方向に厚みを有する板状の金属である。板状体 41 B の厚みは数 $10 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$ 程度である。X 軸及び Y 軸方向において、板状体 41 B の大きさは円柱構造体 40 B の位置における入射光 L_0 の大きさよりも大きい。柱状開口部 42 B は、板状体 41 B に設けられた柱状の穴である。柱状開口部 42 B の軸は Z 軸に平行である。板状体 41 B の中心及び柱状開口部 42 B の軸が入射光 L_0 の光軸 AX_{OPT} 上に位置するように、円柱構造体 40 B が形成及び配置される。ここでは、柱状開口部 42 B が真円の底面を有する円柱状の穴であるとし、その真円の直径を R にて表す。

30

【0080】

凸型の円柱構造体 40 A では、突出している柱体 42 A の部分において、そうでない部分と比べ入射光 L_0 の波面が乱れて（位相が遅れて）散乱が生じる。これに対し、凹型の円柱構造体 40 B では、穴が形成されていない部分において、柱状開口部 42 B と比べ入射光 L_0 の波面が乱れて（位相が遅れて）散乱が生じる。

【0081】

円柱構造体 40 B も上述の第 1 及び第 2 必要条件を満たすように形成される。つまり、直径 R が試料 10 の位置での入射光 L_0 のスポット径 SR （ここでは $1 \mu\text{m}$ ）よりも小さいという第 1 必要条件が満たされる。また、試料 10 の位置において、散乱光 L_1 の X 及び Y 軸方向における広がり大きさが入射光 L_0 の X 及び Y 軸方向における広がり大きさよりも大きいという第 2 必要条件が満たされる。第 2 必要条件の充足により、試料 10 の位置において、試料 10 に対する入射光 L_0 の照射領域の全体を試料 10 に対する散乱光 L_1 の照射領域に内包させる。

40

【0082】

凸型の構造体 40 A（図 8（a）参照）において、金属による柱体 42 A（凸型の柱状構造部）の底面は楕円であっても良い。同様に、凹型の構造体 40 B（図 13 参照）にお

50

いて、柱状開口部 4 2 B (凹型の柱状構造部) による穴としての柱体の底面は楕円であっても良い。但し、それらの形状が真円に近い方が X 線散乱の等方性が高くなるため、検出ダイナミックレンジの圧縮効果 (定められた検出時間で所望の分解能を得るために必要な検出ダイナミックレンジの低減効果) がより高まる。

【 0 0 8 3 】

また、凸型の構造体 4 0 A (図 8 (a) 参照) において、金属による柱体 4 2 A の底面は円以外 (例えば多角形) であっても良い。同様に、凹型の構造体 4 0 B (図 1 3 参照) において、柱状開口部 4 2 B による穴としての柱体の底面は円以外 (例えば多角形) であっても良い。但し、それらの形状が真円に近い方が X 線散乱の等方性が高くなるため、検出ダイナミックレンジの圧縮効果がより高まる。例えば、凸型の構造体 4 0 A における柱体 4 2 A の底面を四角形にした場合、インラインホログラムの中に強度の高いスポットが離散的に出現し、結果、それを真円とする場合よりも、検出ダイナミックレンジの圧縮効果が低くなる。

10

【 0 0 8 4 】

断面が真円の柱体 4 2 A 又は柱状開口部 4 2 B を有する円柱構造体 4 0 A 又は 4 0 B の場合に対しては直径 R に関連付けて第 1 必要条件を定義できるが、断面が真円以外の柱体 4 2 A 又は柱状開口部 4 2 B を有する構造体 4 0 をも考慮した場合、第 1 必要条件の表現が変更される。即ち、凸型の構造体 4 0 A (図 8 (a) 参照) において、金属による柱体 4 2 A の断面積 (即ち底面の面積) は、試料 1 0 の位置における入射光 1 0 の広がり面積 (X 軸及び Y 軸方向の広がり面積) より小さくされるべきである。これが、構造体 4 0 A が満たすべき第 1 必要条件であると考えて良い。同様に、凹型の構造体 4 0 B (図 1 3 参照) において、柱状開口部 4 2 B による穴の断面積 (柱状開口部 4 2 B による穴としての柱体の底面の面積) は、試料 1 0 の位置における入射光 1 0 の広がり面積 (X 軸及び Y 軸方向の広がり面積) より小さくされるべきである。これが、構造体 4 0 B が満たすべき第 1 必要条件であると考えて良い。

20

【 0 0 8 5 】

[実験結果]

次に、イメージング装置 1 を用いた実験内容及び結果を説明する。当該実験は、放射光施設 Spring - 8 のビームライン BL 2 9 X U L にて行われた。放射光施設の蓄積リングを周回する電子は、ビームラインの基部付近に配置されたアンジュレータ装置の形成する周期磁場により蛇行せしめられて放射光を放出する。この放射光がビームラインに入る。ビームラインに入った X 線領域の放射光は集光用の光学系を介し、入射光 L 0 としてイメージング装置 1 に入射する。

30

【 0 0 8 6 】

実験においても、試料 1 0 の位置における入射光 L 0 のスポット径は $1 \mu\text{m}$ であり、入射光 L 0 としての X 線のエネルギーは 6.5 keV である。参照光源用構造体 4 0 としては、図 1 3 に示す凹型の構造体 4 0 B を用いた。実験において、構造体 4 0 B の材質は金であり、板状体 4 1 B の厚みは 250 nm であって且つ柱状開口部 4 2 B の直径 R は 200 nm である。このような構造体 4 0 B を、金箔に穴を空ける加工を施すことで作製できる。図 1 4 に、Z 軸方向から走査型電子顕微鏡によって観測した、実験における構造体 4 0 B の像 (SEM 像) を示す。尚、上述の厚み : 250 nm 及び直径 R : 200 nm は、それらの設計値 (目標値) であって、実際に作成された構造体 4 0 B でのそれらは誤差を含んでいる。

40

【 0 0 8 7 】

実験において、試料 1 0 と参照光源用構造体 4 0 (ここでは構造体 4 0 B) との間の間隔は約 1 mm である。この間隔は、板状体 4 1 B の厚み及び柱状開口部 4 2 B の直径 R などを考慮しつつ、上述の第 2 必要条件を満たすように決定された。実験で用いた二次元検出器 2 0 は、Princeton Instruments 社製の直接撮像型 CCD 検出器 : P I - L C X 1 3 0 0 である。試料 1 0 としては、タンタル製、厚さ 200 nm のジューメンスターテストチャートを用いた。図 1 5 に、Z 軸方向から走査型電子顕微鏡によって観測した、ジュー

50

ンススターテストチャートの一部の像（SEM像）を示す。

【0088】

実験においては、試料10（ジメンススターテストチャート）をX軸及びY軸方向の夫々において500nmずつステップ移動させながら、逐次、インラインホログラム及び回折強度パターンから成る光強度検出パターンを取得した。取得した光強度検出パターンの個数は（7×7）である。つまり“n=7×7”である。

【0089】

参照光源用構造体40の配置による影響を比較検証するために、構造体40を有するイメージング装置1そのもの（以下、構造体有りイメージング装置とも言う）に加えて、イメージング装置1から構造体40を削除した装置（以下、構造体無しイメージング装置とも言う）に対しても実験を行った。

10

【0090】

図16において、実験結果パターン410及び420は、試料10の或る一点に入射光L0を照射したときの、実験によって取得された光強度検出パターン（インラインホログラム及び回折強度パターン）を示す。但し、パターン410は構造体有りイメージング装置において取得されたものであり、パターン420は構造体無しイメージング装置において取得されたものである。パターン410及び420の夫々において、中央付近の黒い正方形領域は遮蔽体50によってX線の入射が遮蔽されている領域に相当する。パターン410において、構造体40の配置に起因するインラインホログラム（同心円状の干渉縞）が発生していることが分かる。このインラインホログラムの中に、透過X線及び低角回折X線が含有する情報が内包される。

20

【0091】

図17の像430は、構造体有りイメージング装置において、実験にて取得された第1～第nの光強度検出パターンから反復的位相回復アルゴリズムにより生成される試料10（ジメンススターテストチャート）の再構成像の一部である。図17の像440は、構造体無しイメージング装置において、実験にて取得された第1～第nの光強度検出パターンから反復的位相回復アルゴリズムにより生成される試料10（ジメンススターテストチャート）の再構成像の一部である。

【0092】

再構成像430及び440の夫々は、試料10による位相変化量をXY面に投影した二次元像（二次元投影像）である。ここにおける位相変化量は、入射光L0が試料10を通過したときの入射光L0の位相変化量であって、実験によって取得された第1～第nの光強度検出パターンに基づき反復的位相回復アルゴリズムにより回復（演算）された量である。

30

【0093】

再構成像430及び440において、黒に近い領域ほど位相変化量が大きいことを示している。構造体有りイメージング装置による再構成像430では、タンタルの厚みを示す位相が良好に回復されていることが分かる。これに対し、構造体無しイメージング装置による再構成像440では、取得された光強度検出パターンにおいて透過X線及び低角回折X線の情報が欠損しているため位相を正確に回復できず、タンタルの存在領域及び非存在領域間の境界の識別程度しか達成できていない。

40

【0094】

本実施形態に係るイメージング装置1によれば、定められた検出時間において目的の分解能及び感度を達成するために二次元検出器20に求められる検出ダイナミックレンジを低減することができる（例えば、考実施形態との比較において1000分の1程度に圧縮することができる）。検出時間が一定であるという条件下において、本実施形態に係るイメージング装置1によれば、直接撮像型CCD検出器（例えば数百万円程度で入手可能）を用いても、参考実施形態でピクセルアレイ検出器（例えば数千万円程度の費用が掛かる）を用いた場合と同等の分解能及び感度を実現できる。このため、既存の放射光ビームラインを活用した高分可能・高感度X線タイコグラフィの普及及び促進が期待される。

50

【0095】

尚、非特許文献1などでは、二次元検出器の前面の中央付近にビームストップを配置した構成が示されている。当該構成では、高角回折X線のパターンを二次元検出器(CCD)にて観測させるために、ビームストップを配置している。ビームストップを配置しないと、透過X線の強度が非常に大きいことに起因して、高角回折X線のパターンがノイズに埋もれてしまい、高角回折X線のパターンを全く又は精度良く二次元検出器(CCD)にて観測することができない。従来方法において、実際に、二次元検出器の検出結果から低分解能及び高分解能情報の双方を含んだ試料像を構築するためには、ビームストップを取り払う必要がある。

【0096】

<<第2実施形態>>

本発明の第2実施形態を説明する。第1実施形態で述べた技術をシングルショットイメージングに適用しても良い。この場合も、第1実施形態のイメージング装置1を利用できる。但し、X軸及びY軸方向において、試料10の大きさは試料10の位置における入射光L0の大きさ以下に限定される。

【0097】

シングルショットイメージングが適用されるイメージング装置1では、試料10のステップ移動は行われずに(従って $n=1$ とされ)二次元検出器20から1つの光強度検出パターンが取得され、取得された1つの光強度検出パターンから公知の位相回復方法に基づく演算により試料10の像を生成する。例えば、取得された1つの光強度検出パターンに対して反復的位相回復アルゴリズムによる所定の演算を施すことで試料10の像を生成する。この場合の反復的位相回復アルゴリズムも上述してきたものと同様であって良い。この際、例えば、試料10が存在するであろうと推定される領域の外では電子密度がゼロであること及び電子密度が負になることは無いことなどを実空間拘束条件として用いて、上記反復演算を行えば良い。

【0098】

<<第3実施形態>>

本発明の第3実施形態を説明する。第1実施形態で述べた技術を、EUV光を使ったタイコグラフィに適用することもできる。EUV光とは極端紫外線の波長を有した光である。図18に、EUV光を使ったタイコグラフィにより試料の像を生成するイメージング装置200の概略構成図を示す。

【0099】

EUV光201、EUVマスク203、二次元検出器204、演算装置205、参照光源用構造体210、遮蔽体220は、夫々、第1実施形態における入射光L0、試料10、二次元検出器20、演算装置60、参照光源用構造体40、遮蔽体50に相当するものである。入射光L0、試料10、二次元検出器20、演算装置60、参照光源用構造体40及び遮蔽体50について第1実施形態で述べた事項を、矛盾無き限り、EUV光201、EUVマスク203、二次元検出器204、演算装置205、参照光源用構造体210、遮蔽体220に適用して良い。

【0100】

EUV光201は、ミラー202を含む光学系を介して、EUVマスク203に対し所定の入射角度をもって照射される。EUVマスク203は、パターンが刻み込まれたマスクであって、極端紫外線リソグラフィに用いられる。EUVマスク203にて反射及び回折された、EUV光201に基づく光(以下、EUV反射・回折光と呼ぶ)は、EUVマスク203に対向配置された二次元検出器204にて受光され、EUV反射・回折光による像が二次元検出器204にて検出される。つまり、二次元検出器204は、試料としてのEUVマスク203の下流側に設けられる二次元EUV光検出器であり、入射光(201)に基づく試料からの光を受け、受けた光の強度を所定の二次元平面内で検出する。第3実施形態において、上流とは、入射光としてのEUV光201の進行の向きにとっての上流を指し、当然、入射光(201)は上流側から下流側に向けて進行する。

10

20

30

40

50

【0101】

参照光源用構造体210（以下、構造体210と略記することがある）は、EUVマスク203の上流側に設けられる構造体である。入射光としてのEUV光201は、構造体210に入射され、その後EUVマスク203に照射される。このため、入射光（201）の一部は構造体210にて散乱され、構造体210からの散乱光がEUVマスク203に向けて放射される。

【0102】

遮蔽体220は、EUVマスク203と二次元検出器204との間に配置され、二次元検出器204の検出面内の所定の遮蔽対象領域に対するEUVマスク203からの光を遮蔽する。この際、第1実施形態で述べたのと同様、EUVマスク203から二次元検出器204に向かう光の内、少なくとも最大強度を持つ光が二次元検出器204（より詳細には二次元検出器204の検出面）に到達しないように、遮蔽体220が、EUVマスク203及び二次元検出器204間に配置される。これにより、二次元検出器204に必要な検出ダイナミックレンジを低減させることが可能となる。

10

【0103】

EUVマスク203から二次元検出器204に向かう光の内、最大強度を持つ光は、EUVマスク203にて鏡面反射されたEUV光に含まれており、従って、二次元検出器204における遮蔽対象領域は、鏡面反射されたEUV光の受光領域（遮蔽体220が無かったならば鏡面反射されたEUV光を受光することになる領域）を含む領域である。つまり、EUVマスク203にて鏡面反射されたEUV光の、二次元検出器204（より詳細には二次元検出器204の検出面）への到達が、遮蔽体220によって遮蔽される。

20

【0104】

入射したEUV光201に基づく構造体210からの散乱光がEUVマスク203に入射される結果、構造体210からの散乱光を参照光とするインラインホログラムが二次元検出器204の検出面にて形成及び検出される。このインラインホログラムにおける物体光は、参照光に基づくEUVマスク203からの散乱光である。一方、このインラインホログラム以外に、EUVマスク203の表面構造に応じた回折EUV光パターン（回折されたEUV光が形成する干渉縞によるパターン）も二次元検出器204の検出面にて形成及び検出される。

30

【0105】

EUVマスク203のマスク面に平行な方向（即ち、EUVマスク203に入射するEUV光201の光軸に直交する方向成分を持つ方向）にEUVマスク203をステップ移動させながら、順次、インラインホログラム及び回折EUV光パターンから成る光強度検出パターンを二次元検出器204から取得し、これによって得られた第1～第nの光強度検出パターンを演算装置205に供給する。第1実施形態と同様、第iの光強度検出パターンを取得するときの試料（ここではEUVマスク203）への入射光（ここではEUV光201）の照射領域は、第jの光強度検出パターンを取得するときの試料への入射光の照射領域と一部において重なり合う（ここで、iはn以下の任意の整数であって、且つ、jはi以外且つn以下の何れかの整数；1つのiの値に対してjの値は複数存在し得る）。演算装置205は、与えられた第1～第nの光強度検出パターンに対して、タイコグラフィによる公知の反復的位相回復アルゴリズムによる所定の演算を施すことで、EUVマスク203の像を生成する。

40

【0106】

<<変形等>>

本発明の実施形態は、特許請求の範囲に示された技術的思想の範囲内において、適宜、種々の変更が可能である。以上の実施形態は、あくまでも、本発明の実施形態の例であって、本発明ないし各構成要件の用語の意義は、以上の実施形態に記載されたものに制限されるものではない。上述の説明文中に示した具体的な数値は、単なる例示であって、当然の如く、それらを様々な数値に変更することができる。

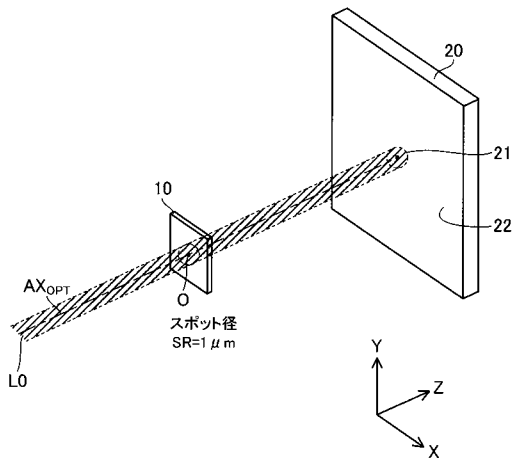
【符号の説明】

50

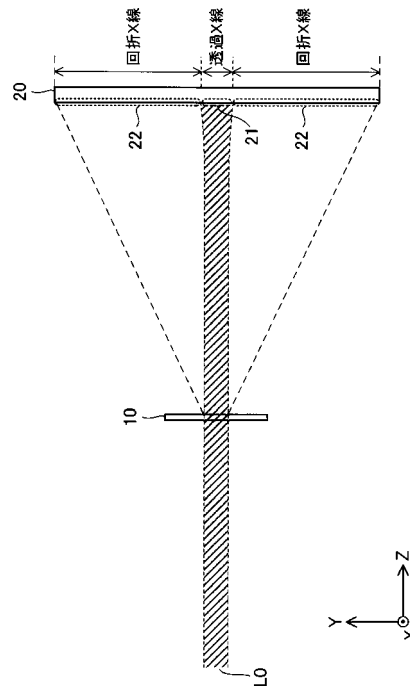
【 0 1 0 7 】

- 1 イメージング装置
- 10 試料
- 20 二次元検出器
- 30 駆動装置
- 40、40A、40B 参照光源用構造体（散乱用構造体）
- 41A、41B 板状体
- 42A 柱体（凸型の柱状構造部）
- 42B 柱状開口部（凹型の柱状構造部）
- 50 遮蔽体
- 60 演算装置
- L0 入射光
- 200 イメージング装置
- 201 E U V 光
- 203 E U V マスク（試料）
- 204 二次元検出器
- 205 演算装置
- 210 参照光源用構造体（散乱用構造体）
- 220 遮蔽体

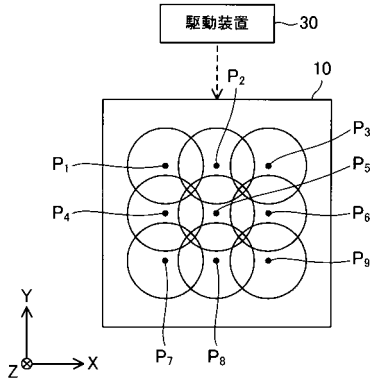
【 図 1 】



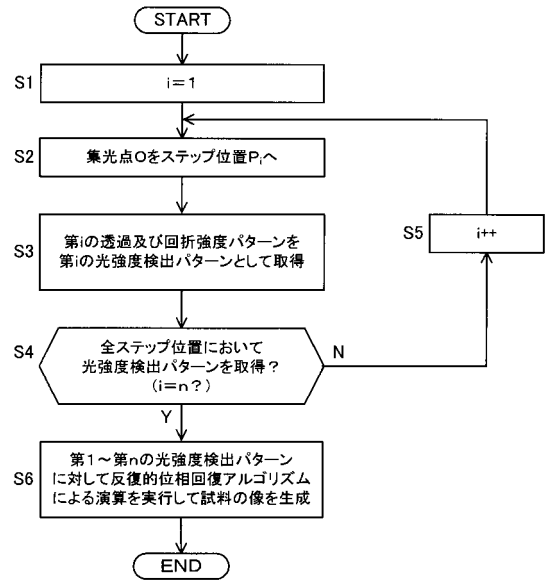
【 図 2 】



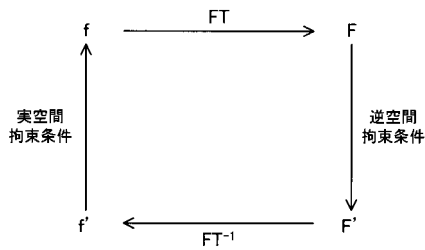
【 図 3 】



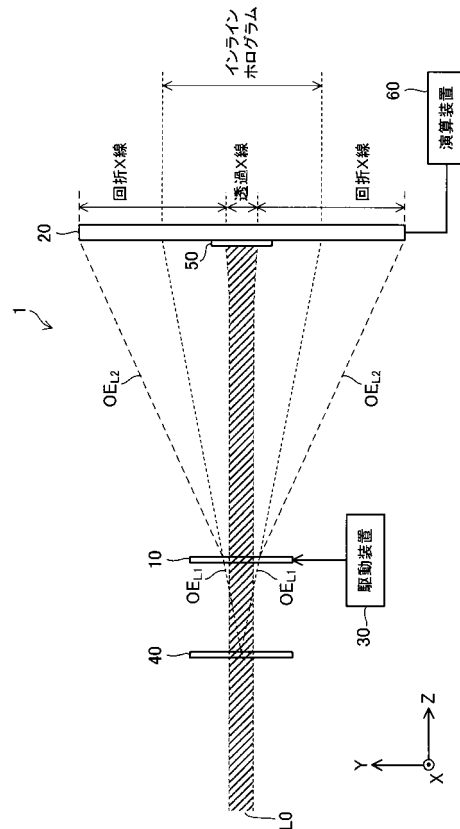
【 図 4 】



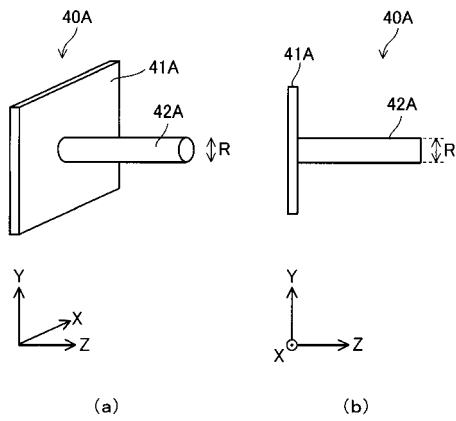
【 図 5 】



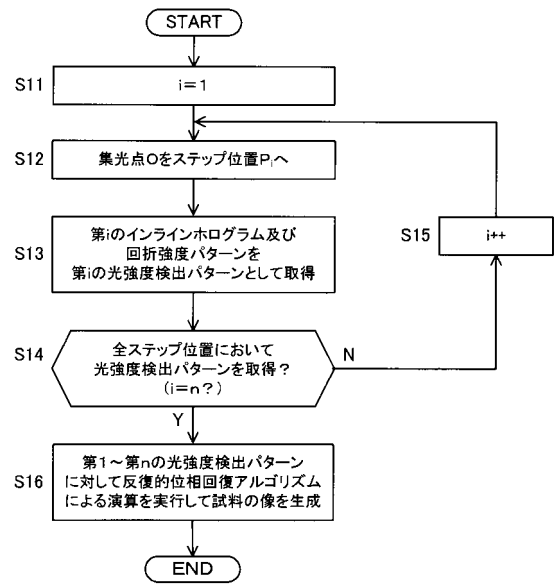
【 図 7 】



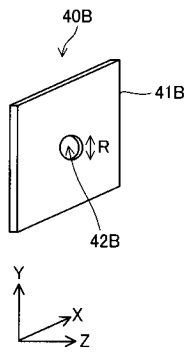
【 図 8 】



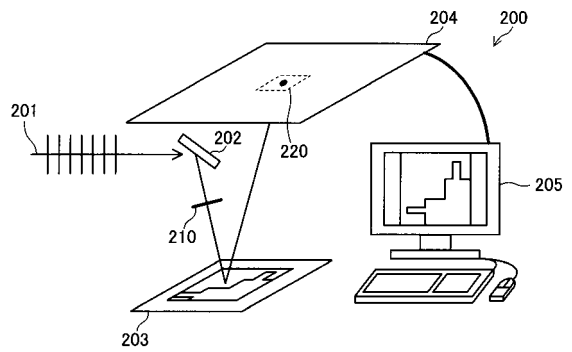
【 図 9 】



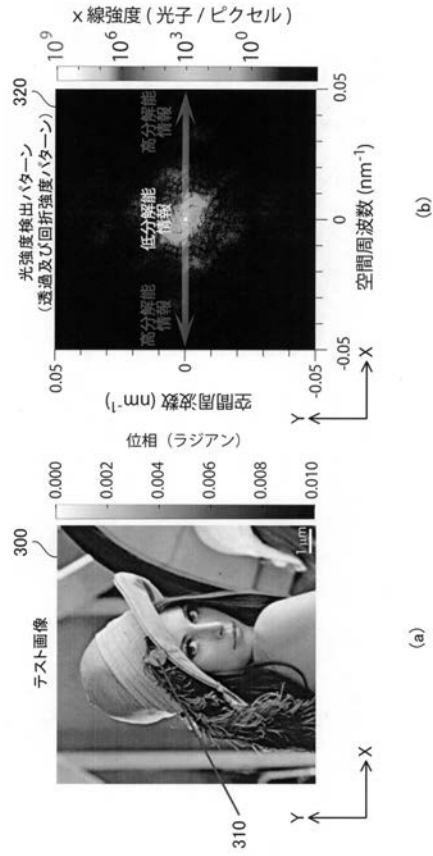
【 図 13 】



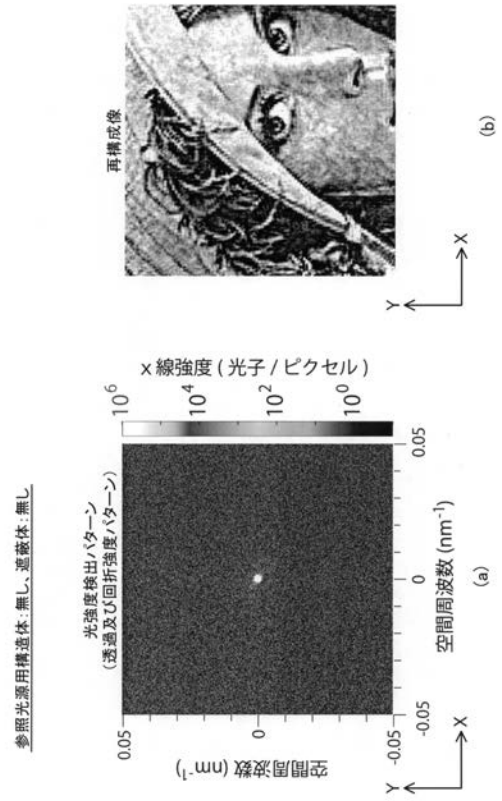
【 図 18 】



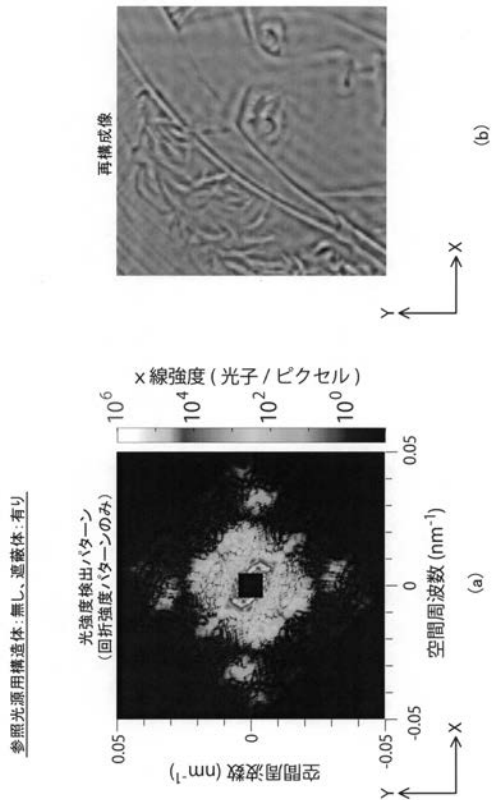
【 図 6 】



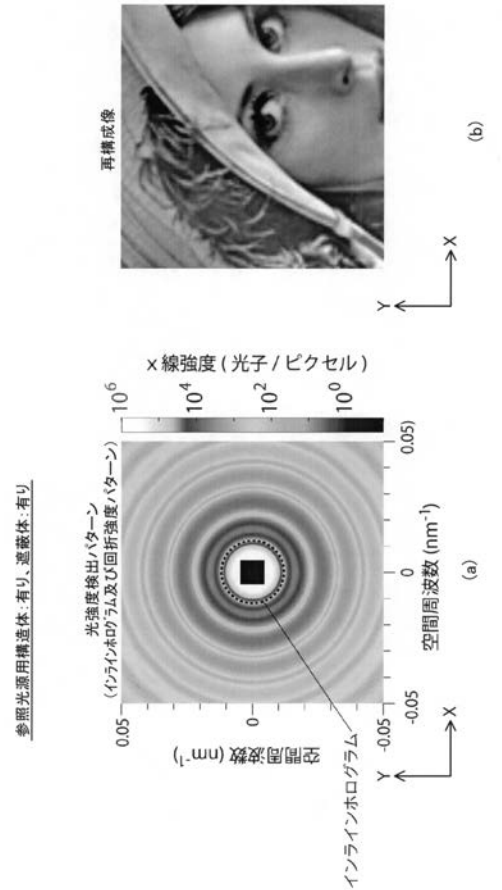
【 図 1 0 】



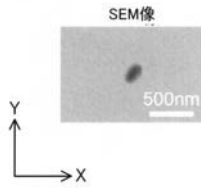
【 図 1 1 】



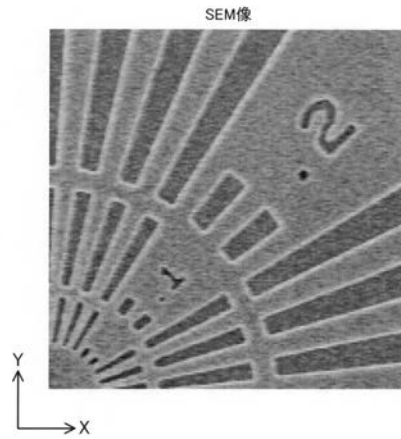
【 図 1 2 】



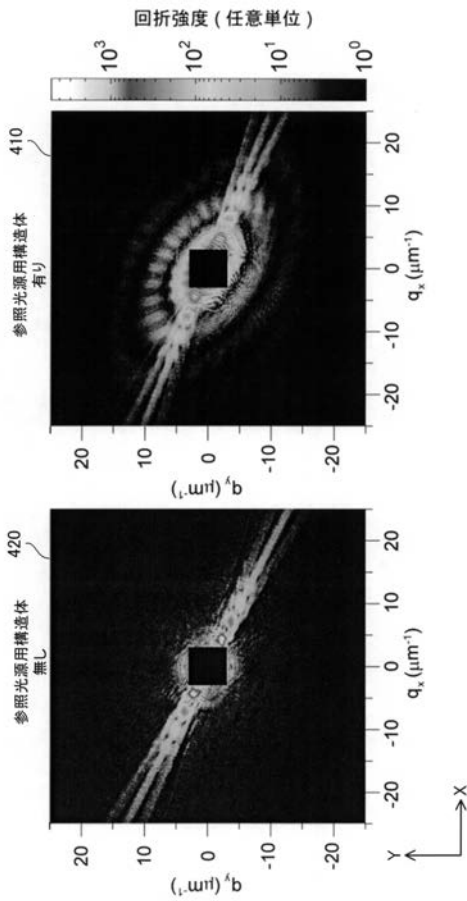
【 図 1 4 】



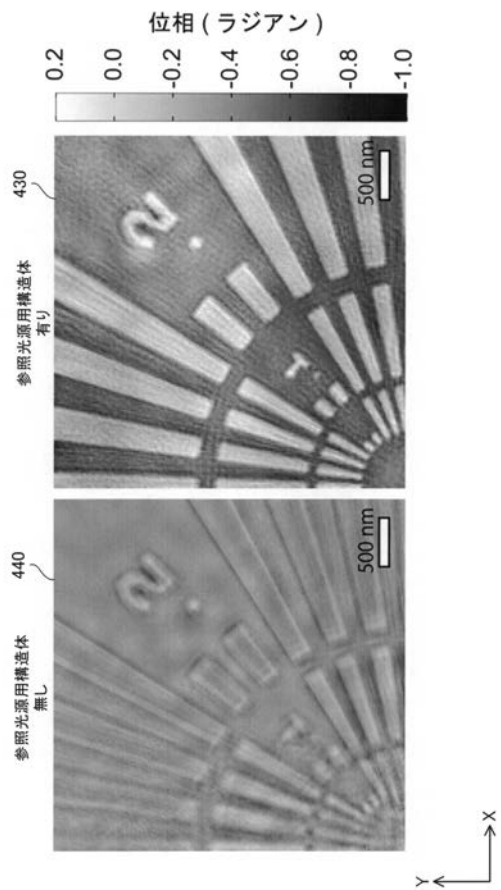
【 図 1 5 】



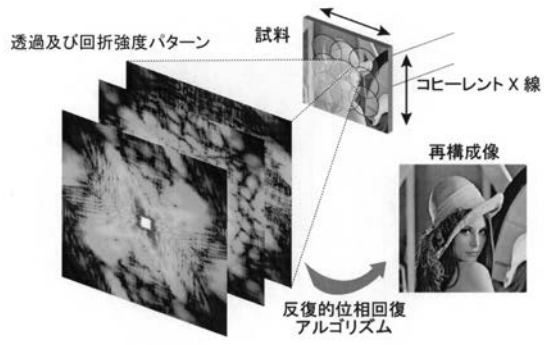
【 図 1 6 】



【 図 1 7 】



【 図 1 9 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.

F I

テーマコード(参考)

G 0 1 N 21/33

特許法第30条第2項適用申請有り ・学会「International Workshop on Phase Retrieval and Coherent Scattering」の会合「Coherence 2014」に関するウェブサイトへの掲載(平成26年8月26日、<http://coherence2014.aps.anl.gov/uploads/coherence/program.pdf>) ・集会における発表(学会名「International Workshop on Phase Retrieval and Coherent Scattering」、会合名「Coherence 2014」、平成26年9月4日、開催場所「Norris Center, Northwestern University, 1999 Campus Drive, Evanston IL 60208, USA」) ・日本放射光学会の会合「第28回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム」に関するウェブサイトへの掲載(平成26年12月25日、<http://www.jssrr.jp/jsr2015/abstract/>) ・集会における発表(学会名「日本放射光学会」、会合名「第28回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム」、開催場所「滋賀県草津市野路東1丁目1-1 立命館大学びわこ・くさつキャンパス」、平成27年1月11日)

(出願人による申告)平成26年度採択課題,独立行政法人科学技術振興機構,「暗視野X線タイコグラフィ法の開発」委託研究,産業技術強化法第19条の適用を受ける特許出願

(72)発明者 広瀬 真

埼玉県和光市広沢2番1号 独立行政法人理化学研究所内

Fターム(参考) 2G001 AA01 BA11 BA14 BA18 CA01 DA09 FA02 GA01 GA06 HA07
 JA09 MA05 MA06
 2G059 AA05 BB10 BB15 EE02 FF01 FF03 HH04 JJ13 KK04 MM01
 2G188 AA25 AA27 BB02 CC28 DD05 DD30 DD31 EE12 EE17