

(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2013-164339

(P2013-164339A)

(43) 公開日 平成25年8月22日(2013.8.22)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
GO 1 N 23/04 (2006.01)	GO 1 N 23/04	2 G 001
A 6 1 B 6/00 (2006.01)	A 6 1 B 6/00 3 00 J	4 C 093
G 2 1 K 1/02 (2006.01)	A 6 1 B 6/00 3 3 0 Z G 2 1 K 1/02 G	

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2012-27540 (P2012-27540)	(71) 出願人	000001007 キヤノン株式会社 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(22) 出願日	平成24年2月10日 (2012.2.10)	(74) 代理人	100126240 弁理士 阿部 琢磨
		(74) 代理人	100124442 弁理士 黒岩 創吾
		(72) 発明者	半田 宗一郎 東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤ ノン株式会社内
			F ターム (参考) 2G001 AA01 BA18 CA01 DA09 EA01 4C093 AA07 CA32 EB24

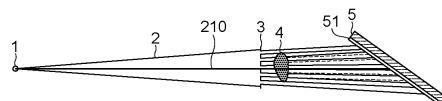
(54) 【発明の名称】 X線撮像装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 従来に比べて周期の短い周期パターンの検出が可能な格子型X線位相イメージング装置を提供する。

【解決手段】 X線撮像装置は、X線源1からのX線を用いて周期パターンを形成する格子3と、周期パターンを検出する検出器5と、を備えた被検査物4を撮像するX線撮像装置である。X線の光軸210に垂直な平面内における周期パターンの周期方向である第1の方向と、同平面内における検出器5のX線受光面に平行な直線とのなす角を θ_1 とおき、また、X線受光面に対するX線の斜入射角を θ_2 とおいた時、

$$\frac{1}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}} > 2$$



が成り立つ。また、格子3の表面とX線の光軸210とがなす角度が45°以上90°以下である。

【選択図】図1

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

X線源からのX線を用いて周期パターンを形成する格子と、前記周期パターンを検出する検出器と、を備えた被検査物を撮像するX線撮像装置であって、

前記X線の光軸に垂直な平面内における前記周期パターンの周期方向である第1の方向と、前記平面内における前記検出器のX線受光面に平行な直線と、のなす角を₁、

前記X線受光面に対する前記X線の斜入射角を₂とおいた時、

【数1】

$$\frac{1}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}} > 2$$

10

が成り立ち、

前記格子の表面と前記X線の光軸とがなす角度が45°以上90°以下であることを特徴とするX線撮像装置。

【請求項 2】

X線源からのX線を用いて周期パターンを形成する格子と、前記周期パターンを検出する検出器と、を備えた被検査物を撮像するX線撮像装置であって、

前記X線の光軸に垂直な平面内における前記周期パターンの周期方向である第1の方向と、前記平面内における前記検出器のX線受光面に平行な直線とのなす角を₁、

前記X線受光面に対する前記X線の斜入射角を₂、

前記X線の光軸に垂直かつ、前記受光面と交差する平面内における前記周期パターンの前記第1の方向におけるピッチをp₀、前記受光面上における第1の方向に対応する方向の分解可能な最小の長さをRとおいた時、

₂は0°より大きく、30°より小さく、

【数2】

$$\frac{p_0}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}} \geq R$$

30

が成り立ち、

前記格子と前記X線の光軸とがなす角度が45°以上90°以下であることを特徴とするX線撮像装置。

【請求項 3】

前記格子の表面と前記X線の光軸とがなす角度が60°以上90°以下であることを特徴とする請求項1又は2に記載のX線撮像装置。

40

【請求項 4】

|90° - ₁| < ₂であることを特徴とする請求項1乃至3に記載のX線撮像装置。

【請求項 5】

前記格子はX線を回折する回折格子であり、前記周期パターンは回折された前記X線同士が干渉することにより生じる干渉パターンであることを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項に記載のX線撮像装置。

【請求項 6】

前記X線受光面を複数有することを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項に記載の

50

X線撮像装置。

【請求項 7】

前記検出器はX線変換層を有し、

前記X線変換層の厚さが $p_0 / 2 \cos \theta_2$ 以下であることを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項に記載のX線撮像装置。

【請求項 8】

前記周期パターンは、前記第1の方向と交差する第2の方向にも周期を有し、

前記X線受光面は、姿勢調節手段により第1の姿勢と、第1の姿勢と異なる第2の姿勢とをとり、

前記検出器は、前記X線受光面が前記第1の姿勢のときと、前記第2の姿勢のときとで夫々前記周期パターンを検出することを特徴とする請求項1乃至7のいずれか1項に記載のX線撮像装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、X線の位相を利用した撮像装置に関する。

【背景技術】

【0002】

X線は高い物質透過性を持っていることから、被検査物の内部構造の撮像手段として、医療や工業において広く利用されている。また近年では、被検査物の透過により発生するX線の位相シフトを利用した撮像方法(X線位相イメージング)が研究開発されている。

【0003】

X線の位相を利用した撮像方法の一つとして格子を利用して周期パターンを形成する撮像方法が提案されている。この種の方法として、たとえば特許文献1に記載の格子の影を検出器に投影する方法と特許文献2に記載されているトールボット(Talbot)干渉法が知られている。

【0004】

特許文献1の例では、格子によりX線を多数のビームに空間的に分割し、このX線ビームを被検査物に照射し、被検査物を透過したX線ビームにより形成される周期パターンを検出器により検出する。X線ビームは、被検査物を透過することによる位相変化に従って屈折し、この屈折がX線ビームの位置ずれを起こす。このX線ビームの位置ずれを被検査物による周期パターンの変化として検出器で検出することができる。

【0005】

上述の方法においては、格子により分割されたX線ビームの間隔が撮像装置の性能や装置サイズを決定する重要な数値の一つとなる。一般的には、X線ビームの間隔がたとえば数十 μm であるなど比較的短い方が、X線ビームの屈折に対する検出感度、空間分解能、屈折の情報と吸収の情報を分離する能力、装置サイズ等の点から好ましい。

【0006】

特許文献2の例では、格子として回折格子を用い、トールボット効果によって自己像と呼ばれる干渉パターンを形成し、被検査物を透過することによる干渉パターンの変化を検出することによって被検査物によるX線の位相シフトを検出する。トールボット干渉法においては、数 μm の周期を持つ干渉パターンを格子から数百mm離れた位置に存在する検出器のX線受光面上に形成させることが一般的である。尚、干渉パターンはX線(光)の干渉により形成される周期パターンの1種である。このような撮像方法は、X線位相イメージングの分野においてトールボット干渉法と呼ばれる。

【0007】

しかしながら、X線撮像装置に使用される検出器の空間分解能は通常数十 μm あるいは100 μm 以上であり、一般的なトールボット干渉法で形成される干渉パターンを直接検出することは困難となる。

【0008】

10

20

30

40

50

この問題を解決するために、特許文献2では、干渉パターンが形成される位置に干渉パターンとほぼ等しい周期の構造を持つ遮蔽格子を配置することにより、干渉パターンの局所的な変化を間接的に検出することを可能にしている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献1】国際公開第95/05725号

【特許文献2】米国特許第5812629号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0010】

上記のように、格子の影を検出器に投影する方法を行う場合、一般的にX線ビームの間隔が小さい方が好ましい。

【0011】

しかし、X線撮像装置に使用される検出器の空間分解能は通常数十 μm あるいは100 μm 以上であるため、X線ビームの間隔は検出器の空間分解能に合わせて設計する必要があった。

【0012】

また、トールボット干渉法では遮蔽格子を用いて干渉パターンを間接的に検出する方法が提案されているが、遮蔽格子を用いることは装置の複雑化を招いていた。

20

【0013】

これらの理由から、周期パターンを用いて被検査物を撮像する撮像装置においては、より周期が短い周期パターンを検出器により直接検出することができる撮像装置が望まれていた。

【0014】

そこで本発明は、X線の周期パターンを用いて被検査物を撮像する撮像装置であって、従来に比べて周期の短い周期パターンの直接検出が可能なX線撮像装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

30

【0015】

本発明のX線撮像装置は、X線源からのX線を用いて周期パターンを形成する格子と、前記周期パターンを検出する検出器と、を備えた被検査物を撮像するX線撮像装置であって、前記X線の光軸に垂直な平面内において前記周期パターンの周期方向である第1の方向と、前記平面内における前記検出器のX線受光面に平行な直線とのなす角を θ_1 、前記X線受光面に対する前記X線の斜入射角を θ_2 とおいた時、

【0016】

【数1】

$$\frac{1}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}} > 2$$

40

【0017】

が成り立ち、前記格子と前記X線の光軸とがなす角度が45°以上90°以下であることを特徴とする。

【0018】

本発明のその他の側面については、以下で説明する実施の形態で明らかにする。

【発明の効果】

【0019】

50

従来に比べて周期の短い周期パターンの直接検出が可能なX線撮像装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】本発明の第1実施形態のX線撮像装置を示した図である。

【図2】本発明の第1実施形態における分割されたビームのX線受光面への斜入射について示した図である。

【図3】本発明の第1実施形態における、斜入射による拡大率と、入射方向に関する角度との関係を示したグラフである。

【図4】本発明の第1実施形態における分割されたビームの斜入射角と、検出器のX線変換層の厚さとの関係を示した図である。 10

【図5】本発明の第1実施形態のX線撮像装置の変形例を示した図である。

【発明を実施するための形態】

【0021】

以下に、本発明の好ましい実施形態を添付の図面に基づいて詳細に説明する。なお、各図において、同一の部材については同一の参照番号を付し、重複する説明は省略する。

【0022】

〔第1実施形態〕

第1実施形態ではX線撮像装置として格子の影を検出器に投影する方法を用いる撮像装置について説明をする。図1は本実施形態のX線撮像装置を示している。本実施形態のX線撮像装置は、X線源1と、X線2を分割してビームを形成する格子3と、格子3により形成された周期パターンを検出する検出器5を備えている。また、検出器5による検出結果は、不図示の演算手段によって位相回復処理され、被検査物の位相に関する情報が得られる。 20

【0023】

X線源1は、発散X線を出射するものでも、平行X線を出射するもの（例えばシンクロトロン）でも良い。また、特性X線を出射するものでも、連続X線を出射するものでも良い。但し、格子3により形成される周期パターンが、検出器5のX線受光面51においてコントラストを有することができるようなX線2を出射する必要がある。

【0024】

本実施形態において、格子3は分割素子である。分割素子は、X線を透過する透過部とX線を遮蔽する遮蔽部が周期的に配列されている構造を有することで、X線2を空間的に分割してX線ビームを形成する。分割素子はこのようにX線ビームを形成することにより、検出器のX線受光面51上に、第1の方向に対応する方向に周期パターンを形成する。 30

【0025】

尚、本明細書において周期パターンとは、一定の周期を有するパターンだけでなく、パターンの間隔が規則的に変化するパターンのことも指す。例えば、パターンの中心部から遠ざかるほど、パターンの明部同士の間隔が大きくなるようなパターンも周期パターンと呼ぶ。検出器による検出結果から被検査物に関する情報を計算する際には、X線受光面上に形成される周期パターンの周期は一定であることが好ましい。しかし、被検査物によるパターンの変化を検出できれば、周期が一定でないパターンを用いても被検査物に関する情報を得ることができる。また、第1の方向に対応する方向とは、第1の方向をX線受光面上に投影したときに形成されるX線受光面上の一方方向であり、X線源から見ると第1の方向22と第1の方向に対応する方向220は重なる。 40

【0026】

また、この格子3の表面とX線の光軸210がなす角度は、45°以上90°以下であることが好ましい。更に、格子3の表面と光軸のなす角度が60°以上90°以下であることがより好ましい。但し、本実施形態において、X線の光軸とはX線源（X線源のX線出射部）の中心と検出器のX線受光面上のX線照射範囲の中心を結んだ直線のことを指す。図1には図示していないが、X線源と被検査物の間にX線の絞りが配置された撮像装置 50

の場合は、X線源とその絞りの中心を通る直線がX線の光軸と一致する。

【0027】

格子の表面と光軸がなす角度が小さいほど、格子と光軸の交点における格子に対するX線の入射角は大きくなり、斜入射角は小さくなる。すると、X線源から見た格子の面積が小さくなり、格子の実効面積が狭くなる。

【0028】

加えて、一般的な格子は光軸に対して垂直に配置されることを想定して設計、作製されており、格子の表面と光軸のなす角度が小さいほど設計時に想定した周期パターンが得にくくなる。例えば、格子の構造のアスペクト比とX線の入射角によっては、格子に入射したX線全体が格子を通過するまでの間に遮蔽部を構成するX線吸収体の一部を透過することがある。それにより、周期パターンのコントラストが低下したり、全体的に均一に遮蔽されてしまい周期パターンが形成されなかったりする。

10

【0029】

X線は被検査物4を透過することにより位相が変化して進行方向が変化する。これにより、分割された個々のX線ビームの検出位置にずれが発生する。この位置ずれ量を元に、X線が屈折した角度を計算することができる。屈折の角度は光の波面の傾き角度とみなせるため、このような計算により波面の傾き量分布を得ることができる。また、得られた波面の傾き量分布を数値的に積分することにより、波面の形状を得ることもできる。波面形状は被検査物を透過することによるX線の位相シフト量分布とみなすこともできることから、位相像と呼ばれることがある。同様に、波面の傾き量分布は波面形状の空間微分値の分布であることから、微分位相像と呼ばれることがある。このような位相像及び微分位相像は、被検体を透過したX線の位相情報をを利用して取得された被検査物4の像であると言える。

20

【0030】

尚、図1では格子3と検出器5の間に被検査物4を配置したが、X線源1と格子3の間に被検査物4を配置しても良い。

【0031】

本実施形態において検出器5は間接変換型フラットパネル検出器であり、X線受光面51とX線変換層（シンチレーター層）52と撮像素子53を有している。また、本実施形態とは異なるが、間接変換型フラットパネル検出器の代わりに直接変換型フラットパネル検出器を用いても良い。直接変換型の検出器の場合、検出器はX線受光面とX線変換層（光電変換層）を有し、X線変換層により電気信号に変換されたX線を検出する。

30

【0032】

本実施形態のX線撮像装置では、検出器のX線受光面51に対しX線ビームが斜めに入射（斜入射）するように検出器5を配置する。これにより、X線受光面51上に形成される周期パターンが拡大され、X線ビームが垂直に入射するよりも周期が小さな周期パターンを直接検出することができる。

【0033】

斜入射による周期パターンの拡大について図2を用いて説明をする。なお、ここでは格子3として、スリットが一定の周期で一列に並んだ1次元格子を想定して説明をする。また、格子の表面と光軸のなす角度が90°の場合を想定する。このような場合、分割されたX線ビームは多重のシート状ビームとなる。

40

【0034】

図2(a)は、X線の光軸21に垂直な平面内における、周期パターン24を表している。

【0035】

図2(a)において光軸21は紙面に対して垂直方向となる。光軸21に垂直な平面において、p₀をX線受光面が配置される位置における周期パターン24の周期方向（以下、第1の方向と呼ぶことがある）22に沿った周期とする。X線受光面が配置される位置における周期について説明をする。

50

【0036】

格子に入射するX線が平行X線の場合、 p_0 はX線源から格子の距離と格子からX線受光面の距離の影響を受けない。しかし、格子に入射するX線が発散X線の場合、X線源から格子までの距離と格子からX線受光面までの距離に応じて周期パターンが拡大される。例えば図1ではX線受光面のうち上部と下部ではX線の発散による拡大率が異なるため、 p_0 も厳密には異なる。尚、X線受光面が配置される位置における周期パターン24の周期方向22に沿った周期とは、言い換えれば、X線の光軸に垂直かつ、X線受光面51と交差する平面内における周期パターン24の周期方向におけるピッチである。 p_0 は、平行X線を格子に照射したときに形成される周期パターン周期に、X線の発散による拡大率をかけることで求めることができる。また、 p_0 は上述のとおり光軸に垂直な平面内における周期パターンの周期であるため、X線が受光面に垂直に入射したときの受光面上におけるパターンの周期ということもできる。

10

【0037】

また、X線の光軸21に垂直な平面内における、周期方向22とX線受光面51に対して平行な直線の一つを表す直線23とのなす角を θ_1 と定義する。図2(a)の周期パターン24の縦方向(y軸方向)及び横方向(x軸方向)の周期はそれぞれ、 $p_0 / \sin \theta_1$ 、 $p_0 / |\cos \theta_1|$ と表せる(ただし $0^\circ < \theta_1 < 180^\circ$ とする)。

20

【0038】

図2(b)は、X線の入射方向に平行かつ、X線受光面51に垂直な一平面における周期パターン24(X線ビーム)とX線受光面51を表している。図2(b)はX線受光面のX線照射範囲の中心とその周辺部を拡大した図であるため、X線の入射方向は光軸21と一致するものとする。また、拡大図なので周期パターン24を形成するX線ビーム同士はほぼ平行であるため、X線ビーム同士は平行であると近似して図示した。図2(b)の θ_2 は、この平面においてX線受光面51とX線の入射方向のなす角度であり、X線の斜入射角である。尚、X線の入射方向とは、X線受光面51のある領域において、その領域とX線源とを直線で結んだ方向のことを指し、X線源と被検査物の間にX線の絞りが配置された撮像装置の場合は、その絞りの中心とその領域とを直線で結んだ方向のことを指す。

20

【0039】

図2(b)より、同図中の横方向に(X線の入射方向に平行かつ、X線受光面51に垂直な一平面内でのX線受光面と平行な方向)に対する周期パターン24の周期は $p_0 / \sin \theta_1 \sin \theta_2$ と表せることが分かる。

30

【0040】

図2(c)は、X線受光面上における周期パターン24を表している。図2(c)の横方向は図2(a)中の横方向(x軸方向)図2(c)の縦方向は図2(b)中の横方向にそれぞれ対応している。尚、図2(c)も図2(b)同様にX線受光面のX線照射範囲の中心とその周辺部を拡大した図であり、X線の発散による拡大率のばらつきは無視できるとして周期パターン24のピッチは等しく図示した。

40

図2(c)より、

【0041】

【数2】

$$a = \sqrt{\frac{p_0^2}{|\cos \theta_1|^2} + \frac{p_0^2}{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2}} = \sqrt{\frac{p_0^2(\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1)}{\cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2}} = \frac{p_0 \sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}}{|\cos \theta_1| \sin \theta_1 \sin \theta_2}$$

【0042】

このため、X線受光面上における周期パターン24の第1の方向に対応する方向に沿った周期 p は、

【0043】

【数3】

$$p = \frac{p_0}{|\cos \theta_1|} \sin \alpha = \frac{p_0}{|\cos \theta_1|} \left(\frac{p_0}{\sin \theta_1 \sin \theta_2} \frac{1}{a} \right)$$

$$= \frac{p_0}{|\cos \theta_1|} \frac{p_0}{\sin \theta_1 \sin \theta_2} \frac{|\cos \theta_1| \sin \theta_1 \sin \theta_2}{p_0 \sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}} = \frac{p_0}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}}$$

【0044】

で表される。

【0045】

したがって、X線が垂直以外の任意の方向から入射した場合のX線受光面上におけるパターン周期 p はX線が垂直に入射した場合のパターン周期 p_0 に対して拡大率 M 倍に拡大され、 $p = M p_0$ と表される。すると、上述の式より、

【0046】

【数4】

$$M = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}}$$

【0047】

である。この拡大率を、以下、斜入射による拡大率と呼ぶことがある。

【0048】

以上、X線受光面のX線照射範囲の中心とその周辺部の拡大図を例に、X線の斜入射による拡大率について説明をしたが、X線受光面のその他の領域においても同様である。但し、 θ_1 、 θ_2 及びX線の発散による拡大率を反映した p_0 はX線受光面の領域毎に異なる。例えば、図1のように格子3と検出器5を配置した場合は図1の上部ほど、 θ_2 は90°に近づき、 p_0 は小さくなる。

【0049】

周期パターンを検出器5により検出するためには、X線受光面上の周期パターン24の第1の方向に対応する方向に沿った周期が、検出器5の第1の方向に対応する方向における分解可能な最小の長さ（以下、空間分解能と呼ぶ。）以上である必要がある。これを式で表すと、

【0050】

【数5】

$$\frac{p_0}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}} \geq R \quad \text{式 (1)}$$

【0051】

が成り立つことになる。但し、Rは検出器の第1の方向に対応する方向に対する空間分解能である。また、上記式(1)はX線受光面の全面で成り立つことが好ましい。図1に示したような撮像装置においては、X線受光面の上部、つまり θ_2 が90°に近い領域ほど式(1)の左辺つまり、X線受光面上における周期パターン24の第1の方向に対応する方向に沿った周期は短くなる。また、 θ_1 が90°から遠い領域ほど式(1)の左辺つまり、X線受光面上における周期パターン24の第1の方向に対応する方向に沿った周期は短くなる。よって、X線受光面において、 θ_2 が90°に近く、 θ_1 が90°から遠い領域で式(1)が成り立てば、X線受光面の全面で式(1)が成り立つとみなすことができる。尚、X線受光面の全面とは、X線受光面の内、撮像に用いられる範囲全体のことを指

10

20

30

40

50

す。また、X線を検出する場合、一般的には周期パターンの周期が空間分解能の2倍以上の長さであると、より精密に周期パターンの強度分布を検出することができる。

【0052】

また、従来よりも周期が短い周期パターンを直接検出するためには、

【0053】

【数6】

$$M = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1}} > 2$$

10

【0054】

が成り立つことが好ましい。また、これがX線受光面の全面で成り立つことがより好ましい。斜入射による拡大率が2よりも大きくなるためには、例えば θ_1 が90°のとき、 θ_2 が0°より大きく、30°より小さければよい。尚、式(1)同様に、 θ_2 が90°に近く、 θ_1 が90°から遠い領域で斜入射による拡大率Mが2よりも大きければ、X線受光面の全面で斜入射による拡大率Mが2よりも大きいとみなすことができる。 θ_1 が一定の値を取るとき、 θ_2 が0°に近づくほど斜入射による拡大率Mは大きくなり、周期の小さな周期パターンを検出することができるため、 θ_2 は15°より小さいことが好ましく、10°より小さいことが更に好ましい。しかし、 θ_2 が0°に近づくほどX線源から見たX線受光面の面積は小さくなり、写野が狭くなるため、 θ_2 は2°より大きいことが好ましい。

20

【0055】

図3は、 $\theta_2 = 5, 10, 20$ °の時の θ_1 と斜入射による拡大率Mの関係を表したグラフである。同グラフに示されている通り、Mは $0^\circ < \theta_1 < 90^\circ$ の範囲で θ_1 に対して単調増加し、 $\theta_1 = 90^\circ$ の時に最大値 $1 / \sin \theta_2$ を取る。 $90^\circ < \theta_1 < 180^\circ$ の範囲におけるMの値が描く曲線は、 $0^\circ < \theta_1 < 90^\circ$ の範囲における曲線を左右反転したものに等しくなる。したがって、他の条件が一定の場合、X線受光面上の周期パターン24の周期は $\theta_1 = 90^\circ$ で最大となる。よって、検出器の空間分解能がX線受光面上において等方的であり、かつX線の入射方向に依存して変化しないと仮定した場合、検出されるコントラストが最大となるのは $\theta_1 = 90^\circ$ の時である。よって、 θ_1 は90°に近いことが好ましい。さらに、同グラフからは、 θ_2 が小さくなるにつれてMが最大値 $1 / \sin \theta_2$ に近い値を取る θ_1 の範囲が狭くなることが分かる。より具体的には、Mが最大値 $1 / \sin \theta_2$ に概ね近い値を取るためにには、 $|90^\circ - \theta_1| < \theta_2$ である必要があるため、 θ_1 と θ_2 はこの式を満たすことが好ましい。

30

【0056】

図4は、図2(b)と同じ平面における周期パターン24と、検出器5の断面を表している。なお、図4においては θ_2 を定数とみなした時のMが最大となる $\theta_1 = 90^\circ$ の場合を想定している。上述のように、本実施形態の検出器はX線受光面51とX線変換層52と撮像素子53を有している。図4において、X線変換層52の厚さdは $p_0 / 2 \cos \theta_2$ である。この厚さは、図4に示した平面における縦方向の周期パターン24の周期 $p_0 / \cos \theta_2$ の1/2に相当する。この条件の時、撮像素子53により検出されるX線の強度分布は概ね強度分布200のようになると考えられる。よって、撮像素子のピクセルサイズが強度分布200の周期に対して十分に小さいと仮定すれば、検出器5は個々のビームを空間的に分離して検出できる。このように、周期パターンの明部(X線強度が大きい部分)と暗部(X線強度が小さい部分)が同じ幅を持つとき、検出器5のX線変換層の厚さdは $p_0 / 2 \cos \theta_2$ 以下であることが好ましい。また、周期パターンの明部と暗部が異なる幅を持つとき、図4に示した平面の縦方向における暗部の幅よりも検出器のX線変換層の厚さを薄くすることが好ましい。言い換えれば、図4に示した平面の縦方向における周期パターンの周期 $p_0 / \cos \theta_2$ に対して暗部の幅が占める割合がc/eであることが好ましい。

40

50

のとき、 $p_0 / \cos \theta_2$ に c/e を掛けた長さよりも検出器の X 線変換層の厚さを薄くすることが好ましい。明部と暗部の幅が同じとき、 c/e は $1/2$ である。

【0057】

本実施形態の X 線撮像装置は検出器の検出結果を用いて位相回復処理を行うことにより、被検査物の情報（微分位相像、位相像）を得ることができる。位相回復処理は演算手段である計算機によって行われる。位相回復方法には、たとえばフーリエ変換法を用いることができる。フーリエ変換法の詳細は Mitsuuo Takeda et al., J. Opt. Soc. Am., Vol. 72, No. 1 (1982) に記載されているのでここでは省略する。また、格子 3 の位置を面内方向に移動させて撮像した複数の画像を元に、位相シフト法アルゴリズムを用いて算出することもできる。位相シフト法の詳細は Daniel Malacara 著 “Optical Shop Testing” 第 3 版第 14 章に記載されているのでここでは省略する。尚、計算機の計算によっては被検体の散乱像と吸収像を得ることもできる。

10

【0058】

本実施形態では、図 1 に示したような、格子 3 によって X 線を分割することでビームを形成し、格子 3 の影を X 線受光面上に直接投影して X 線受光面上に周期パターンを形成する撮像方法を行う X 線撮像装置について説明した。格子の影を直接投影する代わりに、トールボット効果を利用して X 線受光面上に周期パターンを形成しても良い。この方法は、上述のトールボット干渉法である。

20

【0059】

トールボット干渉法を用いる場合は、回折格子を用いてトールボット効果によって周期パターンを形成し、この周期パターンが形成される位置付近に検出器 5 の X 線受光面を配置する。被検査物は X 線源と格子の間又は格子と検出器の間に配置する。尚、トールボット効果により生じる周期パターンは、回折格子により回折された X 線同士が干渉することにより生じる周期パターンである。これにより、被検査物による X 線の屈折の情報を含む周期パターンを検出する。回折格子は、周期的に X 線を遮蔽する X 線遮蔽格子（振幅型の回折格子）を用いることもできるし、周期的に X 線の位相をシフトする X 線位相格子（位相型の回折格子）を使用しても良い。位相格子の方が遮蔽格子よりも多くの X 線を透過できるため、X 線量の点で有利である。一般的には、トールボット効果を利用すると格子の影を検出器に直接投影するよりも周期の短い格子や周期パターンを利用することができる。

30

【0060】

また、光源サイズの小さな X 線源を使用する代わりに、Lau 効果を利用して、線源格子を X 線源 1 と格子 3 の間に配置することで点光源が複数配列した状態を仮想的に形成しても良い。線源格子は、通常、幅の狭いスリットが等間隔に配列した構造を持っている。スリットの間隔を適切に選ぶことにより、個々のスリットを通った X 線の形成する周期パターン同士がパターン周期の整数倍だけずれて重なり合うことで、パターンのコントラストを維持しながら強度を向上させることができる。線源格子を使用した場合、X 線源 1 の光源（焦点）サイズを大きくすることが可能となるため単位時間当たりの X 線量を増加させることができ、さらに、X 線源位置（焦点位置）の振動による周期パターンのコントラスト低下を防ぐことができる。

40

【0061】

本実施形態では格子 3 として 1 次元に周期構造を持つ格子を想定したが、格子 3 及び前述の線源格子は、2 次元に周期構造を有していても良い。たとえば、格子が周期方向の互いに 90° 異なる 2 つの周期成分を有する網目状のパターンを有していても良い。このように 2 次元に周期構造を有する格子を用いると、第 1 の方向と第 1 の方向と交差する第 2 の方向に周期を有する、2 次元の周期パターンを形成することができる。

【0062】

2 次元の周期パターンを検出する場合、検出器の X 線受光面 5 1 の配置により、周期パターンに含まれる第 1 の方向の周期と第 2 の方向の周期のうちのどちらの周期を斜入射に

50

より拡大してX線受光面上に周期パターンを形成するかを選択することができる。

【0063】

また、第1の方向の周期を斜入射により拡大するためにX線受光面を第1の姿勢で配置して周期パターンを検出した後、第2の方向の周期を斜入射により拡大するためにX線受光面を第2の姿勢で配置して周期パターンを検出しても良い。こうすることで、周期パターンの2方向の周期を直接検出することができる。これにより、第1の方向に関するX線の屈折角度と第2の方向に関するX線の屈折角度を計算することができる。尚、X線受光面の姿勢の第1の姿勢から第2の姿勢への変化は、X線受光面の姿勢を調節する姿勢調節手段により行えればよい。姿勢調節手段として例えば姿勢調節指令部とその指令部からの信号を受け取りX線受光面の姿勢を動かすアクチュエーターを用いることができる。

10

【0064】

図1のように、X線受光面51を格子3に対して斜めに配置すると、X線受光面51と格子3との距離がばらつく。図1では図面の上部は図面の下部よりもX線受光面と格子との距離が短い。このように距離にばらつきが生じると、上述の通りX線の発散による周期パターンの拡大率にばらつきが生じる。この問題を解決するために、ビーム位置ずれ量算出の際に位置によるパターン周期の違いを補正する措置を取っても良い。あるいは、このX線の発散による拡大率を考慮して格子3の周期にあらかじめ勾配をつけることにより、X線受光面上に形成される周期パターンの周期のばらつきを軽減しても良い。

【0065】

検出器のX線受光面51を斜入射配置にすると、X線がX線受光面51に垂直に入射するようX線受光面を配置したときよりも検出器の検出範囲が狭くなる。すると、その撮像装置の撮像範囲(実効的写野)が狭くなる。この問題を解決するために、図5(a)のように検出器5を移動させて複数回X線を検出すること(走査)が可能な機構を設けても良いし、図5(b)のように撮像装置に検出器を複数設置しても良い。図5(a)に示したX線撮像装置は、開口部を有するシャッター7と、シャッターと検出器5を移動させる移動手段として移動指令部8とアクチュエーター9(9a, 9b)を備えている。移動指令部8とアクチュエーター9により、シャッター7とX線受光面51が図中の矢印の方向に移動する。シャッター7はX線受光面に入射する範囲のX線のみを開口から透過させ、それ以外のX線を遮蔽する。そのため、シャッターがない場合よりも被検査物のX線被曝量を低下させることができる。

20

【0066】

また、図5(b)に示したX線撮像装置のように検出器5(5a, 5b, 5c)を複数設置すると、図5(a)のように1つの検出器を移動させて検出を繰り返すよりも検出回数を抑えることができる。また、図5(b)に示したX線撮像装置は図5(a)に示したX線撮像装置同様にX線受光面を走査することが可能であり、そのために移動指令部8とアクチュエーター9(9c, 9d, 9e)を備えている。また、1つのX線受光面を有する検出器を複数用いる代わりに、X線受光面を複数有する検出器を用いても良い。図5(a)と図5(b)に示したようなX線撮像装置は、図1に示したX線撮像装置と比較して撮像範囲を広くすることができる。また、同じ広さの撮像範囲を確保する場合にはより小さなX線受光面を有する検出器を用いることができるため、X線の発散による拡大率と₂のばらつきを低減することもできる。

30

【0067】

図5(a)の検出器同様に、格子を移動させて複数回検出を行っても良いが、検出器と格子を同期させて移動させるよりも、検出器のみを移動させる方が装置の構成を簡単にできる。また、格子と光軸のなす角度によってはX線源からみた検出範囲の面積よりもX線源からみた格子の面積の方が小さくなることも考えられる。この場合、X線からみた格子の面積により一度に撮像できる範囲が制限されてしまい、撮像回数の増加を招く。これらの理由から、格子の表面が光軸となす角度は45°以上90°以下であることが好ましい。また、図5(b)の検出器同様に格子を複数設置しても良いが、この場合も格子の設置個数の増加を防ぐために格子とX線の光軸のなす角度は45°以上90°以下であること

40

50

が好ましい。

【0068】

以上のように、本実施形態のX線撮像装置では、検出器のX線受光面51に対しX線ビームが斜めに入射（斜入射）するように検出器5を配置することで、従来よりも周期が小さな周期パターンを直接検出することができる。

【0069】

これにより、格子の影を検出器に直接投影する撮像方法を行う場合は従来よりも間隔が短いX線ビームを用いることができる。

【0070】

また、トルボット法においては、周期パターンの拡大率（斜入射による拡大率とX線の発散による拡大率）によっては微細な周期パターンである干渉パターンを直接検出することができる。トルボット法においては、従来干渉パターンに遮蔽格子を組み合わせてモアレを形成し、このモアレを検出する方法が知られているが、遮蔽格子を用いてモアレを形成すると、X線受光面に届くX線量が格子による遮蔽により全体として減少する。更に、多くの場合、検出されるモアレはその元となる周期パターンに比べてコントラストが低下してしまう。さらに、周期パターンからのビームの位置ずれ量算出のために、前述のフーリエ変換法の様に、周期パターンの局所的な強度分布から位置ずれ量を算出する方法を用いる場合、モアレの周期方向に対する撮像装置の空間分解能がモアレの周期によって制限されてしまう。

【0071】

本実施形態のX線撮像装置を用いて干渉パターンを直接検出すると、X線撮像装置の構成が簡単になるだけでなく、上述のような課題を解決することも可能である。

【実施例】

【0072】

[実施例1]

本発明の第1の実施例であるX線撮像装置について説明する。本実施例のX線撮像装置は上述の第1実施形態の一実施例である。

【0073】

本実施例においては、X線源1としてタンゲステンターメットを用いた回転対陰極型X線源を使用し、管電圧35kVにおいてコーンビーム状のX線を発生させる。また、低エネルギー成分を遮断するため、厚さ1mmのアルミニウム板をX線に対するフィルターとして使用する。X線源1より1.1m離れた位置に、格子3の中心部においてX線が垂直に入射する角度で格子3を配置する。格子3はスリットが一定の周期で一列に並んだ1次元格子であり、スリット幅は10μm、周期は20μmとする。また、格子3のX線遮蔽部は、厚さ100μmの金とする。格子3の下流に検出器5のX線受光面を配置する。X線受光面はその中心に入射するX線シートビームに対して θ_1 及び θ_2 がそれぞれ $\theta_1 = 90^\circ$ 、 $\theta_2 = 9.6^\circ$ となる角度に配置する。また、X線受光面の中心が、格子3の0.5m下流に位置するように配置する。検出器5は間接変換型フラットパネル検出器であり、シンチレーター層の厚さは12μm、ピクセルサイズは45μmとする。また、格子3の1m上流、つまり、X線源から0.1mの位置に線源格子を線源格子の中心においてX線が垂直に入射する角度で配置する。線源格子は格子3と同様の1次元格子であり、X線遮蔽部は厚さ100μmの金であるものとする。ただし、線源格子のスリット幅は15μm、周期は60μmとする。被検査物4は、格子3の下流側に設置する。

【0074】

上記の撮像装置を用いて被検査物4を配置しない状態で撮像を行った場合、X線受光面上において回折による顕著な周期パターンのパターン変化は起こらず、格子3の影が概ねそのままX線受光面上に投影された形状の周期パターンがX線受光面上に形成される。線源格子の個々のスリットを通ったX線が放射状に広がるため、X線受光面の中心において、入射方向に垂直な面内におけるパターン周期（図2中における p_0 ）は30μmに拡大される。第1実施形態に記載の斜入射による拡大率Mについては、 θ_1 及び θ_2 の値から

10

20

30

40

50

$M = 6.0$ と計算されることから、X線受光面の中心付近において検出される周期パターンの周期は約 $180 \mu m$ となる。したがって、この周期パターンは、検出器5のシンチレーター層の厚さとピクセルサイズから検出可能であると考えられる。

【0075】

本実施例の撮像装置に被検査物4を配置してX線の検出を行い、その検出結果を元に、フーリエ変換法を用いてビームの位置ずれ量の解析を行うことで位相回復処理を行う。すると、被検体を透過したX線の位相シフト量分布を基にした被検査物4の像（微分位相像又は位相像）を得ることができる。また、必要に応じて、被検査物の散乱像や吸収像を得ることもできる。

【0076】

以上、本発明の好ましい実施形態及び実施例について説明したが、本発明はこれらの実施形態及び実施例に限定されず、その要旨の範囲内で種々の変形および変更が可能である。

【符号の説明】

【0077】

1 X線源

2 X線

3 格子

4 被検査物

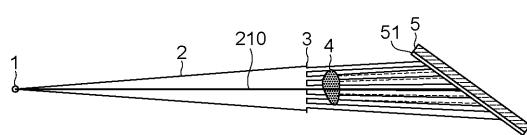
5 検出器

210 X線の光軸

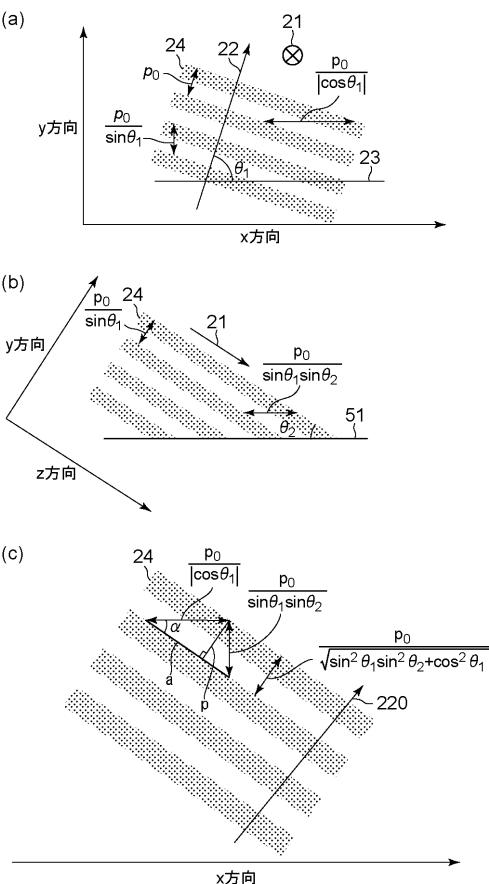
10

20

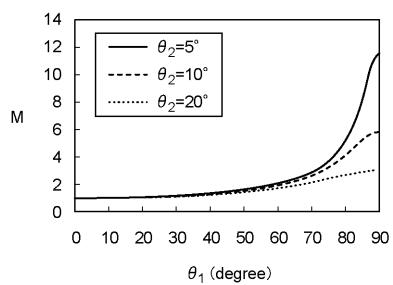
【図1】



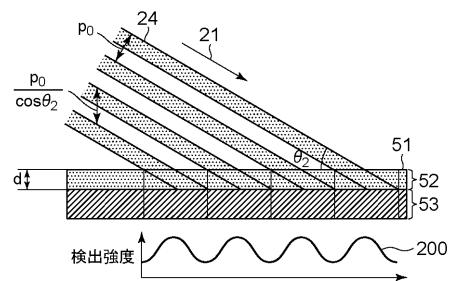
【図2】



【図3】



【図4】



【図5】

