

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6529984号
(P6529984)

(45) 発行日 令和1年6月12日 (2019.6.12)

(24) 登録日 令和1年5月24日 (2019.5.24)

(51) Int. Cl.	F I
A 6 1 B 6/00 (2006.01)	A 6 1 B 6/00 3 3 0 Z
A 6 1 B 6/06 (2006.01)	A 6 1 B 6/00 3 0 0 J
	A 6 1 B 6/06 3 3 1
	A 6 1 B 6/00 3 0 0 B

請求項の数 27 (全 61 頁)

(21) 出願番号	特願2016-564245 (P2016-564245)	(73) 特許権者	516065870
(86) (22) 出願日	平成27年4月30日 (2015.4.30)		シグレイ、インコーポレイテッド
(65) 公表番号	特表2017-514583 (P2017-514583A)		アメリカ合衆国、94520 カルフォル
(43) 公表日	平成29年6月8日 (2017.6.8)		ニア州、コンコード スイート ワン、イ
(86) 国際出願番号	PCT/US2015/028652		ムホフ ドライブ 5750
(87) 国際公開番号	W02015/168473	(74) 代理人	110000877
(87) 国際公開日	平成27年11月5日 (2015.11.5)		龍華国際特許業務法人
審査請求日	平成30年3月23日 (2018.3.23)	(72) 発明者	ルイス、シルヴィア ジア ユン
(31) 優先権主張番号	61/987, 106		アメリカ合衆国、94520 カルフォル
(32) 優先日	平成26年5月1日 (2014.5.1)		ニア州、コンコード スイート ワン、イ
(33) 優先権主張国	米国 (US)		ムホフ ドライブ 5750 シグレイ、
(31) 優先権主張番号	61/989, 743		インコーポレイテッド内
(32) 優先日	平成26年5月7日 (2014.5.7)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 X線干渉イメージングシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

X線干渉イメージングシステムであって、
真空チャンバと、
電子ビーム放出器と、
ターゲットと、を有するX線源であって、
前記ターゲットは、
第1の材料を有する基板と、

前記基板に埋め込まれ、前記電子ビーム放出器からの複数の電子によって照射されると
電子照射に応じて複数のX線を生成する第2の材料を含み、複数のX線の複数のサブ線源
の周期的パターン内に配置されている、少なくとも複数の離散構造と、を含む、X線源と

10

、
X線の複数のサブ線源の前記周期的パターンによって発せられた複数のX線を回折する
ように位置付けられたX線位相シフト格子を形成する複数の周期構造を有するビーム分割
X線格子であり、前記複数のX線は前記ビーム分割X線格子と相互作用してT a l b o t
干渉パターンを形成する、前記ビーム分割X線格子と、

結像される対象物を保持するよう構成されたステージと、

複数のX線検出素子の2次元配列を有し、前記ビーム分割X線格子によって回折され且
つ結像される前記対象物によって摂動された前記複数のX線を検出するように位置付けら
れたX線検出器と、

20

前記ビーム分割X線格子と前記X線検出器との間に位置付けられた複数のX線吸収構造の周期的配列を有する散乱防止用グリッドであり、前記複数のX線吸収構造は前記T a l b o t干渉パターンの複数のノードと位置合わせされている、前記散乱防止用グリッドと、を備える、X線干渉イメージングシステム。

【請求項2】

前記X線位相シフト格子は、予め定められたX線波長に対し、およそ π ラジアン有位相シフトを導入する複数の構造を有する、請求項1に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項3】

前記X線位相シフト格子は、予め定められたX線波長に対し、およそ $\pi/2$ ラジアン有位相シフトを導入する複数の構造を備える、請求項1に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項4】

前記X線位相シフト格子の周期 p_1 が、

$$p_1 < \lambda L / a$$

によって前記周期方向における前記ターゲットの前記複数の離散構造のうち少なくとも1つの離散構造の前記複数の周期構造の周期方向における寸法 a に関連し、ここで、 λ は、予め定められたX線波長であり、 L は、前記ターゲットと前記ビーム分割X線格子との間の距離である、請求項1から3のいずれか一項に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項5】

前記散乱防止用グリッドの前記複数のX線吸収構造は、スズ、白金、金、タングステン、タンタル、モリブデン、ニッケル、鉛、銅およびガドリニウムから成る群から選択される材料を含む、請求項1から4のいずれか一項に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項6】

前記散乱防止用グリッドは、X線透明材料を含む基板をさらに有する、請求項1から5のいずれか一項に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項7】

前記複数のX線吸収構造の1または複数の、前記複数のX線吸収構造の間の間隙の幅の5倍より高い高さを有する、請求項1から6のいずれか一項に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項8】

前記複数のX線吸収構造の周期は、前記T a l b o t干渉パターンの横方向の周期の整数倍である、請求項1から7のいずれか一項に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項9】

前記散乱防止用グリッドと前記X線検出器との間に配置されたX線吸収材料を有する第2の散乱防止用グリッドをさらに備える、請求項1から8のいずれか一項に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項10】

前記X線検出器は、予め定められた分数のT a l b o t距離において位置付けられ、前記複数のX線検出素子は、前記T a l b o t干渉パターンの複数のアンチノードと位置合わせされる、請求項1から9のいずれか一項に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項11】

前記X線検出器は、予め定められた分数のT a l b o t距離において位置付けられ、前記複数のX線検出素子は、前記T a l b o t干渉パターンの複数のノードと位置合わせされる、請求項1から9のいずれか一項に記載のX線干渉イメージングシステム。

【請求項12】

複数の第2のX線検出素子を有する第2のX線検出器であって、前記第2のX線検出器は第2の予め定められた分数のT a l b o t距離に位置付けられ、前記複数の第2のX線検出素子は、前記T a l b o t干渉パターンの前記複数のノードと位置合わせされる、前

10

20

30

40

50

記第 2 の X 線検出器をさらに備える、

請求項 10 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 13】

前記 T a l b o t 干渉パターンコントラストは、20%より高い、請求項 1 から 12 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 14】

前記第 2 の材料および前記第 1 の材料についての比 $(Z_2 \rho_2) / (Z_1 \rho_1)$ は、12より大きく、 Z_1 および ρ_1 はそれぞれ前記第 1 の材料の原子番号および質量密度であり、 Z_2 および ρ_2 はそれぞれ前記第 2 の材料の原子番号および質量密度である、請求項 1 から 13 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

10

【請求項 15】

前記第 1 の材料は、ベリリウム、ダイヤモンド、グラファイト、ケイ素、窒化ホウ素、炭化ケイ素、サファイア、およびダイヤモンド状炭素から成る群から選択される、請求項 1 から 14 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 16】

前記第 2 の材料は、鉄、コバルト、ニッケル、銅、ガリウム、亜鉛、イットリウム、ジルコニウム、モリブデン、ニオブ、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、銀、スズ、イリジウム、タンタル、タングステン、インジウム、セシウム、バリウム、金、白金、鉛、およびこれらの組み合わせおよびこれらの合金から成る群から選択される、請求項 1 から 15 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

20

【請求項 17】

前記複数の離散構造は、類似の形状を有する、請求項 1 から 16 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 18】

前記類似の形状は、正角プリズム、直角長方プリズム、立方体、三角プリズム、台形プリズム、ピラミッド型、四面体、円柱、球体、卵形、およびたる形から成る群から選択される、請求項 17 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 19】

前記複数の離散構造の前記周期的パターンは正格子であり、前記複数の離散構造のうち 1 または複数の離散構造の少なくとも一次元の幅は、10 ミクロン未満である、請求項 1 から 18 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

30

【請求項 20】

前記複数の離散構造の前記周期的パターンは、一式の平行な線であり、前記複数の離散構造のうち 1 または複数の離散構造の一次元における幅は、10 ミクロン未満であり、鉛直の次元における長さは 20 ミクロンを超える、請求項 1 から 19 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 21】

前記ターゲットは、前記真空チャンバのためのウィンドウとしても機能する、請求項 1 から 20 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 22】

40

前記 X 線検出器は、シンチレータおよび複数の電荷結合素子 (CCD) の配列を有する、請求項 1 から 21 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 23】

前記第 2 の X 線検出器は、シンチレータおよび複数の電荷結合素子 (CCD) の配列を有する、請求項 12 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 24】

前記対象物は、前記ビーム分割 X 線格子と前記 X 線検出器との間に位置づけられる、請求項 1 から 23 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 25】

前記ビーム分割 X 線格子の前記複数の周期構造は、市松模様パターンに配列される、請

50

求項 1 から 2 4 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 2 6】

前記複数の X 線検出素子の複数の寸法および位置は、前記 T a l b o t 干渉パターン of 複数の寸法に対応するように選択される、請求項 1 から 2 5 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【請求項 2 7】

前記複数の X 線吸収構造が前記 T a l b o t 干渉パターン of 複数のノードと位置合わせされるように前記散乱防止用グリッドを位置するよう構成されたコントローラをさらに備える、請求項 1 から 2 6 のいずれか一項に記載の X 線干渉イメージングシステム。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

〔関連出願への相互参照〕 本出願は、2014 年 10 月 29 日に出願された「X-RAY INTERFEROMETRIC IMAGING SYSTEM」という名称の米国特許出願第 14/527, 523 号の一部継続出願であって、これは、2013 年 10 月 31 日に提出された「X-ray Phase Contrast imaging System」という名称の米国仮特許出願第 61/898, 019 号、2013 年 11 月 7 日に提出された「An X-ray Source Consisting of AN Array of Fine Sub-Sources」という名称の米国仮特許出願第 61/981, 098 号、および、2014 年 4 月 17 日に提出された「Two Dimensional Phase Contrast Imaging Apparatus」という名称の米国特許仮出願第 61/901, 361 号の利益を主張し、これらの全ては本明細書において、これらの全体における参照によって組み込まれる。本出願は、2014 年 5 月 1 日に提出された「METHODS OF REDUCING SCATTER RADIATION USING TALBOT EFFECT」という名称の米国特許仮出願第 61, 987, 106 号、2014 年 5 月 7 日に提出された「Methods of Improving Detector MTF and DQE and Reducing Scatter Background of an X-ray Imaging System Using Coherence Effect」という名称の米国特許仮出願第 61/989, 743 号、2014 年 5 月 12 日に提出された「Method of Single-Shot Imaging to Obtain Absorption and Differential Phase, and/or Scattering, and/or Phase Contrast Images」という名称の米国特許仮出願第 61/991, 889 号、および 2014 年 5 月 15 日に提出された「Method of Talbot Effect based X-ray Imaging with High Image Contrast and Design of Apparatus Using Such」という名称の米国特許仮出願第 61/993, 811 号の利益をさらに主張し、これらの全ては、本明細書において、それらの全体における参照によって組み込まれる。本出願は、2014 年 10 月 30 日に提出された特許協力条約出願番号 PCT/US2014/063164 に対する優先権を主張し、その利益を主張し、それはこれにより、その全体における参照によって組み込まれる。

20

30

40

〔分野〕

【0002】

本明細書において開示される本発明の複数の実施形態は、X 線を用いた干渉イメージングシステムに関し、特に、位相コントラスト画像を生成するための X 線の高輝度光源を備える干渉イメージングシステムに関する。高輝度 X 線源は、低い原子番号の材料の熱伝導基板に埋め込まれた X 線発生材料の周期的微細構造を有するアノードまたはターゲットを使用してよい。

【背景技術】

50

1895年のレントゲン (W.C.Rontgen, 「Eine Neue Art von Strahlen」 (Wiirzburg Verlag, 1896年)、「On a New Kind of Rays」Nature, 第53巻、第274 - 276頁 (1896年1月23日)) によるX線の最初の発見は、レントゲンが、真空管における複数のターゲットの電子衝突を用いて実験していたときに起こった。カルシウム (原子番号 $Z=20$) を含む骨からの吸収と、ほとんど炭素 ($Z=6$) を含む軟組織からの吸収との間のコントラストは、直ぐにはっきりと表れた。なぜならば、5 keVから30 keVの間のX線エネルギーにおけるそれら2つの材料の吸収の間の差異が、図1で示されるように、10以上の因子によって異なり得るからである。これらの高エネルギーで短波長の光子は、現在では、医学的応用および診断評価、並びにセキュリティ検査、工業検査、品質管理および故障解析、さらに結晶学、トモグラフィ、X線蛍光分析、および同様のもの等の科学的応用に、日常的に使用されている。

10

X線のシャドウグラフ (shadowgraph) は、標準的な医学的診断ツールとなっているものの、単純な吸収コントラストイメージングには複数の問題がある。特に、マンモグラム等のテストについて、生体組織における複数の変化が、微妙なX線吸収画像コントラストのみにおいて生じ得、複数の腫瘍または異常組織の明確な検出を難しくする。

過去10年間に於いて、新たな種類のX線イメージング方法論が、X線位相コントラスト干渉法に基づいて出現してきた。その方法は、もともと1837年に認められ、1881年にLord Rayleighによって完全に説明された(Lord Rayleighによる「On copying diffraction gratings and some phenomena connected therewith」、Philos. Mag. 第11巻、第196-205頁(1881年))、周知のTalbot干渉効果(H. F. Talbotによる「Facts relating to optical science No. IV」、Philos. Mag. 第9巻、第401-407頁、1836年)に依存する。

20

この効果は、図 2 に示される。周期 p の吸収格子 G について、十分なコヒーレンスを有する波長 λ の単色ビームからの回折パターンは、Talbot 距離 D_T として知られる距離の複数の倍数において、(「セルフイメージ」として知られる) 元の格子パターンを再構成する繰返し干渉パターンを形成する。入射ビームが(格子 G から無限の距離に配置された発生源と同等の) 平面波である場合、 D_T は：

30

$$D_T = \frac{2p^2}{\lambda}$$

40

【 0 0 0 7 】

格子GとTalbot距離との間に、複数の他の周期干渉パターンも現れる。複数のTalbot縞の周期性および位置は、位相シフト量および吸収の割合を含む格子Gの透過特性、および格子のライン・ツー・スペース（開口）比またはデューティ比に依存する。例えば、周期吸収格子について、格子周期の半分の横方向のシフトを用いて元の格子パターンを再構成する縞パターンは、図2に示されるように、Talbot距離の半分、つまり $D_T/2$ において生じ、元の格子周期の半分の周期を有する縞パターンは、Talbot距離の4分の1、つまり $D_T/4$ で、およびTalbot距離の4分の3、つまり $3D_T/4$ において生じる。

50

$T/4$ で生じる。これらの2-D干渉パターンは、これらの複雑なパターンが装飾のオリエンタルカーペットに類似しているため、「Talbotカーペット」と呼ばれる場合がある。（注記：図2の光学的Talbotカーペットのこの画像は、Ben Goodmanにより作成されたファイルから編集され、http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optical_Talbot_Carpet.pngで入手可能である。

【0008】

図3および図4は、X線288の部分的にコヒーレントな光源200（マイクロフォーカス源として示される）および一式のTalbot干渉縞パターン289を確立する周期 p_1 のビーム分割格子 G_1 210を備える従来技術のTalbot干渉計を示す。X線源のコヒーレンス長は、好ましくは、ビーム分割格子 G_1 210の周期 p_1 に匹敵するか、またはそれより大きく定められ、そうすることで、Talbot干渉縞は、高コントラストを有するであろう（Talbot縞は、縞コントラストが、例えば20%より高い場合、良好に定義され得る）ことに留意されるべきである。ビーム分割格子210は、図2に示されるような複数の強度縞を形成する振幅（吸収または透過としても知られる）格子であってもよいが、より典型的には、周期Talbot縞289も形成する、X線パターンに対して周期段階シフトを導入する、照明X線の効率的な使用のための位相格子である。以下、本出願において、透過回折格子は、格子ラインを通るX線透過が10%未満である複数の格子を説明するのに使用され、位相格子は、複数の格子ラインを通る位相シフトが、 π の何分の1（例えば、 $1/2$ ）または奇数の整数倍である複数の格子を説明するのに使用されるであろう。

【0009】

複数のTalbot縞289は、好ましくは、Talbot縞周期の $1/3$ に等しいか、またはそれより良い空間分解能を有し、高いX線量子検出効率を有するX線検出器290を用いて検出される。検出器290は、X線強度パターンを、コネクタ291を介して画像処理システム295へ送信される複数の電子信号へと変換する。対象物がビーム経路に配置される場合、画像処理システム295は、吸収、位相、および散乱コントラスト画像を取得すべく、X線強度パターン強度情報298を処理するのに使用される。

【0010】

実際、検出器290（平面パネル検出器、またはX線を可視光に変換するシンチレータに結合された電荷結合素子（CCD）検出器等）の空間分解能は、しばしば、何十マイクロメートルのオーダーであるか、またはそれより大きく、Talbot縞289は、検出器290で直接検出するには微細過ぎるかもしれない。この場合、周期 p の分析格子 G_2 220が、しばしばモアレ縞を生成するのに使用される。画像の完全なセットを記録すべく、分析格子220は、格子周期に直交する複数の予め定められた距離を、検出器に対しておそらく動かされ、「位相ステッピング」と呼ばれる工程において複数の干渉パターンを収集するか、またはそれほど一般的ではないが、 G_1 に対して小さな角度で回転させられ、フーリエ解析のためのシングルショット画像においてモアレパターンを取得する。その1または複数の画像は、次に、波面を再構成すべく処理され、それらを生成した複数の対象物の形状、構造および組成を決定する。

【0011】

分析格子220を物理的に動かす代わりに、位相シフト情報の収集を可能にする複数の干渉画像の変換を生じさせるべく、X線源の位置も変位され得ることに留意されたい。これは、X線の線源として機能する、X線発生材料を照射する電子ビームの位置を電子的に動かすことによって（例えば、H. Miao他による「Motionless phase stepping in X-ray phase contrast imaging with a compact source」、米国科学アカデミー紀要、第110（48）巻、第19268-19272頁、2013年を参照）、または分析格子220の固定位置に対してX線源を物理的に動かすことによって、実現され得る。

【0012】

これらの格子ベースのX線位相差イメージング(XPCI)技術は、概して、「格子ベース干渉法」(GBI)と称される。

【0013】

今までのところ示されるように、格子干渉計は、複数の干渉縞を生成するのみであり、これらの縞の解析は、既に知られている格子 G_1 210の構造または照度ビームの波面を明らかにするであろう。しかしながら、対象物がX線ビームの経路に導入される場合、その対象物によって導入される波面の複数の変化は、モアレ縞として概して知られる複数のTalbot干渉縞のパターンの対応する変化をもたらす。干渉画像再構成技術が、次に、その波面を解析し、未知の対象物の構造を表す画像を再構成するのに使用され得る。

【0014】

図5において、図3および4の従来技術のTalbot干渉計が、この場合は、光源200とビーム分割格子 G_1 210との間に配置されたマウス240-Mである生体試料のためのイメージング技術として使用されることが示される。コヒーレント光源200からのX線288は、マウス240-Mおよびビーム分割格子 G_1 210を通り抜け、摂動された一式のTalbot縞289-Mを生成する。局所的な複数の位相シフトは、分析格子 G_2 220および検出器290によって分析される場合、局所的に透過した強度の複数の変化に変換する複数の角度の偏差を生成する。分析格子 G_2 220が複数の予め定められた位置によって置き換えられた状況のためにX線検出器290から複数の画像を収集することにより、干渉パターン289-Mを記録することが可能になる。

【0015】

前のように、検出器290は、X線強度パターンを、1または複数の画像298-Mを、コネクタ291を介して吸収、微分位相、位相および散乱コントラスト情報を生成するのに使用される画像処理システム295へ送信された複数の電子信号に変換する。研究中の対象物を有するまたは有さない、システムによって収集された複数の画像を含む複数の画像の数値処理が、マウス240-M等の複数の対象物を含む、それらを生成した複数の対象物の形状および構造を推測するのに使用され得る。記録された強度振動は、フーリエ級数によって表され得、適切な画像処理アルゴリズムを用い、微分位相シフトおよび吸収信号が抽出され得、対象物によるX線吸収、位相コントラストおよび散乱に対応する複数の画像が、合成され得る。(例えば、A. Momose他、「Demonstration of x-ray Talbot interferometry」、日本、J. Appl. Phys. 第42巻、L866-L868頁、2003年、2007年2月20日に発行されたA. Momoseによる米国特許第7,180,979号、およびT. Weitkamp他による「Hard X-ray phase imaging and tomography with a grating interferometer」、Proc. SPIE第5535巻、第137-142頁、2004年、および「X-ray phase imaging with a grating interferometer」、Optics Express第13(16)巻、第6296-6304頁、2005年を参照。)

【0016】

マウス240-M等の対象物が、図6に示されるように、ビーム分割格子 G_1 210-Aと分析格子 G_2 220と検出器290との間に配置され得る、その他の構成が存在することに留意されるべきである。様々な位相および振幅格子を用いるか、または分析格子220を用いずに、より高い分解能画素を有する検出器290を用いるその他の構成も、当業者にとって周知であってよい。

【0017】

マウスの生体構造のイメージングの他に、位相コントラストX線イメージングの複数の臨床応用が、がん組織の密度が健康な組織とは区別可能な位相シグネチャを有し得る(例えば、J. Keyrilainen他による「Phase contrast X-ray imaging of breast」、Acta Radiologica、第51(8)巻、第866-884頁、2010年、を参照)マンモグラフィにおいて、また

10

20

30

40

50

は、複数の骨構造の角度の向きが早期の骨疾患の指標であり得る骨粗しょう症または変形性関節炎のような骨疾患（例えば、P. Coan他による「In vivo x-ray phase contrast analyzer-based imaging for longitudinal osteoarthritis studies in guinea pigs」、Phys. Med. Biol. 第55（24）巻、第7649－62頁、2010年、参照）について、見られ得る。

【0018】

しかしながら、今までのところ説明された従来技術の構成に対し、X線電力は問題である。半値全幅の直径Sを有するX線源は、

【数2】

$$S \leq \frac{\lambda L}{2 \pi p_1}$$

によって与えられる。ここで、 p_1 はビーム分割格子 $G_1 210$ の周期であり、Lは、光源200とビーム分割格子 $G_1 210$ との間の距離であり、その技術が高コントラスト縞およびモアレパターンを生成するのに要求される。実際の適用およびシステム形状について、これは、マイクロフォーカス源を暗示する。しかしながら、ターゲットの電子衝突は、加熱も引き起こし、実現され得るX線電力は、X線発生材料を溶融させずにマイクロスポット上に落ち得る最大合計電子パワーで限定される。限定された電子パワーは、限定されたX線電力を意味し、典型的なX線ターゲットで達成可能な低X線フラックスは、例えば、または生きている患者もしくは動物を伴うマンモグラフィまたは他の診断テストに使用される場合、許容できない程の長い露出時間をもたらす得る。合計のX線フラックスは、より大きな領域にわたってより高い電子パワーを分配することによって増加され得るが、次に、その光源は、それほどコヒーレントでなくなり、画像コントラストを低下させる。

【0019】

コヒーレントX線のより高い輝度および十分なフラックスは、シンクロトロンまたは自由電子レーザーX線源を用いることで実現され得るが、これらの機械は、何エーカーもの土地に及ぶ複数の設備を占有し得、臨床環境に用いるは非実用的である。

【0020】

より高いX線電力を可能にすることが示された1つの技術革新は、さらなる格子 G_0 （例えば、1998年9月22日に発行されたJohn F. Clauserによる米国特許第5,812,629号を参照）を採用する。そのようなシステムは、図7に示される。この構成において、周期 p_0 を有し、通常はX線透過回折格子である線源格子 $G_0 308$ は、X線源300の前に使用される。この場合、X線源は、より高い合計のX線フラックスを生成する大きな入射電子ビーム領域を有する高出力延長線源（マイクロフォーカス源ではない）であってよい。

【0021】

X線388は、格子 $G_0 308$ を通り抜け、個々に空間的にコヒーレントな（上記のマイクロフォーカス源に類似の）配列であるが、ビーム分割格子 G_1 のための照明の相互にインコヒーレント（incoherent）なサブ線源として格子開口部から現れる。 G_0 におけるそれぞれのX線サブ線源が画像形成プロセスに構成的に寄与することを確実にすべく、その設定の形状は、以下の条件を満たすべきである：

10

20

30

40

【数 3】

$$p_0 = p_2 \frac{L}{D}$$

その条件が満たされる場合、 G_0 の多くの開口部からのX線は、同じ（重複する）Talbot干渉パターンを生成し、様々な相互にインコヒーレント線源は互いに妨害しないので、これらのTalbotパターンは、強度として加わるであろう。検出器290における効果は、従って、単一のコヒーレント光源が提供し得るものを介して（信号対雑音比と共に）、信号を単に増加させることである。

【0022】

この構成は、Talbot-Lau干渉計と呼ばれる（Franz Pfeiffer 他、「Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources」、Nature Physics第2巻、第258-261頁、2006年を参照、およびChristian David、Franz Pfeiffer、および2011年2月15日に発行されたTimm Weitkampによる米国特許第7,889,838号にも記載されている）。

【0023】

図8A～図8Cは、Martin Bechによって報告されるように（M. Bech 他、「In-vivo dark-field and phase-contrast x-ray imaging」、Scientific Reports 3、記事番号3209、2013年、図1）、Talbot-Lau干渉計を用いて収集された生きたマウスのX線画像を示す。使用されたX線エネルギーは、31keVであり、複数の格子は、ケイ素（ $Z=14$ ）における複数の構造をリソグラフィーでエッチングすることによって製造された。線源のための吸収格子 G_0 および解析装置のための線源 G_2 は、パターンニングされた、金（ $Z=79$ ）を有するケイ素をさらにコーティングすることによって形成された。

【0024】

図8A～図8Cの画像の全ては、5個の干渉画像の同じセットから再構成されるとして報告され、それぞれは、10秒以上の露出時間にわたって収集された。複数の原画像は、フーリエ処理され、3つの画像モダリティを取得すべくランプ補正された。図8Aは、X線減衰に基づく強度画像を示し、骨と軟組織との間の吸収コントラストを示す。図8Bは、気管（矢印で示される）等の軟組織構造を明らかに識別する位相コントラスト画像を示す。図8Cは、毛皮および肺を強くハイライトするイメージングシステムの空間分解能より小さい線寸法を有する微細機能からのX線散乱に起因するさらなる暗視野コントラスト画像を示す。

【0025】

残念ながら、Talbot-Lau GBIの現在の技術は、線源格子 G_0 および分析格子 G_2 の両方が、微細なピッチおよび大きいアスペクト比の開口部を有するという必要条件を含む、臨床イメージング等のほぼ全ての実際の適用について、多くの制約を有する。

【0026】

線源格子 G_0 のための必要条件是、微細な個々の良好に分離されたX線サブ線源を生成し、開口部が画定する複数の構造を介したX線の望ましくない透過による画像コントラストの減少を最小限に抑えることである。しかしながら、1:1のライン・ツー・スペース比の格子について、単純なX線シャドーイングが、格子の中を通るX線透過が50%未満に限定されることを決定し、角度シャドーイング（線源からのX線の角度範囲が、対象物

に達することを制限する)が含まれる場合には、さらに低減される。さらに、対象物への放射線量を低減する G_0 の最適なライン・ツー・スペース比(前臨床および臨床イメージング応用に対して重要である)は、1:1よりもむしろ3:1に近い。この場合、線源からのX線の約75%は、領域シャドーイングだけにより遮られ、大きいアスペクト比を有する格子が使用される場合、より高い損失が、角度シャドーイングによって生じる。

【0027】

分析格子 G_2 のための必要条件是、コントラストを失うことなく、十分な分解能を有するTalbot干渉縞をサンプリングすることが可能であることである。結果として、 G_0 および G_2 格子の両方が、小さい開口部を有さなければいけなく、線源からのX線の効率的な使用を制限する望ましくないX線透過を最小限に抑えるのに十分な厚みを有する。さらに、分析格子 G_2 からの損失により、調査中の対象物の(G_2 格子を有さない同じシステムに比べて)著しく高い線量をもたらされ、複数回の露光に起因して、より低い信号対雑音比をもたらす位相ステッピングおよびX線吸収の良好な特性を備えた画像が生成される。研究中の対象物が、生きている動物または人間である場合、より高い線量の電離放射は望ましくなく、一般的に推奨されない。

10

【0028】

格子 G_0 の複数の開口部寸法がより大きい場合、角度コリメーションは(領域シャドーイングではないが)低減され得る。そうすることで、X線透過は極度に減少しないが、これは、開口部から下流側のX線ビームの空間コヒーレンス長を減少させ、画像コントラストにおける減少をもたらす。より小さい開口部は、可能な画像コントラストおよび分解能を、空間的コヒーレンスを向上することによって増大し得るが、システムにおける全体的なX線の数減少させ、従って、より長い露出時間を必要とする。さらに、より小さい開口部で、これらの微細格子を製造することはより難しくなる。

20

【0029】

対象物の中を十分に透過させることを獲得し、割当て線量を低減するのにしばしば所望される高エネルギーX線にTalbot-Lau干渉計を使用することを試みる場合、その問題は悪化する。一般に、図1に示されたように、生体組織のためのX線の吸収は、5 keVより高いエネルギーを有するX線に対し、はるかに低く、高エネルギーX線の使用は、有害可能性のある電離放射の吸収線量を複数の桁で低減するであろう。しかしながら、5 keVの光子は、0.248 nmの波長を有し、50 keVの光子は、10倍小さい波長(0.0248 nm)を有する。さらに、これらのより高いエネルギーのために G_0 および G_2 等の吸収格子を作ると、格子の厚みが指数関数的に増加し、高エネルギーX線の同じ吸収因子を保つ(X線減衰長は、およそ E_{keV}^{-3} に比例する)ことから、より短い波長のX線は、困難を示し得る。

30

【0030】

一次元のみにおいて干渉データを収集するのに使用され得る、線状格子を用いたTalbot-Lau GBIの先行する問題は、2つの直交する方向において位相コントラスト画像を生成することを望む場合により深刻になる。これには、画像の再構成をロバストにし、複数の画像をより理解可能にすることが、しばしば必要とされる。なぜならば、1-Dの場合に、格子ラインと平行な複数の特徴部が、通常、あまり正確に測定されないためである。1つの単純な手法は、2つの直交する方向においてXPCIを実行し、その後続いて2つのデータセットを適切に登録することである。イメージングおよび登録プロセスに関連する複数の試みに加えて、この手法は、特に、動き得る、または、単にせっかちになり得る、位相ステッピングが2つの方向において実行されなければいけない場合に増加した投与量(2倍)を受けるであろう生きている被験者と共に使用される場合、実用的ではないかもしれない。同時の2次元XPCIは、特に、単一の露出(ショット)および高X線エネルギーにおけるデータ収集が、露出時間および吸収投与量を低減することが可能である場合に、望ましい。

40

【0031】

従って、Talbot-Lau干渉計の分解能および検出能力を提供するが、より明る

50

い小型X線源、および、理想的には、高エネルギーX線のより明るい線源、特に、同時の2次元位相差イメージングを提供し得るものを採用するX線干渉イメージングシステムに対する必要性がある。

【発明の概要】

【0032】

我々は、本明細書で、X線源が、周期的配列パターン内で配置された複数の微細構造のX線発生材料を有するターゲットを備え、周期的なX線のサブ線源を形成する、X線干渉イメージングシステムを開示する。そのシステムは、2次元X線強度を複数の電子信号へと変換すべく、Talbot干渉パターンを生成するビーム分割格子 G_1 およびX線検出器をさらに備える。

10

【0033】

検出器の空間分解能が、Talbot縞周期の $1/3$ に等しいか、またはそれより良い場合、検出器は、直接複数の縞を記録し得る。そのシステムは、さらなる干渉縞を形成すべく、検出器の前に配置され得る第2の分析格子 G_2 、および、検出器においてモアレ縞を生成すべく、分析格子 G_2 を検出器に対して移動させる手段も備えてよい。さらに、システムは、位相格子 G_1 を分析格子 G_2 に対して移動させる手段を備えてよい。

【0034】

X線源ターゲットは、ダイヤモンドまたはベリリウム等の、低い原子番号の材料の熱的伝導性基板と密接に熱的接触をする（モリブデンまたはタングステン等の）複数のX線発生材料の複数の微細構造を備える。X線発生微細構造は、周期的パターンにおいて配置され得、パターンの各周期的素子は、単一の離散的微細構造に対応し、または代替的に、パターンの各周期的素子は、複数の離散的微細構造を備える。1または複数の電子源が、周期的配列内に概して配置された複数のX線発生材料を衝撃する。そうすることで、各周期的配列素子から発生したX線は、ビーム分割用の照明格子 G の個々のコヒーレントサブX線源として機能する。いくつかの実施形態において、複数の微細構造は、ミクロンのオーダーで測定される横寸法を有し、基板材料内の電子侵入深さの半分のオーダーの厚みを有する。いくつかの実施形態において、複数の微細構造は、規則的な2次元配列で形成される。

20

【0035】

ビーム分割格子 G_1 は、位相格子または吸収格子であってよい。分析格子 G_2 は、概して、透過回折格子である。両方の格子 G_1 および G_2 は、ケイ素におけるリソグラフィーで生成された微細構造として製造されてよく、1-D構造、2-D構造、またはこれらの組み合わせを備えてよい。

30

【0036】

本発明の特定の利点は、ベリリウムまたはダイヤモンド等の低い Z の材料で高熱伝導率の基板に密接に熱的接触しているか、またはそれに埋め込まれているX線ターゲットを用いることによって、高いX線輝度および高いX線パワーが、高い Z の材料の微細構造が、実現され得ることである。基板のX線発生材料から熱を引き離す能力は、より高い電子密度および出力が使用されることを可能にし、複数のサブ線源の各々から、より高いX線輝度および出力を発生させる。これは、個々の空間的に良好に分離された複数のコヒーレントX線サブ線源を、高い Z の材料から作成することをもたらし一方、低に Z および低質量密度を有する基板の使用は、基板からX線を生成することを最小限に抑え、画像コントラストにおける減少をもたらし得る。

40

【図面の簡単な説明】

【0037】

【図1】炭素およびカルシウムのX線吸収のプロットを、X線エネルギーの関数として示す。

【0038】

【図2】透過回折格子によって生成される従来技術のTalbot干渉パターンを示す。

【0039】

50

【図 3】マイクロフォーカス源を用いる従来技術の X 線格子干渉システムを示す。

【0040】

【図 4】図 3 の従来技術の X 線格子干渉システムの断面図を示す。

【0041】

【図 5】マウスの X 線コントラスト画像を形成するのに使用される、図 3 の従来技術の X 線格子干渉システムを示す。

【0042】

【図 6】マウスの X 線コントラスト画像を形成するのに使用される、図 3 の従来技術の X 線格子干渉システムの変化を示す。

【0043】

10

【図 7】マウスの X 線コントラスト画像を形成するのに使用される従来技術の Talbot - Lau 干渉計を示す。

【0044】

【図 8 A】従来技術の Talbot - Lau 干渉システムを用いて収集されたマウスの公開された X 線吸収画像を示す。

【0045】

【図 8 B】従来技術の Talbot - Lau 干渉システムを用いて収集されたマウスの公開された X 線位相コントラスト画像を示す。

【0046】

【図 8 C】従来技術の Talbot - Lau 干渉システムを用いて収集されたマウスの公開された X 線暗視野散乱画像を示す。

20

【0047】

【図 9】本発明による X 線干渉イメージングシステムの実施形態の略断面図を示す。

【0048】

【図 10】本発明の実施形態の略断面図を示す。

【0049】

【図 11】X 線ターゲットが、X 線発生微細構造の 2 つの次元周期的配列を有する、図 10 に示される本発明の実施形態の斜視図を示す。

【0050】

【図 12】図 10 および 11 に示される本発明の実施形態の詳細な略断面図を示す。

30

【0051】

【図 13】X 線ターゲットが、平行な線の形態の X 線発生微細構造を有する、本発明の実施形態の斜視図を示す。

【0052】

【図 14】対象物（マウス）が、格子 G_1 と G_2 との間に配置された本発明の実施形態の斜視図を示す。

【0053】

【図 15】高分解能検出器が、分析格子なしで使用される、本発明の実施形態の詳細な略断面図を示す。

【0054】

40

【図 16】対象物（マウス）が、格子 G_1 と検出器との間に配置され、格子 G_1 は 2 次元位相構造を有する、本発明の実施形態の斜視図を示す。

【0055】

【図 17】本発明のいくつかの実施形態において使用されるビーム分割格子について「メッシュ」2-D パターンを示す。

【0056】

【図 18】本発明のいくつかの実施形態において使用されるビーム分割格子について「市松模様」2-D パターンを示す。

【0057】

【図 19】対象物（マウス）が線源と格子 G_1 との間に配置され、格子 G_1 は 2 次元位相

50

構造を有する、本発明の実施形態の斜視図を示す。

【0058】

【図20】ターゲットが真空チャンバ内に取り付けられた本発明の実施形態の略断面図を示す。

【0059】

【図21】図20に示される本発明の実施形態の詳細な略断面図を示す。

【0060】

【図22】ターゲットが真空チャンバ内に取り付けられ、X線が線状累積を用いて発生させられる、本発明の実施形態の略断面図を示す。

【0061】

【図23】図22に示される本発明の実施形態の詳細な略断面図を示す。

【0062】

【図24】2つの電子ビームが、両方の側からターゲットを照射する、本発明の実施形態の略断面図を示す。

【0063】

【図25】図24に示される本発明の実施形態の詳細な略断面図を示す。

【0064】

【図26】本発明のいくつかの実施形態において使用され得る、埋め込み矩形ターゲットの微細構造のグリッドを大型基板上に有するターゲットの斜視図を示す。

【0065】

【図27】本発明のいくつかの実施形態において使用され得る集束電子ビームと共に用いるための、埋め込み矩形ターゲットの微細構造のグリッドを大型基板上に有するターゲットの変形例の斜視図を示す。

【0066】

【図28A】本発明のいくつかの実施形態において使用され得る、埋め込み矩形ターゲットの微細構造のグリッドを有するターゲットの斜視図を示す。

【0067】

【図28B】図28Aのターゲットの上面図を示す。

【0068】

【図28C】図28Aおよび図28Bのターゲットの側面／断面図を示す。

【0069】

【図29A】本発明のいくつかの実施形態において使用されるような周期的線状パターンを形成する一式の埋め込み矩形ターゲットの微細構造を有するターゲットの斜視図を示す。

【0070】

【図29B】図29Aのターゲットの上面図を示す。

【0071】

【図29C】図29Aおよび図29Bのターゲットの側面／断面図を示す。

【0072】

【図30】処理変動から生じ得る図28A～図28Cに示されるようなターゲットについて、ターゲット構造の変化を示す。

【0073】

【図31】処理変動から生じ得る図29A～図29Cに示されるようなターゲットについて、ターゲット構造の変化を示す。

【0074】

【図32】本発明による、電子ビーム露光中の熱伝導性基板への熱の伝達を示す図28A～図28Cおよび／または図29A～図29Cのターゲットの一部の断面図を示す。

【0075】

【図33】本発明による、熱冷却経路を有する基板を備える、図28A～図28C、図29A～図29Cおよび／または図32のターゲットの変化の断面図を示す。

10

20

30

40

50

【0076】

【図34】本発明による、密着層を備える図28A～図28Cおよび／または図29A～図29Cのターゲットの別の変形の断面図を示す。

【0077】

【図35】本発明による、導電性保護膜を備える、図28A～図28Cおよび／または図29A～図29Cのターゲットの別の変形の断面図を示す。

【0078】

【図36】本発明による、埋設されたX線材料を備える、図28A～図28Cおよび／または図29A～図29Cのターゲットの別の変形の断面図を示す。

【0079】

【図37】本発明による、埋設されたX線材料と、厚みのある、熱伝導性および導電性の保護膜とを備える、図28A～図28Cおよび／または図29A～図29Cのターゲットの別の変形の断面図を示す。

【0080】

【図38】基板によって生成されたX線の透過を遮断すべく、基板の裏面上のさらなる遮断構造を備える、図28A～図28Cおよび／または図29A～図29Cのターゲットの別の変形の断面図を示す。

【0081】

【図39】金およびケイ素のX線吸収のプロットを、X線エネルギーの関数として、示す。

【0082】

【図40】さらなる散乱防止用の格子が使用される本発明の実施形態について、詳細な略断面図を示す。

【0083】

【図41】T a l b o t干渉パターン内の散乱防止用の格子の配置の断面を示す。

【0084】

【図42】散乱防止用の格子の概略的断面を示す。

【0085】

【図43】さらなる散乱防止用の格子が検出器における分析格子と共に使用される本発明の実施形態について、詳細な略断面図を示す。

【0086】

【図44】検出素子が、T a l b o t干渉パターンの高い強度の部分と位置合わせされた本発明の実施形態について、略断面図を示す。

【0087】

【図45】複数の検出素子が、T a l b o t干渉パターンの高い強度（複数の防止ノード）と位置合わせされるように、ビーム分割格子が検出器の上流側に配置される本発明の実施形態について、略断面図を示す。

【0088】

【図46】明視野および暗視野検出器の両方を備える本発明の実施形態について、略断面図を示す。

【0089】

【図47】シンチレータが、X線を可視光／UV光子へと変換するのに使用される、明視野および暗視野検出器の両方を備える本発明の実施形態について、略断面図を示す。

【0090】

【図48】本発明のいくつかの実施形態によるX線位相格子の可能な構造を示す。

【0091】

【図49】本発明のいくつかの実施形態によるX線吸収格子の可能な構造を示す。

【0092】

注記：本出願において開示される複数の図面の例示は、通常は、縮尺通りに示されておらず、本発明の原則およびその機能のみを示し、ターゲットにおける複数の微細構造と、

10

20

30

40

50

p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 および p_6 といった様々な格子周期との間の特定の関係は示さないことを意味する。これらの対象物の寸法の具体的詳細については、明細書の文章における説明を参照されたい。

【発明を実施するための形態】

【0093】

本発明の様々な実施形態の説明 本明細書で開示される本発明の一実施形態は、図9に示されるように、X線位相差イメージング(XPCI)システムである。システムは、それが、Talbot干渉パターンを確立する周期 p_1 のビーム分割格子 G_1 210と、2次元のX線強度を複数の電子信号へと変換するセンサの配列を通常有するX線検出器290とを備える点で、従来技術のTalbot-Lau干渉計といくらかの類似性を有する。

10

【0094】

ビーム分割格子 G_1 210は、位相格子または透過回折格子であってよく、複数の1-D周期的パターン(線状格子)を有してよく、または2つの直交する方向において周期的であるグリッド等のより複雑な2-D構造を有してもよい。

【0095】

システムは、モアレ縞等のさらなる複数の干渉縞を形成すべく、検出器の前に配置され得る周期 p_2 の分析格子 G_2 220も備えてよい。システムは、分析格子 G_2 220を検出器に対して移動させる手段225と、検出されたX線強度に対応する複数の電子信号を画像処理システム295へ処理のために送信するコネクタ291とを、さらに備えてよい。

20

【0096】

しかしながら、Talbot-Lauシステムにおいて行われたように、延長されたX線源およびさらなる格子 G_0 を、複数のX線源スポットを生成すべく用いる代わりに、本発明の複数の実施形態は、電子ビーム衝突から複数のX線188を発生させる周期的配列において配置された複数のX線発生サブ線源108を有するX線源を使用する。そうすることで、各サブ線源は、個々にコヒーレントであるが、ビーム分割格子 G_1 のための照明の、一式の相互にインコヒーレントであるか、または部分的にコヒーレントである複数のサブ線源として共に機能する。Talbot-Lau干渉計の延長されたX線源および線源格子の組み合わせと同様に、これらのサブ線源108は、ビーム分割格子 G_1 210によって生成され、対象物240-Mによって摂動され、検出器290によって記録され得る複数のTalbot干渉縞パターンを形成する。検出器290の空間分解能が、Talbot縞周期の $1/3$ に等しいか、またはそれより良い空間分解能を有する場合、検出器は、複数の縞を直接記録してよい。低解像度検出器が使用される場合、分析格子 G_2 220は、Talbot-Lau干渉計について説明されたように、複数のモアレ縞を生成するのにも使用されてよい。

30

【0097】

複数の離散X線サブ線源は、Talbot-LauシステムのX線源より大幅に明るくなり得る。線源は、自己コヒーレントであるが、相互にインコヒーレントであり得る複数のサブ線源を有するので、減衰透過回折格子 G_0 が、延長されたX線源から複数のサブ線源の配列を生成する必要はない。

40

【0098】

構造化されたターゲットにおいて複数のサブ線源を備える、本発明によるシステムは、指定されたTalbot-ST干渉計であってよい。

【0099】

図10、図11および図12は、複数のサブ線源の配列が、熱的伝導性基板に埋め込まれたX線発生材料の複数の微細構造を用いて形成される、本発明の一実施形態のより詳細な例示を示す。この実施形態において、X線源008は、対象物240-Mおよびビーム分割格子 G_1 210に照明を照らし、それらが形成する干渉パターンは、検出器290によって検出される。

50

【0100】

X線源008について、複数の支持部003によって遮蔽筐体005に保持された真空チャンバ002において、高電圧電源010は、導線021を介して電子放出器011に複数の電子を提供する。電子放出器011は、ターゲット100の方向へ複数の電子111を放出する。ターゲット100は、基板1000と、（通常は、ベリリウム、ダイヤモンド、炭化ケイ素等の低いZの材料）基板上に配置されるか、または基板に埋め込まれるか、または基板に埋設されたX線発生材料（通常、銅、モリブデンまたはタングステン等の高いZの金属材料）を含む離散的微細構造700の周期的配列を有する領域とを有する。離散的微細構造700は、任意の数のサイズまたは形状であってよいが、横寸法が、少なくとも一次元において、ミクロンのオーダーのサイズを有する複数の直角長方プリズムの複数の周期的配列であるように概して設計される。そうすることで、各微細構造からの放出は、ビーム分割格子 G_1 210で格子周期 p_1 に匹敵するか、またはそれより大きい空間コヒーレンス長を有するサブX線源として作用する。さらに、複数の微細構造は、好ましくは、基板材料内の電子侵入深さの半分のオーダーにある厚み（通常、ターゲット面に直交して測定される）を有する。

10

【0101】

複数のサブX線源を形成する複数の微細構造700の周期 p_0 は：

【数4】

$$p_0 = p_2 \frac{L}{D}$$

20

によってシステムにおける他の複数の幾何学的パラメータに関連する。ここで、 L は、複数のX線サブ線源700から格子 G_1 210までの距離であり、 D は、格子 G_1 から周期 p_2 を有する検出器／分析格子 G_2 220までの距離である。いくつかの実施形態において、 D は、高コントラスト（可視性）の複数の干渉縞を有する分数のT a l b o t距離の1つであるとして設定されるであろう：

【数5】

30

$$Contrast = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

によって定義される。ここで、 $I_{\max}$ および $I_{\min}$ は、それぞれ、ビーム経路に対象物を有さないT a l b o t干渉縞の強度最大値および最小値である。

【0102】

π 位相シフトを有するビーム分割格子の平面波照明（すなわち、無限の距離に配置されているX線源と同等の）について、距離 D は、好ましくは：

40

【数6】

$$D = D_N = N \frac{p_1^2}{8\lambda} = \frac{N}{16} D_r$$

によって与えられる。ここで、 D_N は、平面波照明についての分数のT a l b o t距離であり、 λ は、平均X線波長であり、 N は、T a l b o t分数次数として称される。 D の好ましい値は、ビーム分割格子 G_1 の複数の減衰または位相シフト特性、ビーム分割格子 G_1 のライン・スペース比、および線源から格子までの距離 L に依存する。1：1のラ

50

イン・ツー・スペース比を有する π 位相シフト格子について、奇数整数の分数のT a l b o t オーダー N ($N = 1, 3, 5, \dots$) が、距離 D を決定するのに好ましい。有限の距離（例えば、無限ではなく L ）において配置されたX線源について、 D は：

【数 7】

$$D = \frac{L \times D_N}{L - D_N}$$

に増加させられる。

10

【0103】

所与の分数オーダーのT a l b o t 縞周期 p_f は：

【数 8】

$$p_f = K p_1 \frac{L + D}{L}$$

によって与えられる。ここで、 T は、ビーム分割格子 G_1 の減衰または位相シフト特性に依存するパラメータである。ビーム分割格子が π 位相シフト格子である場合、 K は $1/2$ に等しく、ビーム分割格子が $\pi/2$ 位相シフト格子である場合、 K は 1 に等しい。

20

【0104】

同様に、T a l b o t 縞コントラストは、より小さいX線サブ線源サイズ（すなわち、より空間的にコヒーレントなX線）が使用される場合、改善され、ビーム分割格子 G_1 に使用されるピッチ p_1 が、サブ線源 a のサイズおよびそれらの間の距離 L に関連する場合、以下の必要条件を満たす。

【数 9】

$$p_1 < \frac{\lambda L}{a}$$

30

ここで、 λ は、対応するサブ線源によって発生される単色X線の波長に概して対応するであろう予め定められたX線波長であるか、またはより広範なスペクトルを有するX線サブ線源の平均X線波長である。

【0105】

真空チャンバ002において、複数の電子111がターゲットに衝突し、複数の微細構造700において熱およびX線888を発生させる。基板1000における材料は、通常、基板のために低い Z の材料を選択することによって、それがX線発生材料の複数の微細構造に比較して複数の電子について比較的低いエネルギー堆積速度を有するように選択され、従って、かなりの熱量およびX線を発生させないであろう。基板1000材料は、通常 100 W/m^2 より高い、高熱伝導率を有するようにも選択されてよい。X線発生材料の微細構造はまた、基板内に通常埋め込まれている。すなわち微細構造が直角プリズムとして形作られる場合、6個の側面のうち少なくとも5個が、基板1000と密接に熱的接触していることが好ましい。そうすることで、微細構造700において発生する熱は、基板1000から効果的に放散する。しかしながら、他の複数の実施形態において使用される複数のターゲットは、より少ない直接接触の表面を有してもよい。一般に、本開示において「埋め込まれ」という用語が使用される場合、微細構造の表面積の少なくとも半分は、基板と密接に熱的接触をするであろう。

40

50

【0106】

複数の微細構造は、通常、導線022を用いて高電圧源010の正極に電氣的に接続され、ターゲットが電気系においてアノードとして機能することを可能にする。代替的に、ターゲットは、カソード（電子放出器）が負電荷を有する間、接地されてよい。またはターゲットは、アノードがカソードよりも比較的高い電圧を有する限り、カソードが接地されている間、正極に接続されてよい。さらに、いくつかの実施形態において、静電レンズ等の電子光学または磁気コイルが、電子ビームをさらに方向付け集束すべく、複数の電子111の経路の周りもしくは近くの真空チャンバ002の内部または外側に配置されてよい。

【0107】

示されるようなターゲット100は、真空チャンバ002におけるウィンドウとしてさらに機能してもよい。そうすることで、X線発生材料は、真空チャンバおよび電子源の内側に面しているが、X線888は、また、ターゲット100の裏側を介してビーム分割格子 G_1 210の方向へ伝搬する。他の複数の実施形態において、別個のウィンドウが使用され、さらなるX線フィルタも使用されてよい。

【0108】

一度、線源008によって発生すると、X線888は、任意選択的なシャッタ230、所望の波長を有する所望のスペクトルバンド幅を取得するためのX線分光フィルタ、および調査される対象物240-Mを通り抜けてよい。X線は、次に、基板211上にさらに取り付けられてよいビーム分割格子 G_1 210から回折し、次に、基板221上にまた取り

【0109】

付けられてよい分析格子 G_2 220上に落ちる。最後の干渉パターンは、X線強度に対応する複数の電気信号を、コネクタ291を介して画像処理システム295へ解析のために提供するアレイ検出器290によって検出されるであろう。

【0110】

X線源および干渉検出システムに加えて、対象物240-Mおよび様々な格子を、互いに対して検出器へ、および線源へと移動させる手段が使用されてよい。図10において、画像処理システム295はまた、ネットワーク231を介して、対象物240-Mの位置および角度を設定する段階244を制御する手段245と、ビーム分割格子 G_1 210の位置および角度を設定するマウント214を制御する手段215と、分析格子 G_2 220の位置および角度を設定するマウント224を制御する手段225と、X線が動かされ

【0110】

変調される（オンおよびオフにされること等）を可能にするシャッタ230もしくは高電圧供給源010用のスイッチ013への可能な接続部と、に接続されてよい。画像処理システム295における複数のプロセッサによって実行されるソフトウェアは、格子 G_1 210、 G_2 220の動作、対象物240-M、およびX線露光も制御してよく、対象物240-Mの詳細な振幅、微分位相、位相コントラスト、および複数の散乱コントラスト画像を取得するのに必要とされる複数の画像の収集を可能にする。

【0111】

図13は、ターゲット100が、基板1000および複数の微細構造の線状線源701を備える本発明の実施形態を示す。これらの微細構造の線状サブ線源701は、通常、一方向（概して、格子 G_1 210および G_2 220のラインの方向と直交する次元における、図13のy方向に対応して、サブ線源のサイズパラメータaに対応する）において2、3ミクロン幅であろう。しかし、それらのラインと平行な方向（図13におけるx方向に対応する）において、はるかに長い（例えば、最大1000ミクロンまで、または数ミリメートル）。図13に示されるサブ線源としての微細構造701のピッチは、 p_0 であり

、数式 4 によって解析装置／検出器のピッチに関連する。

【0112】

図 1 4 は、検査される対象物 2 4 0-M が、格子 G_1 2 1 0 と検出器 2 9 0 との間に配置される本発明の実施形態を示す。図 1 4 に示されるようなターゲット上の X 線発生材料の複数の微細構造 7 0 0 は、2 つの直交する方向における 2-D 周期的配列において配置された複数のサブ線源を有するが、グリッド、メッシュ、市松模様、または他の周期的構造を含むビーム分割格子 G_1 2 1 0 のコヒーレンス照明条件を満たす任意の周期的配列であってよい。

【0113】

複数の格子が 1 次元の構造を有する場合、線源ターゲット 1 0 0 における複数の微細構造 7 0 0 は、 G_1 2 1 0 および G_2 2 2 0 の 1-D 配列と同じ方向において周期的であることのみが必要である（すなわち、複数の微細構造 7 0 1 のラインが、複数の格子のラインと理想的には平行である）が、鉛直方向において、任意のまたは非周期構造を有し得る。

【0114】

図 1 5 は、分析格子 G_2 2 2 0 は無いが、その代わりに検出器 2 9 9 が、複数の格子ラインと直交する方向において T a l b o t 縞周期 3 分の 1 ($1/3$) に等しいか、またはそれより良い画素分解能を有する高分解能配列 G_D を有する、本発明の実施形態をさらに示す。この分解能で、単一の露出画像が、吸収、段階、および散乱コントラスト画像を同時に取得すべく、処理され得る。これは、 G_2 2 2 0 を通り抜ける X 線に通常生じる 5 0 % 以上の強度損失が回避され、検出器に達する信号、および、従って信号対雑音比が実質的に高いという点で有益であり得る。

【0115】

対象物 2 4 0-M についての詳細な振幅、微分位相、位相コントラスト、および散乱コントラスト画像の計算用に複数の画像を収集すべく、図 1 5 の実施形態は、格子 G_1 の面と平行な 2 つの横方向においてだけでなく、X 線の伝搬の経路に沿って定義される方向においても、検出器 2 9 0 を移動させるための手段 2 5 5 をさらに備えてよく、検出器 2 9 9 が、正確な T a l b o t 距離 T_D の正確な倍数において配置されることを確実にする。

【0116】

図 1 6 は、ビーム分割格子 G_1 2 1 0-2 D が、透過または位相格子のどちらであってよい、2 次元周期的配列を有する、本発明の実施形態を示す。この種類の 2-D ビーム分割格子を用いる場合、複数のパターンは、図 1 7 に示されるパターン等の、メッシュを含む多数の周期的パターン、または図 1 8 に示されるような市松模様パターンのいずれか 1 つに配置されてよい。これらの例示において、明確な領域は、非位相シフト領域である一方、パターン化された領域は、相対的な位相シフトを有する領域を表す。複数の異なる、または対向さえする相対的な位相シフトもいくつかの実施形態において使用されてよい。すなわち、複数の無地の領域は、位相シフトされ得る一方、パターン化された領域は位相シフトされ得ない。

【0117】

およそ平均エネルギーで $\pm 15\%$ 未満のスペクトルバンド幅を有する入射 X 線ビームと共に用いるために、 π ラジアン位の相シフトおよび 1:1 のライン・ツー・スペース比を有するビーム分割格子が、好ましくてよい。 $\pm 15\%$ を超えるスペクトルバンド幅を有する入射ビームと共に用いるために、 $\pi/2$ ラジアン位の相シフトが好ましくてよい。

【0118】

いくつかの実施形態における複数のビーム分割格子は、R o n c h i 波形または矩形波形を有する構造等の、1-D ストライプを有する波形を有してよい。濃いストライプと無地のストライプとの間の相対的な位相シフトは、好ましくは、 π または $\pi/2$ ラジアンであると選択されるが、 π のいずれの整数倍または分数であってもよい。代替的に、濃いストライプは、ビーム分割格子が吸収格子であるように、低い X 線透過を有してよい。

【0119】

図16は、図15にも示されたように、高分解能検出器299と併せて2-Dビーム分割格子 G_1 210-2Dの使用を示す。2つの直交する方向における、微分位相コントラスト、位相コントラスト、吸収、散乱コントラスト画像を同時に取得すべく、X線サブ線源サイズ a 、格子 G_1 210-2Dの周期 p_1 および距離 L を含む、複数の幾何学的パラメータは、両方の方向において格子 G_1 のコヒーレンス照明条件を満たす必要がある。前のように、検出器299は、結像面における2つの直交する方向においてTalbot縞周期の $1/3$ に等しいか、またはそれより良い空間分解能を有し、Talbot縞パターンと位置合わせされるように配置される。

【0120】

10

ビーム分割格子 G_1 210-2D上に複数の2-Dパターンを有するそのような複数の実施形態は、また、位相情報が両方の直交方向において得られるように、任意の順番で2つの方向に位相差があり得る2次元分析格子 G_1 と併せて前述の低解像度検出器290と共に使用されてよい。上記の G_1 210-2Dの説明に類似して、この2-D分析格子 G_2 は、メッシュ、市松模様、または円形、三角、正方形、長方形等の構造の2-D配列等のいずれかの周期構造であってよい。

【0121】

図19は、調査中の対象物240-MがここでX線源とビーム分割格子 G_1 210-2Dとの間に配置されることを除いては、図16に類似する実施形態を表わす。

【0122】

20

複数の実施形態の一部は、吸収、位相および散乱情報が、一方向において得られ、少なくとも格子ライン方向に垂直な方向において周期的である（しかし、他の方向において周期的であってもよい）微細構造の線源ターゲットと組み合わせて1または複数の1-D格子を組み込む1次元Talbot-Yun干渉計であることに注意されたい。複数の他の実施形態は、吸収、位相、および散乱情報が、2つの直交する方向（または、2-DTalbot-Yun設定を用いて計算トモグラフィを実行することによって、全ての3次元）において得られる2次元Talbot-ST干渉計である。

【0123】

図20および図21は、X線源080が、X線遮蔽筐体050内で複数のマウント030に支えられた真空チャンバ020を有する本発明の別の実施形態を示す。線源080は、基板1000、および、完全に真空チャンバ020内に取り付けられた複数のX線サブ線源700を含む周期的パターンを含むターゲット100も有する。前のように、この実施形態は、高電圧源010も備え、高電圧源010は、導線021-Aを介して電子放出器011-Aに接続された負極も有するが、正極は、1または複数の導線022を介してターゲットにおける複数の微細構造に接続され、それらがアノードとして機能することを可能にする。

30

【0124】

しかしながら、この実施形態において、X線発生材料を含む複数のX線サブ線源700の周期的配列を有するターゲット100の表面は、真空チャンバ020の壁に取り付けられたウィンドウ040に面しており、電子放出器011-Aは、ウィンドウ040に面している複数のサブ線源700を有するターゲット100の表面上へ複数の電子のビーム111-Aを放出するように位置合わせされる。

40

【0125】

図22および図23は、基板1000を含むターゲット100、および、真空チャンバ020内に完全に取り付けられた複数のX線サブ線源700を含む周期的パターンを備える本発明の別の実施形態を示す。前のように、この実施形態は、高電圧源010も有し、高電圧源010は、導線021-Bを介して電子放出器011-Bに接続された負極も有するが、正極は、1または複数の導線022を介してターゲットにおける複数の微細構造に接続され、それらがアノードとして機能することを可能にする。

【0126】

50

しかしながら、この実施形態において、X線発生材料を含む複数のX線サブ線源700の周期的配列を有するターゲット100の表面は、複数の微細構造の一部によって発生するX線が、X線を同様に生成している他の複数の微細構造の方向へと伝搬し、複数の微細構造700からのX線888-Bの線状累積が、ターゲットから現れるように、方向付けられる。複数の微細構造と複数の微細構造700との間の距離 g は、ターゲットから現れる。複数の微細構造と伝搬方向における幅 w_x との間の距離 g は、累積したX線に寄与する n 番目の微細構造からの放出が、数式9の寸法 a 、すなわち：

【数10】

$$a \geq \tan \theta \cdot (n(g + w_x))$$

10

を有する単一サブ線源として考慮され得るように、十分に小さいべきである。ここで、 a は、システムの複数のコヒーレンス必要条件を満たすサブ線源寸法であり、 θ は、システムの視野角度の半分である。

【0127】

本発明のこの実施形態に使用されるようなX線源の線状累積は、本発明の発明者による「X-RAY SOURCES USING LINEAR ACCUMULATION」という名称の同時係属中の米国特許出願（2014年9月19日に出願された米国特許出願第14/490,672号）においてより完全に説明されており、それは、本明細書によってその全体が参照により組み込まれる。上記で参照された同時係属中の出願において開示された複数の線源設計および構成のいずれも、本明細書で開示される干渉イメージングシステムのいずれかまたは全てにおける構成要素として使用することが考慮されてもよい。

20

【0128】

同様に、図24および図25は、X線の線状累積を利用する本発明の別の実施形態を示す。この実施形態において、X線源080は、基板2210および真空チャンバ020内に完全に取り付けられた第1のセットのサブ線源707および第2のセットのサブ線源708を有するターゲット2200を含む。前のように、この実施形態は、高電圧源010も備えるが、この高電圧源は、導線021-Dおよび021-Eを介して、高電圧をそれぞれ2つの電子放出器011-Dおよび011-Eに供給する接点010-2に接続されている。図24および図25に示されるように、第1の電子放出器021-Dは、第1のセットのサブ線源707に衝突する電子ビーム111-Dを提供する一方、第2の電子放出器021-Eは、第2のセットのサブ線源708に衝突する電子ビーム111-Eを提供する。ターゲット2200からX線2888を生成すべく組み合わせられた、第1のセットのサブ線源707および第2のセットのサブ線源708によって、X線イメージングビーム軸に沿って発生したX線788の一部は、これらの2つのセットのX線サブ線源からのX線の線状累積によって拡張されるであろう。いくつかの実施形態において、2つのセットのサブ線源707および708の間の距離間隔は、5mmより小さくてよいが、2つのサブ線源の中央を通り抜けるラインに垂直な方向における線源のサイズより大きくてもよい。サブ線源707および708の両方の周期は、ビーム分割格子 G_1 の下流側の関連付けられる複数のTalbot縞が実質的に重なり合うように、選択されてよい。

30

40

【0129】

複数の電子によって衝突されているターゲット／アノードが、熱負荷を分散させるべく、動かされ、移動させられ、または回転させられるX線源を備える、本発明の複数の他の実施形態も可能であることも、当業者らには周知であろう。

【0130】

注記：図10から図25の例示は、縮尺通りに示されておらず、本発明の原則を示し、

50

複数の微細構造 700 と、ターゲット 100 と、様々な格子周期 p_1 および p_2 との間の特定の関係は示さないことを意味するものである。微細構造 700、701、707、708 等は、数ミクロンのオーダーのサイズであってよいが、調査中の対象物 240-M は、数センチメートルのサイズであってよい。同様に、これらは、数センチメートルのオーダーの寸法を有する対象物（マウス）が示される場合において、示されるものの、記載された技術は、そのような対象物に限定されないが、干渉計の検出器の適当な分解能および複数の他の要素が適切に構成される限り、さらにより大きい構造または微視的な構造を調査することにも使用されてよい。

【0131】

2. X線ターゲットの製造。

本明細書に開示された本発明による複数のX線源で使用するもの等のターゲットは、本発明の発明者による同時係属中の「STRUCTURED TARGETS FOR X-RAY GENERATION」という名称の米国特許出願（2014年8月21日に出願された米国特許出願第14/465,816号）に詳細に説明されており、その内容は本明細書によってその全体が参照により組み込まれた。上記の参照された同時係属中の出願に開示されたターゲット設計および構成のいずれも、本明細書で開示された任意のX線源または全てのX線源の構成要素としての使用が考慮され得る。

【0132】

本明細書および上記で引用された審査係属中の特許出願において記載されたように、X線源に使用されるターゲットは、複数のサブ線源の周期的配列を有してよい。各サブ線源は、その熱伝導率で選択された基板と熱的接触している、または好ましくはそれに埋め込まれたX線発生材料の単一のもしくは複数の微細構造を含んでもよい。微細構造が、高熱伝導率を有する基板と良好な熱的接触をしている場合、過剰な熱は、基板へ引き離されるであろうことから、より高い電流密度が使用され、X線を発生させてよい。より高い電流密度は、より高いX線フラックスを生じさせ、より高い輝度の線源をもたらすであろう。上記の同時係属中の特許出願において記載されたように、X線発生材料の複数の微細構造を有する線源は、同じ材料から作成されたより単純な構成よりも10倍高い輝度を有し得る。複数のサブ線源が同じ軸上のX線に寄与するように位置合わせされるさらなる複数の構成は、複数のX線サブ線源の線状累積を介して輝度をさらに増やすことができる。

【0133】

「微細構造」という単語が本明細書で使用される場合、X線発生材料を有する微細構造を特に参照していることも、ここで留意されるべきである。X線微細構造を形成するのに使用されるキャビティ等の他の構造は、同じ規模の寸法を有するので、これも「微細構造」と考慮されてよい。しかしながら、本明細書で使用されるように、「構造」、「キャビティ」、「穴」、「開口部」等の他の単語は、それらのX線発生特性のために選択されない基板等の材料にこれらが形成される場合に、これらの構造に使用されてよい。「微細構造」という単語は、これらのX線発生特性のために選択された材料を有する構造のためのものであろう。

【0134】

同様に、「微細構造」という単語が使用されるが、1ミクロンより小さい寸法を有する、またはナノスケールほどの小さな寸法（すなわち、10nmを超える）さえも有するX線発生構造も、複数の特性が、様々な実施形態において定められたサブ線源のサイズおよび格子ピッチのための幾何学的因子と一致している限り、本明細書で使用されるように、「微細構造」という単語によって記載され得ることに留意されるべきである。

【0135】

本明細書で、「サブ線源」という単語が使用される場合、それは、X線発生材料の単一の微細構造、または、Talbot干渉計の目的で単一の構造と同様に機能する複数のより小さい微細構造のアンサンブルを指してよいことにも留意されるべきである。

【0136】

これらの微細構造ターゲットの製造は、基板における埋め込み構造の作成のために使用

10

20

30

40

50

される複数のよく知られた処理段階に従ってよい。基板が、ダイヤモンド等の高熱伝導率を有する材料である場合、フォトレジストを用いた集束イオンビームリソグラフィまたは電子ビームリソグラフィ等の従来のリソグラフィパターンニングは、ミクロンサイズの構造を生成し得、それは、次に、反応性イオンエッチング（R J E）等の複数のプロセスを用いて基板内にエッチングされてよい。基板に形成されたエッチングされた構造内にX線発生材料を堆積させることが、次に、電気めっき、化学気相堆積法（C V D）、原子層堆積、または高温圧縮等の標準的な堆積工程を用いて実行されてよい。

【0137】

ターゲットにおいて使用されるX線発生材料は、線源にかかるより高い電子パワーがX線生成を増加させることを可能にすべく、高融点および高熱伝導率等の、理想的に良好な熱特性を有するべきである。X線発生材料は、さらに、X線生成効率（その原子番号に比例する）を含む、良好なX線生成特性のために選択されるべきであり、場合によっては、特性X線分光線等の対象の特定のスペクトルを生成することが望ましくてよい。これらの理由により、ターゲットは、しばしば、原子番号 $Z=74$ を有するタングステンを用いて製造される。表Iは、X線ターゲットに一般に使用される数個の材料、数個のさらなる潜在的ターゲット材料（特定の対象の特性ラインに特に有用である）、およびターゲット材料のために基板として使用され得るいくつかの材料を列挙する。融点、ならびに熱的および導電率が、 300°K （ 27°C ）近くの複数の値について示される。ほぼ全ての値は、CRC Handbook of Chemistry and Physics第90版[CRC Press、Boca Raton、フロリダ州、2009年]から引用されている。表I 様々なターゲットおよび基板材料および選択された特性。

10

20

【表 1】

材料(基本記号)	原子 番号 Z	融点℃ (1 atm)	熱伝導率(W/(m℃))	導電率(MS/m)
一般的なターゲット材：				
クロム(Cr)	24	1907	93.7	7.9
鉄(Fe)	26	1538	80.2	10.0
コバルト(Co)	27	1495	100	17.9
銅(Cu)	29	1085	401	58.0
モリブデン(Mo)	42	2623	138	18.1
銀(Ag)	47	962	429	61.4
タングステン(W)	74	3422	174	18.4
他の潜在的なターゲット材：				
チタン(Ti)	22	1668	21.9	2.6
ガリウム(Ga)	25	30	40.6	7.4
ロジウム(Rh)	35	1964	150	23.3
インジウム(In)	45	157	81.6	12.5
セシウム(Cs)	49	28	35.9	4.8
レニウム(Re)	55	3185	47.9	5.8
金(Au)	75	1064	317	44.0
鉛(Pb)	82	327	35.3	4.7
低い原子番号を有する他の潜在的な基板材料				
ベリリウム(Be)	4	1287	200	26.6
炭素(C)：ダイヤモンド	6	*	2300	10 ⁻¹⁹
炭素(C)：グラファイト	6	*	1950	0.25
炭素(C)：ナノチューブ(SWNT)	6	*	3180	100.0
炭素(C)：ナノチューブ(バルク)	6	*	200	
窒化ホウ素(BN)	B=5 N=7	**	20	10 ⁻¹⁷
シリコン(Si)	14	1414	124	1.56×10 ⁻⁹
炭化シリコン(β-SiC)	Si=14 C=6	2798	0.49	10 ⁻⁹
サファイア(Al ₂ O ₃) C	Al=13 O=8	2053	32.5	10 ⁻²⁰
*炭素は、1atm で融解せず、～3600℃で昇華する。				
**BN は、1atm で融解せず、～2973℃で昇華する。				

他の複数の値は、インターネット上に見られる様々なソースから引用されている。例えば、サファイア等、いくつかの材料では、液体窒素の温度（77 ° K）未満の温度に冷却される場合、1桁大きい熱伝導率が可能であり得ることに留意されたい〔例えば、E. R. Dobrovinskaya他著、「Sapphire: Material, Manufacturing, Applications」、Springer Science

＋ Business Media, LLC 刊 (2009 年) の 2. 1. 5 章「熱特性」を参照】。

【0138】

図 26 は、本発明のいくつかの実施形態において使用され得るようなターゲットを示す。この図において、基板 1000 は、X 線発生材料（典型的には、金属材料）の複数の微細構造を有する複数のサブ線源 700 の配列を含む領域 1001 を有し、X 線発生材料において、複数のサブ線源は、複数の直角長方プリズムの規則的配列において配置されている。真空において、複数の電子 111 は、上からターゲットを照射し、複数の微細構造 700 に熱及び X 線を発生させる。基板 1000 における材料は、それが、X 線発生微細構造材料と比較して複数の電子に対し比較的低い X 線生成（効率は、原子番号に比例する）およびエネルギー堆積速度（停止パワーは、密度に比例する）を有するように選択される。従って、それは、かなりの熱量および X 線は生成しないであろう。これは、通常、基板に対し、低質量密度および低原子番号（Z）材料を選択することで実現される。

10

【0139】

基板 1000 の材料は、通常、 $100\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ より大きい高熱伝導率を有するように選択されてもよく、微細構造は、通常、基板内に埋め込まれている。すなわち、微細構造が直角プリズムとして形成されている場合、微細構造 700 において発生した熱が基板 1000 へ効果的に放散されるように、6 個の側面のうち少なくとも 5 個が基板 1000 と密接に熱的接触していることが好ましい。しかしながら、他の複数の実施形態において使用されたターゲットは、より少ない直接接触の表面を有してよい。一般に、「埋め込み」という用語が本開示で使用される場合、微細構造の表面積の少なくとも半分は、基板と密接に熱的接触しているであろう。

20

【0140】

いくつかの実施形態における複数のサブ線源のサイズおよび寸法は、従来技術における格子 G_0 の周期性 p_0 と同じ限定によって制約されてよいことに留意されたい。言い換えれば、図 9 から図 25 に示されるような X 線干渉イメージングシステムにおける対象物位置で達成可能な空間分解能は、Talbot-Lau システム等の従来技術の干渉イメージングシステムにおいて記載された複数の条件に類似した全体的な X 線源のサイズおよび検出解像度によって決定される。従って、最大の X 線源サイズ（各微細構造スポットの幅）は、所与の検出解像度および所与のイメージング形状について限定され、線源と対象物との間の距離、および対象物と検出器との間の距離によって決定される。

30

【0141】

複数のサブ線源の配列のライン・ツー・スペース比は、任意のシステムの設計において考慮されるべきである設計パラメータである。長い空間コヒーレンス長は、X 線源またはサブ線源のサイズに反比例する。Talbot 干渉縞の縞の可視性は、照明 X 線ビームの空間コヒーレンス長の、ビーム分割格子 p_1 の周期に対する相対比と共に、0.3 から 1 までの比の値では線状的に増加するので、小さい線源のサイズを有することが概して好ましい。しかしながら、X 線生成は、サブ線源の領域に反比例する（例えば、線幅の減少は、X 線生成の低下に至るであろう）。イメージングシステムのスループットは、コントラスト伝達関数の二乗に概して比例し、X 線フラックスに比例するだけであるので、1:1 未満のライン・ツー・スペース比を有することが概して好ましい。本発明のいくつかの実施形態は、1:5 から 1:2 までの間のライン・ツー・スペース（すなわち、X 線発生材料の基板材料に対する）比を使用してよい（すなわち、X 線発生材料の相対領域は、20% から 33% までの範囲に及んでよい）。

40

【0142】

本発明による複数のターゲットのための材料の選択に有用であり得るフィギュア・オブ・メリット (FOM) は、複数の微細構造によって生成される X 線の、同様に基板に衝突する複数の電子によって生成される X 線に対する割合である。このフィギュア・オブ・メリットは、システムの複数のターゲットの設計およびそのための材料の選択に有用であり得、基板の熱伝導率に加えて考慮に入れるべきである。電子エネルギー堆積速度は、質量

50

密度に比例し、材料におけるX線生成効率、原子番号に比例するので、このフィギュア・オブ・メリットは、以下のように定義されてよい：

【数 1 1】

$$FOM = \frac{Z_2 \times \rho_2}{Z_1 \times \rho_1}$$

ここで、Zは原子番号であり、ρは密度であり、材料1は基板であり、材料2はX線発生材料である。

表 I I：X線材料／基板の組み合わせについてのフィギュア・オブ・メリット
【表 2】

基板材料			微細構造材料			フィギュアオブメリット
材料	原子番号 Z ₁	質量密度 (g/cm ³)	材料	原子番号 Z ₂	質量密度 (g/cm ³)	$\frac{Z_2 \times \rho_2}{Z_1 \times \rho_1}$
SiC	12.55	3.21	Cu	29	8.96	6
Si	14	2.33	Cu	29	8.96	8
SiC	12.55	3.21	Mo	42	10.2	11
ダイヤモンド	6	3.5	Cu	29	8.96	12
Si	14	2.33	Mo	42	10.2	13
ダイヤモンド	6	3.5	Mo	42	10.2	21
SiC	12.55	3.21	W	74	19.25	35
Be	4	1.85	Cu	29	8.96	35
Si	14	2.33	W	74	19.25	44
Be	4	1.85	Mo	42	10.2	59
ダイヤモンド	6	3.5	W	74	19.25	68
Be	4	1.85	W	74	19.25	193

【0 1 4 3】

多数の微細構造および基板材料の組み合わせが、上記の表 I Iにおいて列挙される。上記の複数の組み合わせのいずれが使用されてもよいが、材料は、FOMが12を超え、基

板材料の熱伝導率が室温において100W/m℃を超えるように選択されることが好ましい。

【0144】

図27は、本発明のいくつかの実施形態において使用され得るような別のターゲットを示しており、ここで電子ビーム111-Fは、静電レンズによって方向付けられ、より集中した集束スポットを形成する。この状況では、ターゲット1100-FはX線材料を含む微細構造700-Fの配列を含む領域1001-Fをまだおそらく有しているが、この領域1001-Fのサイズおよび寸法は、電子照射が生じる領域に合致し得る。これらのターゲットにおいて、線源形状およびX線発生材料の「調整」は、設計によって、発生する熱量を微細構造領域1001-Fにほとんど制限する一方で、設計および製造の複雑さも低減するように制御され得る。これは、微小スポットを形成すべく焦点が合わせられた電子ビームとともに使用される場合、またはより複雑な電子照射パターンを形成するより複雑なシステムによって用いられるときに、特に有用であり得る。

10

【0145】

材料への複数の電子の侵入の深さは、ポットの法則（Pott's Law）[P. J. Potts 著、1987年、Springer Netherlands 刊、「A Handbook of Silicate Rock Analysis」、第10章「Electron Probe Microanalysis」、336ページ]によって推定され得、それによると、ミクロン単位の侵入深さxは、keV単位の電子エネルギー E_0 を3/2乗して、材料密度で割った値の10%に関連付けられていることが述べられている。

20

【数12】

$$x(\mu\text{m}) = 0.1 \times \frac{E_0^{1.5}}{\rho}$$

ダイヤモンド基板等の、より密度が低い材料に対して、侵入深さは、X線発生に使用される元素を含むほぼ全ての材料等、より高い密度の材料に対してよりはるかに大きくなる。

30

【0146】

この式を用いて、表IIIは、いくつかの一般的なX線ターゲット材料に対する推定侵入深さの一部を示す。

表III：60keV電子のいくつかの材料への侵入深さの推定

【表3】

材料	Z	密度 (g/cm ³)	侵入深さ (μm)
ダイヤモンド	6	3.5	13.28
銅	29	8.96	5.19
モリブデン	42	10.28	4.52
タングステン	74	19.25	2.41

40

【0147】

50

Cuの特性X線（K線）の大部分は、侵入深さ内で発生する。その深さ以下での電子の相互作用は、通常、ほとんど特性X線（K線）を発生させないが、熱発生におそらく寄与し、これにより、深さ方向に沿って緩やかな温度勾配をもたらす。従って、いくつかの実施形態において、材料における電子相互作用を制限し、局所的な温度勾配を最適化すべく、ターゲットにおける微細構造の最大厚みを定めることが好ましい。本発明の一実施形態は、ターゲットにおける微細構造のX線発生材料の深さを、入射電子エネルギーにおいて、基板における電子侵入深さの3分の1と3分の2との間に制限する。この場合、より低い質量密度の基板は、X線発生材料の直ぐ下の基板材料に、より低いエネルギー堆積速度をもたらす、これは次に、下の基板材料により低い温度をもたらす。これにより、X線発生材料と基板との間に、より大きい温度勾配がもたらされ、熱伝導を高める。温度勾配は、基板材料の高熱伝導率によってさらに拡大される。

10

【0148】

複数の同様の理由で、微細構造の厚みを基板における電子侵入深さの半分未満であるように選択することも、制動放射線の効率的な発生に対し、概して好ましく、それは、その深さより下の複数の電子が、より低いエネルギーを有し、従ってより低いX線生成効率を有するからである。

【0149】

注記：X線発生材料の寸法の他の選択肢も使用され得る。本発明のいくつかの実施形態において使用されるようなターゲットでは、X線材料の深さは、基板における電子侵入深さの50%であるように選択されてよい。他の複数の実施形態において、X線材料の深さは、基板における電子侵入深さの33%であるように選択されてもよい。他の複数の実施形態において、微細構造の深さは、材料における複数の電子の「連続減速近似」（CSDA）範囲に関連して選択されてよい。他の深さが、所望されるX線スペクトルおよび選択されたX線材料の特性に応じて特定されてもよい。

20

【0150】

図28A～図28Cは、本発明のいくつかの実施形態において使用され得るような、規則的配列構造に配置されたX線発生材料を含む直角長方プリズムの形の微細構造を有する複数のサブ線源700の配列を備える、ターゲットの領域1001を示す。図28Aは、このターゲット用の16個の微細構造700の斜視図を示す一方、図28Bは同じ領域の上面図を示し、図28Cは同じ領域の側面／断面図を示す。（本開示における「側面／断面図」という用語に対して、意味される図は、対象物の断面が作成され、次に横側から断面の表面の方向を見たような図である。この図は、断面部分の詳細、並びに基板自体が透明であると仮定した場合に（ダイヤモンドの場合に、概して可視光に当てはまる）、横側から見られ得た材料のさらに内部の両方を示している）。

30

【0151】

これらのターゲットにおいて、複数の微細構造は6個の側面のうち5つで基板と密接に熱的接触をするように、製造されている。示されるように、微細構造700の上部は、基板の表面と同一平面を成すが、微細構造が凹所にある他のターゲットが製造されてよく、さらに複数の微細構造が基板の表面に対して局所的な「バンプ」を示す他のターゲットが製造されてもよい。

40

【0152】

本発明のいくつかの実施形態において使用され得るような代替的なターゲットは、基板の表面上に単に堆積された複数の直角長方プリズムの数個の微細構造を有し得る。この場合、プリズムの底面だけが、基板と熱的接触をし得る。図28Cに示されるような側面／断面図で、深さ D_z および基板の面における横寸法 W_x および W_y を有して基板に埋め込まれた微細構造を有する構造の場合、基板と接触する合計の表面積の、埋め込み微細構造の堆積微細構造に対する比率は、次の式で表される。

【数 1 3】

$$\frac{A_{Embedded}}{A_{Deposited}} = 1 + 2D \frac{(W + L)}{(W \times L)}$$

WおよびLに対してDの値が小さい場合、比率は実質的に1になる。厚みが大きくなると比率も大きくなり、等しい5個の側面が熱的接触をする立方体（D=W=L）では、その比率は5である。質量密度および熱伝導率に関して基板と類似の特性を有する材料のキャップ層が使用される場合、比は6まで増加し得る。

10

【0153】

図29A～図29Cは、図13で前に示されたもの等、本発明のいくつかの実施形態において使用されてよいターゲットの領域1001を示し、それは、規則的配列において配置されたX線発生材料を有する複数の直角長方プリズムの形の微細構造を有する線状サブ線源701の配列を備える。図29A～図29Cは、このターゲットの3つの微細構造701の斜視図を示す一方、図29Bは、同じ領域の上面図を示し、図29Cは、同じ領域の側面／断面図を示す。

【0154】

20

この実施形態において、基板の面における複数の横寸法は、 W_x および L_y である幅および長さである。効果的なサブ線源のサイズは、幅 W_x に対応するであろう。

【0155】

図30および図31は、図28A～図28Cおよび図29A～図29Cに示されたもの等、複数のターゲットを形成することにおいて生じ得る実用的な課題を示す。図30は、図28A～図28Cに示されるようなX線発生微細構造700の格子で可能な複数の変形例を示し、図31は、図29A～図29Cに示されるような線状X線発生微細構造701で可能な複数の変形例を示す。

【0156】

図30において、他の複数の幾何学的形状の特殊な形の微細構造700-Aが形成されてよい。同様に、複数の隙間700-Oも、特定の構造が予想され得る箇所に現れてよい。例えば、X線発生材料の前形成された粒子を用いる堆積といった他の堆積工程は、複数の電子で衝突させられた場合、複数の粒子700-Cの複数のアンサンブルクラスタを生成してよく、一様構造によって生成されるそれらの機能と類似したX線サブ線源として、さらに機能し得る。図30においてまた示されるのは、複数の結晶構造および複数の粒子境界700-Gを有する微細構造であり、それは、この場合も、一様構造によって生成されるX線に類似したX線をまだ生成し得るが、微細構造のアンサンブルを有するとみなされ得る。

30

【0157】

全てのこれらの状況において効果的なX線サブ線源サイズは、たとえ微細構造がかなり小さい複数の粒子を有するとしても、サイズパラメータaを用いて近似され得る。

40

【0158】

図31において、線状微細構造701を製造する場合に生じ得るような微細構造のアンサンブルの複数の例が示される。均一である事前に製造されたX線発生材料の複数の粒子が生成され、基板上へコーティングされる場合、X線発生材料の複数の粒子703のアンサンブルが形成され得る。他の工程において、不均一な複数の粒子が使用される場合、複数の粒子704-Aおよび704-Bのクラスタが、場合によっては複数の隙間の間隙を含み得る不均一な分散と共に形成され得る。他の工程において、X線発生材料の複数の粒子704のアンサンブルは、線状のX線源を近似し得る。

【0159】

50

これらのアンサンブルの全ては、複数の電子で衝突させられた場合、均一の線状構造によって生成されるものと機能が類似した複数のサブX線源としてまだ機能し得る。これらの状況において効果的な線源のサイズは、たとえ微細構造がかなり小さい複数の粒子を有するとしても、サイズパラメータ a を用いて近似され得る。

【0160】

電子衝突中に生じ得る熱伝導は、図32において複数の代表的な矢印で示され、図32において、基板1000に埋め込まれた複数のサブ線源700において発生する熱は、底部および複数の側面を介して複数のサブ線源700を有する微細構造から外へ伝えられる（複数の側面を介して図面の面から外へ伝達するための矢印は、示されていない）。面積 A 、厚み d の材料を介して伝達される単位時間当たりの伝熱量（ ΔQ ）は、次の式で与えられる：

10

【数14】

$$\Delta Q = \frac{\kappa \cdot A \cdot \Delta T}{d}$$

ここで、 κ は、熱伝導率（ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ）であり、 ΔT は、厚み d を横切る温度差（ $^\circ C$ ）である。従って、表面積 A における増加、厚み d における低下、および ΔT における増加は全て、熱伝導の比例的増加につながる。

20

【0161】

代替的实施形態が、図33に例示されており、ここで基板は冷却経路1200をさらに有する。そのような冷却経路は、上述されたように、基板から熱を奪うための水または何らかの他の冷却流体を用いた従来技術の冷却経路であってよく、または埋め込み微細構造700の近くの複数の領域から熱を最良に除去するように適応された設計に従って製造されてもよい。

【0162】

様々な実施形態の他の複数のターゲット構造が、当業者らによって理解され得るか、または考案されてよく、そこで、例えば基板は、熱の伝達を向上させるために銅ブロック等のヒートシンクに結合され得る。次に銅ブロックもその中に、ブロックから熱を奪うのに役立つ複数の冷却経路を有し得る。代替的に、基板は、熱電冷却器に取り付けられてよく、電圧がその中の特別に構成された半導体デバイスに印可される。これらのデバイスにおいて、電流の流れは、一方の側を冷却させるが、他方の側を加熱させる。ペルチェ冷却器等の市販のデバイスは、デバイス全体にわたって最大 $70^\circ C$ の温度差を生成し得るが、熱源から大量の熱を除去するそれらの全体的な能力には限界があり得る。蒸発し、凝固する熱伝導流体を含む複数の熱パイプが、小型設計が考慮される場合にサーバ・ファームにおいてCPUチップを冷却するのに使用されるように、基板を冷却するのに使用され得る。

30

【0163】

代替的に、基板は、液体窒素が流れるための複数の経路を含むブロック等の極低温冷却器に取り付けられるか、または、液体窒素の容器もしくは不凍液等の何らかの他の極低温物質と熱的接触をして、より強い冷却を供給し得る。基板が、ダイヤモンド、サファイア、ケイ素、または炭化ケイ素等の材料を有する場合、熱伝導率は概して、室温から温度が減少するとともに増加する。そのような場合において、これらのより低い温度に冷却することに耐え得るように、ターゲットを設計することが好ましくてよい。

40

【0164】

図34は、複数の微細構造700を形成するX線発生材料を埋め込む前に、基板1000に形成された複数のキャビティが、（好ましくは最小の厚みの）密着層715で最初にコーティングされる、本発明の複数の実施形態において使用され得るターゲットの代替例

50

を示す。そのような密着層は、X線材料と基板材料との間の結合が弱い場合に適切であり得る。密着層は、2つの材料の熱膨張係数間の差異が大きい場合に、バッファ層としての機能も果たし得る。いくつかの材料の選択では、材料が複数の微細構造から基板材料へ（またはその逆に）拡散するのを防止すべく、密着層が拡散障壁層に置き換えられ得るか、または（別の層を加えることによって）拡大され得る。密着層および／または拡散障壁層が使用される複数の実施形態では、複数の微細構造700から基板1000への熱の流れが密着層715の存在によって著しく妨げられたり絶縁されたりしないように、材料および厚みの選択は層の熱特性も考慮すべきである。

【0165】

図35は、導電層725がターゲットの表面に加えられた実施形態において使用され得るターゲットの代替例を示す。複数の電子によって衝突させられた場合、過剰な電荷は、ターゲットがアノードとして効果的に機能するための接地に戻る経路を必要とする。図28A～図29Cに示されたようなターゲットが、離散した未接続の複数の微細構造700だけを、電気的に絶縁された基板材料（ドープされていないダイヤモンド等）内に有し、継続する電子衝突下にあった場合、大きな電荷が表面上に蓄積され得る。さらにカソードからの複数の電子は、ひいては、同じエネルギーを有するターゲットと衝突しないか、または反発さえされ、X線の発生を減少させ得る。

【0166】

これは、アルミニウム（Al）、ベリリウム（Be）、炭素（C）、クロム（Cr）、またはチタン（Ti）等の比較的低い原子番号を有することが好ましい導電性材料の薄い層を堆積させることによって対処され得、これにより、複数の離散的微細構造700から、高電圧供給源に対して正極に接続する電気経路722への電気伝導が可能となり得る。実際には、この端子は、典型的にシステムの電気接地であるが、カソードの電子源には負の高電圧が供給されている。

【0167】

図36は、複数のサブ線源702が基板1000内により深く埋め込まれるか、または埋設された、本発明の実施形態に使用され得るターゲットの別の例を示す。そのような埋め込み微細構造は、例えばダイヤモンドであってもよいさらなる層1010の堆積によってさらに覆われ得、基板と同じ熱伝導特性を提供し得る。これにより、埋設されたサブ線源702の全ての側面から、熱が放散されることが可能となる。そのような状況で、かつさらなる層1010が十分な導電率を有さない場合、その構造上に入射する電子のために接地への経路722を提供することが望ましく、それはさらなる層1010を堆積させる前に設けられた埋め込み導電層726の形であってよい。いくつかの実施形態において、この導電層726は、埋め込み導電層726を、ターゲット表面上のさらなる導電層728に連結するための導電性構造を提供する「ビア」727、または鉛直方向の接続を、多くの場合、ピラーまたは円柱の形でおそらく有し、次にさらなる導電層728は、接地への経路722または高電圧供給源に接続される。

【0168】

図37は、複数のサブ線源702がこの場合も基板内に埋設された、本発明の複数の実施形態において使用され得るターゲットの別の例を示す。しかしながら、この実施形態では、最初に導電層を設け、その後さらなるキャップ層を堆積させる代わりに、電気特性と熱伝導特性との組み合わせのために選択された単層770のみが、この実施形態において堆積させられる。これは、例えば、表面に対して鉛直に配置されたカーボンナノチューブ（Z=6）の堆積であってもよく、そうすることで、それらは、複数の埋設微細構造702から熱および電子の両方を放散させる。次に、この単層770は接地への経路722に接続されて、ターゲットがX線発生システムのアノードとして機能することを可能にし得る。代替的に、層770の材料は、アルミニウム（Al）、ベリリウム（Be）、クロム（Cr）、または銅（Cu）を有するように選択されてよい。

【0169】

図38は、遮断材料729のさらなる複数のパターンが、ターゲット基板1000の裏

10

20

30

40

50

面上に堆積させられた、実施形態の別の変形例を示す。選択された材料の組み合わせについてのフィギュア・オブ・メリットが、表 I I において上述されたように、大きくない場合、画像のコントラストを低減するであろう基板によって発生したかなりの X 線がまだあり得る。これらの基板発生 X 線は、遮断構造 7 2 9 としての、金等の適当な材料の堆積によって阻止され得る。金 ($Z = 79$) は、図 3 9 に示されるように、強い X 線吸収を有する。これらの遮断構造を堆積させる複数のプロセスは、標準的な堆積プロセスを有してよく、位置合わせ工程が、対向する側における X 線発生構造との位置合わせを確実にすべく、必要とされてもよい。

【0170】

複数の実施形態が、図 2 6 ~ 図 3 8 に別個に示され、これらを製造する様々な工程が後に示されるが、これらの実施形態の複数の要素は、互いに組み合わせられ得るか、または当該分野で知られている他の一般に知られている複数のターゲット製造方法と組み合わせられ得ることが、当業者には明らかであろう。例えば、図 3 7 の埋設された複数のサブ線源 7 0 2 は、図 3 0 および図 3 1 に示されたような微細構造の複数の粒子も有してもよい。同様に、図 3 4 に示されたような密着層 7 1 5 は、図 3 5 に示されたような複数の埋め込みサブ線源 7 0 0 の製造に適用されてもよい。これらの代替例の分離は例示のみを目的としており、任意の特定の工程を限定することを意味するものではない。

【0171】

図 2 6 ~ 図 3 8 に示される複数のサブ線源は、均一のサイズおよび形状を有する複数の規則的間隔のパターンとして示されたが、不均一のサイズおよび形状を有する複数のサブ線源の正方パターンも本発明のいくつかの実施形態において使用されてもよい。さらに、規則的な周期的パターン内の各サブ線源は、さらに、不均一なサイズおよび形状の複数のより小さい微細構造を有してもよい。これらのより小さい微細構造は、不規則的であってよく、複数の微細構造の各群が有する大型サブ線源が、本質的に周期的である限り、類似の X 線放出特性または強度を必ずしも有する必要はない。

【0172】

同様に、いくつかの実施形態は、例えば、直角長方プリズムの形状の微細構造で説明されたが、複数の製造プロセスは、使用される特定のプロセスの製品に応じて、 90° 以外の角度で壁を有するか、または正確に直角の角部を有するのではなく、丸められ得るか、面取りされ得るか、またはアンダーカットされ得る複数の構造を形成し得る。複数の微細構造が本明細書で説明された形状と実質的に類似する複数の実施形態は、たとえ複数のプロセス製品が、例示された、または説明されたような形状からいくらかの逸脱をもたらすとしても、開示されているものとして当業者らによって理解されるであろう。

【0173】

システムの他の複数の実施形態において、従来技術の Talbot - Lau 干渉計において使用されるもの等の周期的減衰格子 G_0 も本発明の線源と併せて使用されてよい。そうすることで、複数のサブ線源の周囲の基板材料によって発生する X 線がさらに減衰し、線源のより高い単色性および従ってより高い空間的コヒーレンスを可能にする。格子の複数の開口部は、複数の微細構造の X 線サブ線源の投影と一致すべきであり、またはいくつかの実施形態において、線源の下流側の Talbot 分数もしくは整数距離において、線源の自己像と一致する複数の開口部と共に配置され得る。格子 G_0 は、製造性を容易にするため、高い原子番号および比較的低いアスペクト比を有するのが好ましい。

【0174】

3. さらに実施形態

3. 1. さらに吸収グリッド

複数のさらなる実施形態は、さらなる吸収グリッドを有してよく、機能および配置は、散乱した放射（イメージングシステムの分解能より実質的に小さい寸法を有する複数の微細構造からのコンプトン散乱および弾性散乱等）を低減するように設計される。そのグリッドは、上述の様々な実施形態または様々な X 線吸収イメージング技術を含む、X 線イメージングにおける背景および多くの X 線イメージング技術における画像コントラストの減

少に寄与する。複数の画像を形成する一次放射線の強度に対する散乱放射線の強度の比は、例えば、照射されている大量の組織を伴うものおよび高エネルギーX線を必要とするものといった大量な散乱が生成される場合にイメージング検査に特に重要であり、従って肥満の患者または（例えば、頭顔、高密度の胸部組織等）複数の高密度の体部分に対する病気の診断の有効性を限定する。散乱防止用グリッドにおける現在の技術は、通常、高い放射透過を有する媒体（アルミニウムまたはファイバー材料等）と組み合わされる（通常、鉛のような高いZの材料を用いて製造される）高放射吸収隔壁を有する。それは、グリッド比（複数の構造の高さとそれらの間の間隔との比）、周期、および隔壁幅によって通常特定される。しかしながら、散乱防止用グリッドの使用は、1次ビームの何分の1もが複数の隔壁によって減衰させられるので、患者へのより高い放射線暴露を必要とする。

10

【0175】

既存の散乱防止用グリッドの一般的な欠点は、複数の隔壁が、対象物を介して透過する有用な一次X線も吸収し、画像信号の望ましくない減少をもたらす、従って試料または患者に対して増加した放射線量をもたらすことである。

【0176】

本発明の複数の実施形態は、上記で前に開示されたように、Talbot効果を使用するように設計された具体的なイメージング設定によって決定される複数の隔壁のパターンを有する散乱防止用グリッドの使用によっても拡張し得る。本発明の一実施形態は、ビーム分割格子 G_1 と検出器との間に配置された散乱防止用グリッドを有する。グリッド間隔の周期および位置は、複数の隔壁が、Talbotカーペットの複数のノードであるべき位置にあるように決定されてよい。散乱防止用グリッドは、好ましくは、一次放射線の効率的な透過を許可する間に、散乱した放射線を吸収し、背景ノイズの減少および画像コントラストの増加をもたらす。散乱防止用グリッドは、隔壁に対し単純な1-D構造を有してよいが、使用されることが意図される、Talbot干渉パターンに調整された2-D構造もしくは3-D構造さえも有するように設計されてよい。

20

【0177】

散乱防止用グリッドを組み込む本発明の実施形態の例示は、図40に示されている。本開示に示される複数の他の実施形態と同様に、X線888は、電子ビーム111が衝突すると、X線発生材料を含む微細構造領域700から発せられる。発せられたX線は、この場合マウス240-Mである試料を介して透過させられ、透過したX線は検出器290において検出される。しかしながら、マウス240-Mを通り抜けることにおいて、コンプトン散乱および他の望ましくない散乱現象が生じ得、多くの異なる角度において伝搬し得、吸収画像コントラストを低減し得るX線889-Cを生成する。

30

【0178】

散乱防止用グリッド420の挿入は、画像形成に寄与するX線の大部分を通る間、散乱したX線を減衰させることを援助する。本明細書で、 G_4 として示された散乱防止用グリッド420は G_1 として示されるビーム分割格子210からの距離 D_a において配置される。散乱防止用グリッド420は、通常、X線にほとんど透明である材料（アルミニウムまたはカーボンファイバー材料等）から作成される基板422を有するであろう。金、スズ、白金、タングステン、タンタル、ニッケル、鉛、銅、ガドリニウムまたは何らかの他の高いZの材料等のX線を吸収する材料を含む多数の吸収構造424が、周期的な様式でその上に配置された。吸収構造424の厚みは、X線イメージングエネルギーによって決定され、それは次に、例えば、40 keVにおける幼児のイメージング用の応用によって決定され、そのような構造の厚みは、鉛に対し数百ミクロンのオーダーであってよい。いくつかの実施形態において、基板および吸収構造は両方とも、高いZの材料の単一のウェハまたはブロックから製造されてよい。複数の吸収構造424の間隔は、空気のみを有し得るか、またはその中で堆積した別の低いZの材料を有し得る。そのような複数の実施形態において、ビーム分割格子 G_1 からの距離 D_a は、その位置が分数のTalbot距離の1つにあるように設定されるであろう。すなわち、

40

【数 1 5】

$$D_{\alpha} = D_N = N \frac{p_1^2}{8\lambda} = \frac{N}{16} D_T$$

ここで、 D_N は、平面波照明に対する分数の T a l b o t 距離であり、 λ は、平均 X 線波長であり、 N は、T a l b o t 分数次数として称される。

【0 1 7 9】

10

散乱防止用グリッドにおける構造の周期は、

【数 1 6】

$$p_4 = K p_0 \frac{D_{\alpha}}{L}$$

であると設定されてよい。ここで、 p_0 は、微細構造の線源の周期であり、 L は、複数の X 線源 7 0 0 とビーム分割格子 2 1 0 との間の距離であり、 K は、ビーム分割格子が π / 2 の位相シフトを導入する場合に 1 に等しく、ビーム分割格子が π の位相シフトを導入する場合に 1 / 2 に等しい倍率である。

20

【0 1 8 0】

散乱防止用グリッドは、1 - D 格子または 2 - D 格子であってよく、 x および y 軸における周期は、上記の式 1 6 を用いて、ビーム分割格子において対応する（例えば、水平および鉛直方向）周期と対応する。いくつかの実施形態において、複数の吸収線は、 $> 5 : 1$ のアスペクト比、すなわち、複数の特徴部は特徴部間の間隙の幅より 5 倍以上高く配置され、複数の吸収領域の垂直入射透過は 1 0 % 未満となるであろう。複数の隔壁は、隔壁の領域の合計の領域に対する比が、2 0 ~ 5 0 % の範囲に及ぶように設計されてよい。位置は、複数の散乱防止用の隔壁が、ビーム分割格子 2 1 0 によって形成される複数の干渉縞と位置合わせされることを可能にし得るコントローラ 4 2 5 によって制御され得る。その位置は、複数の散乱防止用の隔壁が、ビーム分割格子 2 1 0 によって形成された複数の干渉縞と位置合わせされることを可能にし得るコントローラ 4 2 5 によって制御され得る。

30

【0 1 8 1】

散乱した X 線の一部は、角度を成して、散乱防止用グリッドの複数の開口部を通して透過することを可能にする複数の方向にさらに伝搬してよい。しかしながら、複数の吸収構造が、T a l b o t 縞パターンの複数のノードと共に配置されるように散乱防止用グリッドを配置することによって、散乱した X 線の 5 0 % から 7 5 % またはそれ以上が吸収され得るが、その一方で、T a l b o t 縞パターンのほぼ 1 0 0 % は透過される。いくつかの実施形態において、複数の吸収構造は、各ノードに合致されないが、代わりに、複数のノードの整数倍と合致させられてよい。

40

【0 1 8 2】

散乱した X 線のさらなる減少は、第 2 の散乱防止用グリッドを含むことによって実現され得る。これの第 2 のグリッドは、第 1 の散乱防止用の格子の極めて近くと同じ T a l b o t 距離において配置され得、複数の特徴部の吸収およびアスペクト比を効果的に増加させるか、またはそれは、複数の前の実施形態において議論されたような同じ設計考慮を用いて別の T a l b o t 距離において位置付けられてもよい。

【0 1 8 3】

図 4 1 は、位相格子の T a l b o t 画像における 2 つの散乱防止用グリッドの配置を示

50

す。示されるようなTalbotパターンは、BIOMEDICAL MATHEMATICS: Promising Directions in Imaging, The rapy Planning, and Inverse Problems (Medical Physics Publishing, ウィスコンシン州、マディソン、2010年)の第281～320頁のA. Momose他による「X-Ray Phase Imaging with Talbot Interferometry」等の参考文献で前に示されているように、1:1の $\pi/2$ 位相格子に対応する。

【0184】

試料を介して透過するX線889は、左から入り、1:1の $\pi/2$ 位相格子210の上へと落ちる。空間的にコヒーレントな照明下で、格子は、前の実施形態で議論されたように、Talbotカーペットを生成する。第3の分数のTalbot距離($N=3$)において、吸収格子420は、図41のX線遮断材料を意味する一式の白いボックスによって指定された複数の吸収線が、Talbotカーペットの複数のノードと位置合わせされるように、配置され、位置付けられる。第5の分数のTalbot距離($N=5$)で、別の吸収格子430が、図41のX線遮断材料を意味する一式の白いボックスによって指定された複数の吸収線が、Talbotカーペットの複数のノードと位置合わせされるように、配置され、位置付けられる。Talbotパターンの強度は、比較的变化しないままである一方、複数の白い矢印によって示される散乱したX線889-Cは、これらの吸収格子420および430によってほとんど遮断されるであろう。示されたTalbotカーペットの形成は、ビーム分割格子が、十分な空間的コヒーレンスを有するX線で照らされるものに対応することに留意されるべきである。

【0185】

複数の散乱防止用グリッドにおける設計およびパターンは、複数のビーム分割格子へと製造された複数のパターンに対応するであろう。例えば、図17のメッシュパターンが、ビーム分割格子 G_1 として使用される場合、散乱防止用グリッドは、メッシュパターンにおいても配置され得る。図18の市松模様パターンが、ビーム分割格子 G_1 として使用される場合、散乱防止用グリッドは、市松模様パターンにおいても配置され得る。あるいは、図18の市松模様パターンが45°回転させられ、ダイヤモンドパターンを形成する場合、散乱防止用グリッドは、回転されたチェッカーボード(ダイヤモンド)パターンにおいても配置され得る。さらなる実施形態が、ハニカム構造等の他の周期的構造をさらに含んでよい。

【0186】

散乱防止用グリッドを介した透過は、複数の吸収特徴部のアスペクト比および相対サイズ関数の関数である。これは、図42に示されている。格子の高さは、 h_g によって与えられる一方、複数の吸収構造の間の複数の開口部の幅は、 w_g であり、散乱防止用格子の周期は、 p_4 である。法線から伝搬角度 θ を有する散乱したX線は、

【数17】

$$\tan(\theta) < (w_g/h_g)$$

が、それらが複数の吸収構造の1つの端部に偶然衝突しない場合、グリッドを概して通り抜けるであろうように満たされる。垂直入射X線の透過は、吸収および非吸収構造の領域の比によって与えられるであろう。 $p_4 = 2w_g$ である50/50グリッドの場合、最良な透過は50%であろう。この場合、一次放射線に関して小さい散乱角度における散乱の透過の割合は、一次放射線と同じであり、散乱放射の優先的な吸収はない。

【数 18】

$$\theta = \tan^{-1}(w_g/h_g)$$

より大きい散乱角を有する散乱放射について、散乱防止用グリッドは、散乱放射を優先的に吸収する。

【0187】

いくつかの実施形態において、散乱防止用グリッドが、検出器用の分析格子 G_2 に加えて使用されてもよい。そのような実施形態は、図 43 に示される。そのような構成を用いて、本発明の複数の実施形態は、試料についての追加情報を取得することを可能にする。

10

【0188】

図 43 に示されるような実施形態は、様々な実施形態において開示されたような複数の微細構造の周期的配列サブ線源を有する X 線源 002 と、ビーム分割格子 G_1 210 と、散乱防止用グリッド G_4 420 と、分析格子 G_2 なしの検出器 290 とを備える。ビーム分割格子 210 および散乱防止用グリッド 420 がない場合、このイメージングシステムは、通常は延長された X 線源である微細構造の X 線源 002 を除いては、ほぼ全ての従来の X 線イメージングシステムに類似している。散乱防止用グリッドの現在の技術は、一次放射線に関して小さい散乱角度を有する散乱した放射線を吸収するには、それが散乱放射および一次放射線の両方に対して透明な領域のかかなりの割合を有するので、効果がない。これは、コンプトン散乱等の散乱が、吸収コントラスト情報を伝達する信号より 5 倍高くなり得る乳児または圧縮されていない胸部等の被験者を観察するのに特に重要になる。本発明の複数の実施形態によると、散乱放射は、分数の Talbot 距離の 1 つにおいて散乱防止用グリッドを配置し、対応する Talbot カーベットの複数のノードを有する複数の吸収線を位置付けることによって、優先的に吸収され得る。この実施形態は、臨床 X 線イメージングおよびセキュリティ検査等、高エネルギー X 線を有する大容量の対象物を結像するのに特に重要である。

20

【0189】

本発明の別の実施形態によると、暗視野画像が、分数の Talbot 距離の 1 つにおいて散乱防止用グリッド 420 を配置し、対応する Talbot カーベットの複数のアンチノード（または複数のアンチノードの整数倍）を有する複数の吸収線を位置付けることによって、分析格子 220 を有していない検出器 290 によって記録されてよい。別の暗視野画像が、吸収グリッド 420 を有していないが位置合わせされた分析格子 220 を有する検出器 290 によって記録され得、そうすることで、その複数の吸収部分は、Talbot カーベットの複数のアンチノードと位置合わせされる。2 つの異なる暗視野画像が、ビーム分割格子 210 からの異なる複数の距離において得られるので、それらは、対象物について異なる空間情報を含むであろう。

30

【0190】

本発明の別の実施形態によって、分数の Talbot 距離の 1 つにおいて散乱防止用グリッドを配置し、対応する Talbot カーベットの複数のノードを有するその複数の吸収線を位置付けることによって、微分位相コントラスト、同時の位相、吸収、および散乱画像を取得する位相ステップングを含み、位相ステップングの必要なく高空間分解能検出器を用いる、散乱防止用グリッドを有さないいくつかの確立された位相コントラストイメージング技術が使用され得る。

40

【0191】

3. 2 検出器 MTF および DQE

検出器構成および位置付けの複数の変形例は、本発明に従って構成された X 線システムの信号対雑音比における改善にも寄与し得る。複数の検出器特性の選択によって影響を受け得るフィギュア・オブ・メリットは、変調伝達関数 (MTF) および検出量子効率 (D

50

QE)である。

【0192】

上記のようなコンプトン散乱の存在は、これらのフィギュア・オブ・メリットの劣化に寄与し得る。しかしながら、複数の他の因子もMTFおよびDQEに影響を与え得る。検出器の達成可能なMTFおよびDQEは、複数の異なる物理的プロセスに依存する。全てのX線アレイ検出器に対する固有の物理的プロセスは、電離放射によって生成される複数の光電子の相互作用（移動）の範囲、入射X線による検出器感知材料における複数の原子の電離／脱励起によって生成された二次X線蛍光の生成、および表面法線に関連して斜めの入射角で感知材料の限りのある厚みから生じる視差のブレを含む。コンプトン散乱した放射線の再吸収および検出器の材料による二次蛍光X線は、MTFおよびDQEの減少にも寄与し得るが、この寄与は、通常無視できる。

10

【0193】

実際の検出器における追加のプロセスは、MTFおよびDQEの減少にも寄与し得る。直接変換デジタルアレイ検出器（非結晶セレンウム光伝導体ベースの平面パネル検出器等）では、複数の電荷搬送手段の横方向の拡散が、MTFおよびDQEの減少に寄与し得る。蛍光体材料（ Gd_2CO_2S 等）の層またはシンチレータ（列成長させられたCsIファイバ等）を備える間接的変換デジタルアレイ検出器では、散乱によって拡散される光は、検出器におけるMTFおよびDQEの減少に著しく寄与し得る。

【0194】

全てのデジタルアレイ検出器では、フィルファクタ（有効検出領域の割合）は、MTFおよびDQEの減少にも寄与するであろう小さい検出画素において特に問題があり得る。MTFおよびDQEの減少に寄与する全ての因子では、これらの効果は、増加する検出解像度（より小さい画素）と共に悪化し、多くの設計妥協およびトレードオフをもたらし得る。これは、シンチレータ／蛍光体の厚み（および、従って、その量子検出効率）、光散乱で引き起こされた画像のブレによる空間分解能の限界、および複数の考慮の間での妥協と、（光電子の範囲が反比例する）材料質量密度といったフィルファクタのような検出器パラメータで分解能（より小さい画素）を向上させること、および特性蛍光X線の範囲を決定する検出器感知材料の元素組成等の間でのトレードオフとを含む。

20

【0195】

MTFおよびDQEに対するほぼ全ての有害因子は、複数の検出画素の端部の近くまたはそれらにおいて、放射線が入射する場合、最大に寄与する。従って、MTFおよびDQEにおける改善は、全ての入射放射線が、複数の検出画素の中央において入射するように方向付けられる場合に実現され得る。

30

【0196】

一般に、配備された位置に敏感な検出器は、固有の角度感知／拒否能力を有さない。散乱した放射線（対象物において複数の微細構造による小さい角度の散乱並びにコンプトン散乱を含む）は、望ましくない画像背景の一部であり、所望される放射線による複数の「カウント」からは区別できない検出器における複数の「カウント」を生成する。

【0197】

従って、散乱した放射を引き離すかまたは低減する検出器を備えるシステムの使用により、システムの画像コントラストおよびDQEが増加し得る。

40

3. 3変更された検出器を用いる実施形態

【0198】

上述のように、散乱した放射は、複数の吸収領域が暗いTalbot縞に対応するように位置合わせされた吸収グリッドまたは格子を配置することによって遮断されてよい。

【0199】

同様に、複数の行（および／または列）の中央が、複数のTalbot縞のアンチノードの中央と位置合わせされるように、間隔が開けられかつ位置付けられる検出器グリッドを選択することも可能である。そうすることで、（定義により、入射X線に対し透明であるようにされる）複数のセンサ画素間の領域が、Talbotカーペットの複数のノード

50

の位置に対応する。そのような間隔および整列を有する検出器を用いることによって、検出器によって普通は吸収されるであろう散乱したX線は、吸収されない。結果として、複数の光電子、二次蛍光X線の再吸収およびコンプトン散乱により、複数のセンサ画素におけるそれらに関連するノイズは、おそらく存在せず、信号対雑音比は改善される。

【0200】

図44は、検出器がそのように配置されるシステムを示す。複数の前の実施形態のように、規則的なパターンにおいて配置された複数の微細構造サブ線源700を備える線源によって発せられるX線888（すなわち、一式のラインまたは配列）は、検査されるべき対象物240-Mを通して伝搬し、ビーム分割格子210-Dの上へ落ちるX線を発生させる。ビーム分割格子は、概して、1または2次元の位相シフト格子であり、格子の間隔および周期 p_1 は、上記の式9において記載されるような複数のサブ線源の間隔に対する関係を有している。示されるようなTalbotパターンは、例えば、Jpn. J. Appl. Phys.の第46巻、2007年、第L89～L91頁のY. Takeda他による「X-Ray Phase Imaging with Single Phase Grating」に示されているように、 $1:1\pi/2$ 位相シフトパターンを有するビーム分割格子210-Dに対応する。

【0201】

電子バックプレーン290-Bに接続された様々なセンサ画素290-BPを備える検出器は、検出されたX線の数に関連する複数の信号を生成し、その信号は、分析のためにコネクタ291、そしてデータ処理システム295を通過する。検出器は、分数のTalbot距離の1つ、すなわち、

【数19】

$$D_5 = D_N = N_5 \frac{p_1^2}{8\lambda} = \frac{N_5}{16} D_T$$

において配置される。ここで、 D_N は、平面波照明についての分数のTalbot距離であり、 λ は、平均X線波長であり、 N_5 は、検出器が配置されるTalbot分数次数（ $N=1, 2, 3, \dots$ ）である。

【0202】

複数のセンサ画素の間隔 p_5 が、次に、選択され、対応するビーム分割格子 G_1 のTalbot間隔に対応する。その関係は、

【数20】

$$p_5 = K p_0 \frac{D_5}{L}$$

によって与えられる。ここで、 p_0 は、微細構造の線源の周期であり、 L は、複数のX線源700と回折格子210-Dとの間の距離であり、 T は、ビーム分割格子が位相シフト $\pi/2$ を導入するとき1に等しく、ビーム分割格子が位相シフト π を導入するとき $1/2$ に等しい倍率である。

【0203】

図45は、格子210-Dが、Talbot干渉パターンを生成するのに使用される別の実施形態を示す。検出器290-B-Lは、複数の画素290-BP-Lを有し、それにおいて、検出器の領域の大部分が画素を有し、画素間では小さい間隙があるだけである。検出器290-B-Lは、複数のTalbotパターンのアンチノード（建設的干渉の領域）が、各検出器画素290-BP-Lの中央にまたはその近くに入射するように、予め定められたTalbot距離（分数もしくは奇数整数）において配置される。従って、

検出器は、T a l b o t パターンの周期に対応する周期性を有する。そのような格子および検出器方式は、前述の微細構造の線源と共に、または微小焦点の線源等の十分な横方向のコヒーレンスを有する任意の他の線源と共に使用されてよい。

【0204】

検出器グリッドにおける複数の設計およびパターンは、複数のビーム分割格子へと製造される複数のパターンに対応するであろう。例えば、図18の市松模様パターンが、ビーム分割格子G₁として使用される場合、検出器グリッドは、市松模様パターンにおいても配置されてよい。あるいは、図17のメッシュパターンが、ビーム分割格子G₁として使用される場合、検出器グリッドは、メッシュパターンにおいても配置されてよい。図18の市松模様パターンが、45°回転させられ、ダイヤモンドパターンを形成する場合、検出器グリッドは、回転されたチェッカーボード（ダイヤモンド）パターンにおいても配置されてよい。

10

【0205】

3. 4 「シングルショット」T a l b o t 技術。

存在する臨床、セキュリティ検査、および非破壊的試験用のX線イメージングシステムは、主に吸収コントラスト（隣り合う特徴部の間の減衰の差異）を使用する。X線位相コントラストは（隣り合う特徴部の間の位相シフトの差異）が、特に低いZの材料について、高エネルギーX線においてほぼ全ての材料の吸収コントラストより著しく大きくなり得ることが長い間、認識されている。最近、散乱コントラスト（複数の隣り合う特徴部の間の小さい角度の散乱強度の差異）は、イメージング解像度素子（イメージング解像度より小さい寸法の複数の孔および微細構造等）内の複数のイメージングサブ分解能機能に対して認識されてきた。シングルショット（露光）において、微分位相コントラスト画像、位相コントラスト画像、または散乱コントラスト画像のうち少なくとも1つと組み合わせて吸収コントラスト画像を同時に取得することが可能であるのが非常に望ましい。

20

【0206】

数人の研究者は、複数のビーム分割格子およびビーム分割格子に関して僅かに回転された分析格子を使用し、次に、位相コントラスト画像に到達すべく、フーリエ変換画像分析技術を用いる、複数のシングルショットX線位相コントラストイメージング技術を開発してきた。この技術の欠点は、画像空間分解能が実質的に低下することである。さらなる開発は、シングルショット技術のさらなる変形[例えば、H. Wen、E. E. Bennett、M. M. Hegedus、およびS. C. Carrollによる「Spatial harmonic imaging of X-ray scattering-initial results」IEEE Trans. Med. Imaging第27（8）巻、997～1002頁（2008年）、およびH. Wen、E. E. Bennett、M. M. Hegedus、およびS. Rapacchi、「Fourier X-ray scattering radiography yields bone structural information」、Radiology第251（3）巻、910～918頁（2009年）を参照]を含み、研究者らは、それを「空間高調波法（spatial harmonic method）」と呼ぶ。これらの参考文献において、透過回折格子（グリッド）を含む単一の投影画像は、空間周波数領域において数個の別個の高調波ピークを有するであろう。これらのピークの逆フーリエ変換が、高調波画像において生じる。吸収と回折により引き起こされる減衰との間の相対的重さは、これらの画像の中で異なり、従って、別個の吸収および回折画像を抽出するのに十分な情報を提供する。両方のシングルショット技術によって得られる原画像は、別個の吸収および暗視野（散乱）画像は含まなく、複数の異なるコントラストメカニズムから複数の画像を取得すべく、画像分析を必要とする。

30

40

【0207】

3. 5. 2つの（「シングルショット」技術用の）変更された検出器を有する実施形態。

本発明の複数の他の実施形態、2つの検出器を有するシステムにおいて、一方の検出器

50

は、分数の T a l b o t 距離の 1 つにおいて配置され、そのグリッド（アクティブ画素）、間隔（複数のアクティブ画素間の透明な領域）および配置と位置合わせされ、そうすることで、複数の行（および／または列）の中央は、複数の T a l b o t 縞のアンチノードの中央と位置合わせされる。一方、他方の検出器は、第 1 の検出器の下流側で分数の T a l b o t 距離の別の 1 つにおいて配置され、そのグリッド（アクティブ画素）、間隔（複数のアクティブ画素の間の、好ましくは透明な領域）および配置と位置合わせされ、そうすることで、複数の行（および／または列）の中央は、複数の T a l b o t 縞のノードの中央と位置合わせされる。そのような間隔および整列を有する一対の検出器を用いることによって、吸収および散乱（暗視野）画像の両方は、「シングルショット」において、同時に収集されてよい。いくつかの実施形態において、2 つの検出器の位置は逆にされ得るが、この場合、上流側の検出器の複数のアクティブ画素間の間隔は、X 線に対してまだ十分に透明であるべきである。

10

【0208】

図 46 は、一対の検出器が、そのように配置されたシステムを示す。複数の前の実施形態のように、規則的なパターン（すなわち、一式のラインまたは配列）において配置された複数の微細構造サブ線源 700 を備える線源によって発せられる X 線 888 は、検査される対象物 240-M を通って伝搬し、ビーム分割格子 210-D の上へと落ちる X 線を発生させる。ビーム分割格子は、概して、上記の式 9 に記載されたような、複数のサブ線源の間隔に対する関係を有する格子の間隔および周期 p_1 を有する、1 または 2 次元の位相シフト格子である。

20

【0209】

様々なセンサ画素 290-BP で接続された電子バックプレーン 290-B を備える 1 つの検出器は、検出された X 線の数に関連する複数の信号を生成し、その信号は、分析のためにコネクタ 291、そしてデータ処理システム 295 を通過する。上記のように、検出器は、分数の T a l b o t 距離の 1 つ、すなわち

【数 21】

$$D_5 = D_N = N_5 \frac{p_1^2}{8\lambda} = \frac{N_5}{16} D_T$$

30

において、配置される。ここで D_N は、平面波照明についての分数の T a l b o t 距離であり、 λ は、平均 X 線波長であり、 N_5 は、第 1 の検出器が配置される T a l b o t 分数次数 ($N = 1, 2, 3, \dots$) である。検出器 290-BP の（斜線のボックスによって示される）複数のアクティブ画素は、対応する T a l b o t カーベットの複数のアンチノードと位置合わせされる。複数のアクティブ画素間の領域は、好ましくは透明であるが、そうである必要はない。

【0210】

上記のように、複数のセンサ画素の間隔 p_5 は、次に、対応するビーム分割格子 G_1 のための T a l b o t 間隔に対応するように選択される。その関係は、

40

【数 22】

$$p_5 = K p_0 \frac{D_5}{L}$$

によって与えられる。ここで、 p_0 は、微細構造の線源の周期であり、 L は複数の X 線源 700 と回折格子 210-D との間の距離であり、 K は、ビーム分割格子が位相シフ

50

ト $\pi/2$ を導入するとき 1 に等しく、ビーム分割格子が位相シフト π を導入するとき $1/2$ に等しい倍率である。

【0211】

しかしながら、この実施形態において、システムは、暗視野に対して検出された X 線の数に関連する複数の信号を生成する様々なセンサ画素で接続された電子バックプレーン 290-D を有する第 2 の検出器 290-DP も備え、その信号は、分析のために、コネクタ 291-D、そしてデータ処理システム 295 を通過する。上記のように、検出器は、分数の Talbot 距離の 1 つ、すなわち

【数23】

$$D_6 = D_N = N_6 \frac{p_1^2}{8\lambda} = \frac{N_6}{16} D_T$$

10

において配置される。ここで、 D_N は、平面波照明についての分数の Talbot 距離であり、 λ は、平均 X 線波長であり、 N_6 は、Talbot 分数次数 ($N=1, 2, 3, \dots$) であり、そこにおいて、第 2 の検出器が配置される。検出器 290-DP の複数のアクティブ画素 (斜線のボックスによって示される) は、対応する Talbot カーベットの複数のノードと位置合わせされる。複数のアクティブ画素間の領域は、X 線に対して十分に透明である必要がある。

20

【0212】

上記のように、第 2 の検出器の複数のセンサ画素の間隔 p_6 は、次に、対応するビーム分割格子 G_1 についての Talbot 間隔に対応するように選択される。その関係は、

【数24】

$$p_6 = K p_0 \frac{D_6}{L}$$

30

によって与えられる。ここで、 p_0 は、微細構造の線源の周期であり、 L は、複数の X 線源 700 と回折格子 210-D との間の距離であり、 K は、ビーム分割格子が位相シフト $\pi/2$ を導入するとき、1 に等しく、ビーム分割格子が位相シフト π を導入するとき、 $1/2$ に等しい倍率である。

【0213】

複数の検出器グリッド上の設計およびパターンは、ビーム分割格子へと製造される複数のパターンに対応するであろう。例えば、図 18 の市松模様パターンが、ビーム分割格子 G_1 として使用される場合、複数の検出器グリッドは、市松模様パターンにおいても配置されてよい。あるいは、図 17 のメッシュパターンがビーム分割格子 G_1 として使用される場合、複数の検出器グリッドは、メッシュパターンにおいても配置されてよい。図 18 の市松模様パターンが、 45° 回転させられ、ダイヤモンドパターンを形成する場合、複数の検出器グリッドは、回転されたチェッカーボード (ダイヤモンド) パターンにおいても配置されてよい。

40

【0214】

この構成では、部分的に透過する第 2 の検出器 290-DP は、散乱するコントラスト (複数のサブ分解能機能による小さい角度の散乱によって散乱した X 線) および/または大きい位相勾配を有する複数の尖った特徴部による屈折 (位相) コントラストの組み合わせによる暗視野 X 線画像を記録する。一方、第 1 の (画像) 検出器 290-BP は、小さい位相勾配を有する複数の特徴部による吸収コントラスト画像および/または屈折 (位相

50

）コントラストの組み合わせで画像を記録する。代替的に、先の部分的に透過する格子とは逆の特性を有する部分的に透過する格子が、使用され得る。この構成において、部分的に透過する検出器および画像検出器によって記録された複数の画像は、先の検出器構成と比較して、逆にもされる。

【0215】

Talbot 干渉縞もしくはパターンの周期の半分の、分数の Talbot 距離に対する比は、Talbot 縞もしくはパターンの複数のノードにおける散乱した／屈折した X 線の実質的な存在の近似の測定として使用され得る第 1 の傾斜測定を提供する。部分的に透過する検出器および主要検出器の配置およびビーム分割格子周期の複数の幾何学的パラメータに対する Talbot 分数次数、線源と、ビーム分割格子との間の距離、および X 線波長を選択することによって、サブ分解能の特徴部サイズまたは優先的に高いコントラストイメージングのための複数の大きい特徴部の所望される位相勾配が最適化され得る。

【0216】

2つの検出器の「シングルショット」システムの代替的实施形態が、図 47 に示される。本明細書で、明るい Talbot 縞 889-B および暗い Talbot 領域 889-D が、周期 p_1 を有するビーム分割位相格子から離れて伝搬することが示されている。通常、分数の Talbot 距離の倍数である、適当な離れた距離において、シンチレータ 260 と、付加的に反射コーティング 270 とを備える検出器 290-D S が配置される。反射コーティングは、シンチレータが X 線を吸収し、可視光または近紫外線光を放出する場合に発せられる可視光 988 が、シンチレータへと反射されるようになっている。検出器 290-D S は、反射器 280、シンチレータ 260 および反射器 270 を通って透過する X 線を検出し、複数のセンサ画素 290-D P S をさらに有してよく、複数のセンサ画素 290-D P S は、それらの位置が、Talbot パターンの複数のノードに対応するであろうように、周期を有する規則的配列において配置される。この検出器 290-D S は、次に、イメージングシステムの分解能要素より小さい寸法を有する複数の特徴部による散乱によって複数のノードで検出される X 線の数に関連する複数の信号を生成し得、これらの信号は、分析のために、コネクタ 291-D、そしてデータ処理システム 295 を通過する。

【0217】

シンチレータ 260 は、1-D または 2-D パターンにおいてもコーティングされてよく、そうすることで可視光または近紫外線光子は、高い X 線強度に対応する領域（すなわち、Talbot 縞の複数のアンチノード）のみににおいて発せられる。

【0218】

システムは、また、X 線を透過させるが、可視光および／または紫外線光子を反射するビーム分割器 280 と、Talbot 干渉パターンの複数の明視野部分の画像を形成する可視の UV イメージングシステム 380（例えば、レンズまたは顕微鏡対物レンズ）とを備える。シンチレータによって放出された複数の可視の紫外線光子 988 は、このビーム分割器から反射し、反射した複数の可視光／UV 光子 988-R は、明視野検出器 290-B S 上へ、可視光／UV イメージングシステムによって画像へと形成される。可視光／UV 検出器は、画素の均一な配列を有してよく、または周期 p を有し、複数の位置が、Talbot パターンの複数の明視野部分の画像に対応するように配置された複数の選択された領域を有してよい。可視光／UV 検出器 290-B S は、Talbot 縞の複数のアンチノードにおいて検出された X 線の数に関連する複数の信号を生成し、その信号は、分析のために、コネクタ 291-B、そしてデータ処理システム 295 へと通過する。

【0219】

この様式において、明視野および暗視野情報の両方が、図 46 に示されたような一対の検出器の場合であり得るように、複数の検出器が互いに遮断することなく平行に収集される。

【0220】

4. 格子の製造。

本発明の複数の実施形態で使用された複数の格子の製造は、Christian David (C. David 他、「Fabrication of diffraction gratings for hard x-ray phase contrast imaging」、Microelectron. Eng. 84、1172～1177、2007年)によって前述されたもの等の公知の従来技術の製造プロセスを用いてなされてよい。

【0221】

X線のための複数の格子は、ケイ素基板を用いて、吸収の変化を引き起こすべく、金 (Au、Z=79) 等の高いZ材料の位相の変化および堆積を引き起こすようにトポグラフィにおけるエッチングの変化を用いて製造されてよい。金およびケイ素の複数のX線吸収特性は、図39に示される。

10

【0222】

図48に示されるように、周期的パターン3010は、ケイ素基板3000へとエッチングされ得、垂直入射で落ちるX線の周期的位相シフトを導入する構造を生成してよい。位相シフトは、エッチング深さに依存し、以下の条件が満たされる場合、垂直入射X線に対してπラジアンである位相シフトが実現される。

【数25】

$$d_{etch} = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{|n-1|} = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\delta}$$

20

【0223】

いくつかのX線エネルギーにおけるケイ素に対する複数の値δが、πラジアンの位相シフトに対しエッチングされた構造が必要とする深さと共に、表IVに示される。

【0224】

典型的な格子製造工程は、〈110〉で方向付けられたケイ素ウェハをフォトリソストでコーティングする段階と、従来のフォトリソグラフィ、集束イオンビームリソグラフィ、または電子ビームリソグラフィを用いてレジストをパターニングする段階とを有する。ケイ素は、次に、エッチングが、レジストによって覆われていないケイ素の複数の部分のみに対し選択的に発生する状態で、例えば、水酸化カリウム(OH)溶液におけるウェットエッチング、または、反応性イオンエッチング(RIE)等のエッチングプロセスを経る。エッチング深さは、エッチングプロセスの時間を調節することによって制御されてよい。エッチングプロセスの他の変形例は、半導体プロセスおよび製造の当業者らに公知であろう。

30

表IV：πラジアンのケイ素位相シフトのエッチング深さ

【表 4】

X線エネルギー(keV)	波長 λ (nm)	δ	π 位相シフト深さ (μm)
3.0	0.413	5.43E-05	3.81
5.0	0.248	1.98E-05	6.26
8.048(Cu Ka)	0.154	7.58E-06	10.17
10.0	0.124	4.89E-06	12.69
17.48(Mo Ka)	0.0709	1.59E-06	22.36
30.0	0.0413	5.36E-07	38.52
50.0	0.0248	1.93E-07	64.31
59.39(W Ka)	0.0209	1.37E-07	76.32
100.0	0.0124	4.82E-08	128.74

10

【0225】

Gに使用されるもの等の吸収格子は、上記のように、ケイ素位相格子を最初に木枠梱包し、次にケイ素に既にパターンニングされた複数の溝内に金等のX線吸収材料を堆積させることによって、製造されてよい。これは、金等の、ある量のX線吸収材料3030が、ケイ素基板3000において形成された複数の溝を充填している図49に示される。金を複数のケイ素溝内に堆積させる1つの工程は、標準的な電気めっき工程を伴う。金は、複数の溝内のみに堆積されるであることを確実にすべく、アルミニウムの犠牲層は、最初に角度をなして堆積されてよく、クロム(Cr)および金(Au)を有する厚みが $\sim 50\text{nm}$ であるシード層が、次に堆積される。リン酸処理は、ケイ素構造の上部に堆積した全ての材料を除去し、ケイ素の複数の溝の底部においてのみ、シード材料を残す。標準的な電気めっきは、金の増殖が、堆積されたシード層の上のみに発生する状態で、後に続いてよい。何100ミクロンもの金の堆積は、75%以上の透過変調で複数の吸収格子を生成し得る。しかしながら、図1および図39に示されたように、吸収は、X線エネルギーおよびその材料に対する吸収係数に依存するであろう。X線吸収格子を作成するための他の複数の方法は、当業者らには公知であろう。

20

30

【0226】

いくつかの応用および特定のX線波長では、結晶格子も使用されてよい。

【0227】

本発明のこれらの実施形態を用いて開示された散乱防止用グリッドまたは格子は、また、当業者にとって公知の任意の数のリソグラフィパターンニング技術を用いても製造され得ることに留意されるべきである。

【0228】

40

5.0 検出器特性

検出器は、X線画像を形成するのに使用される多数の検出器のいずれか1つであってよい。一般に使用されるX線検出器の1つの種類に、X線にさらされたときに可視の光子を放出するヨウ化セシウム(CsI)、タリウムドープのCsI、イットリウムアルミニウムガーネット(YAG)またはスルホキシル酸ガドリニウム(GOS)の層を有するもの等の、蛍光スクリーンまたはシンチレータが含まれる。可視の光子は、次に、多くの場合、蛍光スクリーンによって放出された光子の強度パターンを拡張し、拡大する可視の光学を用いるリレー画像のさらなる形成と共に、可視強度を電子信号へと変換する電子センサによって検出される。リレー光学と共に、電子検出器は、高い分解能のセンサ自体を有する必要はなく、例えば、 1024×1024 画素を有し、各々が、 $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ の

50

正方形である安価な商業用のCCD検出器または相補型金属酸化膜半導体（CMOS）センサ配列が使用されてもよい。

【0229】

シンチレータ材料の層が、従来の光イメージセンサの配列に非常に近く配置された（またはさらにその上へコーティングされた）商業用の平坦パネルデジタルX線センサは、例えば、カリフォルニア州のPalo AltoのVarian Inc. およびマサチューセッツ州のBillericaのGeneral Electric, Inc. によって製造される。イメージセンサのその他の構成が、当業者らにとって公知であってよい。 G_2 分析格子が使用される複数の実施形態では、医療および工業利用に使用される平面パネル検出器等の、非常に効率的で速い読み出し検出器を使用することが好ましい。多くの応用では、20ミクロンより大きい分解能を有する平面パネル検出器は、Talbot 縞周期に等しい周期を有する分析格子Gが、検出器の前のX線ビーム経路に配置されることを必要とするであろう。

10

【0230】

第2の手法は、X線の吸収に応答して、例えば、非結晶セレンウム（a-Se）における直接の電子-正孔の対の生成によって、電気信号を直接生成する電子センサを使用することである。これらは、次に、薄膜トランジスタ（TFT）の配列を用いて複数の電子信号へと変換される。日本の京都の島津製作所のSafeFPD等のそのような直接の平面パネル検出器（FPD）が、市販されている。

20

【0231】

6. 0 変形例

複数の実施形態は、所望のX線エネルギー帯域幅およびを取得するスペクトルフィルタおよびシステムの様々な構成要素の全てのための配置制御システムを含む、Talbot 干渉計に通常含まれる複数の他の構成要素をさらに有してよい。

【0232】

グリッドまたは格子等、本開示内で使用される複数の特定の用語は、当業者らにとって公知であろうことに留意されるべきである。本明細書の説明において、グリッドおよび格子は、交互に使用されてよい用語であって、特定のグリッド、周期またはパターンに対して限定的であることを意味するものではない。

30

【0233】

同様に、本開示内で使用される特定の用語は、Talbot 縞、干渉パターンまたは「カーペット」等の当業者らに公知であろうことに留意されるべきである。本明細書の説明において、複数の干渉パターン、縞または「カーペット」は、交互に使用されてよい用語であって、いかなる特定の強度パターンに対しても限定的であることを意味するものではない。

【0234】

同様に、保温開示内で使用される特定の用語は、散乱防止用グリッドの吸収構造のための隔壁等、当業者らにとって公知であろうことに留意されるべきである。本明細書の説明において、複数の隔壁もしくは隔壁または構造は、散乱防止用グリッドの吸収構造を参照して交互に使用されてよい用語であって、高さの幅に対するいかなる特定の比に対しても限定的である、または1次元の形状だけを示唆することを意味するものではない。

40

【0235】

本願をもって、発明者らによって意図される最良の形態を含む、本発明の複数の実施形態が開示されている。複数の具体的な実施形態が示されてよい一方、一部の実施形態についてのみ、詳細に議論される複数の要素がその他の複数のものに応用されてもよいことが認識されるであろう。

【0236】

特定の複数の材料、複数の設計、複数の構成、および複数の製造工程が、本発明および好ましい複数の実施形態を説明すべく定められたが、そのような説明は限定することを意図するものではない。複数の変形例および複数の変更例は、当業者には明らかであり得、

50

本発明は、添付の特許請求の範囲の範囲によってのみ限定されることが意図されている。

【0237】

本明細書で説明された全ての要素、部材、および工程が含まれていることが好ましい。当業者には明らかであろうように、これらの要素、部材、工程のいずれも、複数の他の要素、複数の部材、複数の工程によって置き換えられ得るか、または完全に削除され得ることが理解されるべきである。

【0238】

概して、本文書は、少なくとも以下のことを開示している：X線源が、熱的伝導性基板に埋め込まれた複数の構造化されたコヒーレントサブX線源を有するターゲットを備える、X線干渉イメージングシステム。システムは、 π 位相シフト格子であり得る T a l b o 10
t 干渉パターンを確立するビーム分割格子 G_1 と、2次元X線強度を複数の電子信号へと変換するX線検出器とをさらに備える。システムは、また、複数のさらなる干渉縞を形成すべく、検出器の前に配置されてよい第2の分析格子 G_2 と、検出器に対して第2の格子 G_2 を移動させる手段とを備えてもよい。システムは、散乱したX線からの複数の信号を低減する散乱防止用グリッドをさらに備えてもよい。暗視野および明視野検出器の様々な構成も開示される。

概念 本文書は、少なくとも以下の概念も示す。

概念1。

X線干渉イメージングシステムであって、

真空チャンバと、

電子ビームのための放出器と、

電子ターゲットと、を有するX線源であって、前記電子ターゲットは、

第1の材料を有する基板と、

上記基板に埋め込まれ、複数のX線発生特性のために選択された第2の材料を含み、複数のサブ線源の周期的パターン内に配置されている、少なくとも複数の離散構造と、を含む、X線源と、

複数のX線のサブ線源によって発せられたX線を回折させるように位置付けられたX線位相シフト格子を形成する複数の周期構造を有するビーム分割X線格子と、

複数のX線検出素子の2次元配列を有し、ビーム分割格子によって回折された複数のX線を検出するように位置付けられたX線検出器と、

ビーム分割X線格子と検出器との間に位置付けられたX線吸収材料を含む複数の隔壁の周期的配列を有する散乱防止用グリッドと、を備える、

X線干渉イメージングシステム。

概念2。

X線位相シフト格子が、およそ π ラジアン位の位相シフトを予め定められたX線波長に導入する複数の構造を備える、概念1に記載のX線干渉イメージングシステム。

概念3。

X線位相シフト格子が、およそ $\pi/2$ ラジアン位の位相シフトを予め定められたX線波長に導入する複数の構造を備える、概念1に記載のX線干渉イメージングシステム。

概念4。

ビーム分割X線位相シフト格子は、X線位相シフト格子の周期 p_1 が、

【数26】

$$p_1 < \frac{\lambda L}{a}$$

によってX線ターゲットの複数の離散構造のうち少なくとも1つについての寸法 a に関連する、X線位相シフト格子を備え、

ここで、 λ は、予め定められたX線波長であり、 L は、ターゲットとビーム分割X線格

子との間の距離である、概念 1、2 または 3 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 5。

散乱防止用グリッドの複数の隔壁は、スズ、白金、金、タングステン、タンタル、モリブデン、ニッケル、鉛、銅およびガドリニウムから成る群から選択される高い Z の材料を含む、概念 1 から 4 および 8 から 10 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 6。

散乱防止用グリッドは、X 線透明材料を有する基板をさらに備える、概念 1 から 5 および 8 から 10 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 7。

複数の隔壁の 1 または複数のは、複数の特徴部の間の間隙の幅の 5 倍より高い高さを有する、概念 1 から 6 および 8 から 10 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

10

概念 8。

ビーム分割格子と相互作用するときに X 線源によって発せられる複数の X 線は、T a l b o t 干渉パターンを形成し、散乱防止用グリッドの複数の隔壁の寸法および周期性は、T a l b o t 干渉パターンの複数の寸法に対応するように選択される、概念 4 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 9。

散乱防止用グリッドの複数の隔壁の位置は、複数の隔壁が T a l b o t 干渉パターンの複数のノードと位置合わせされるように設定される、概念 8 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

20

概念 10。

散乱防止用グリッドの複数の隔壁の周期は、T a l b o t 干渉パターンの横方向の周期の整数倍である、概念 9 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 11。

第 1 の散乱防止グリッドと検出器との間に配置された X 線吸収材料を有する第 2 の散乱防止用グリッドをさらに備える、概念 1 から 10 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 12。

X 線干渉イメージングシステムであって、

真空チャンバと、

30

電子ビームのための放出器と、

電子ターゲットと、を有する X 線源であって、前記電子ターゲットは、

第 1 の材料を含む基板と、

基板に埋め込まれ、複数の X 線発生特性のために選択された第 2 の材料を含み、複数のサブ線源の周期的パターン内に配置された、少なくとも複数の離散構造と、を含む、X 線源と、

複数の X 線のサブ線源によって発せられた複数の X 線を回折させるように位置付けられた、X 線位相シフト格子を形成する複数の周期構造を有するビーム分割 X 線格子と、

複数の X 線検出素子の 2 次元配列を有し、ビーム分割格子によって回折された複数の X 線を検出するように位置付けられた、X 線検出器と、を備える、X 線干渉イメージングシステムであって、

40

ビーム分割格子と相互作用するときに X 線源によって発せられる X 線は、T a l b o t 干渉パターンを形成し、複数の X 線検出素子の寸法および位置は、T a l b o t 干渉パターンの寸法に対応するように選択される、

X 線干渉イメージングシステム。

概念 13。

X 線位相シフト格子は、予め定められた X 線波長に対して、およそ π ラジアン位の位相シフトを導入する複数の構造を有する、概念 12 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 14。

X 線位相シフト格子は、予め定められた X 線波長に対して、およそ $\pi/2$ ラジアン位の

50

相シフトを導入する複数の構造を有する、概念 1 2 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 1 5。

ビーム分割 X 線位相シフト格子は、X 線位相シフト格子の周期 p_1 が、

【数 2 6】

$$p_1 < \frac{\lambda L}{a}$$

10

によって X 線ターゲットの複数の離散構造のうち少なくとも 1 つの寸法 a に関連する、X 線位相シフト格子を有し、

ここで、 λ は、予め定められた X 線波長であり、 L は、ターゲットとビーム分割 X 線格子との間の距離である、概念 1 2 から 1 4 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 1 6。

検出器は、予め定められた分数の T a l b o t 距離で位置付けられ、複数の検出素子の位置は、複数の検出素子が、T a l b o t 干渉パターン of 複数のアンチノードと位置合わせされるように設定される、概念 1 2 から 1 5 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 1 7。

検出器は、予め定められた分数の T a l b o t 距離で位置付けられ、複数の検出素子の位置は、複数の p 検出素子が T a l b o t 干渉パターン of 複数のノードと位置合わせされるように設定される、概念 1 2 から 1 6 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

20

概念 1 8。

上記検出器は、予め定められた分数の T a l b o t 距離で位置付けられ、

複数の第 2 の検出素子を有する第 2 の X 線検出器をさらに備え、

上記第 2 の検出器も第 2 の予め定められた分数の T a l b o t 距離で位置付けられ、そのサイズおよび位置は、複数の第 2 の検出素子が、T a l b o t 干渉パターン of 複数のノードとお位置合わせされるように設定される、概念 1 6 に記載された X 線干渉イメージングシステム。

概念 1 9。

30

X 線源と、

X 線源によって発せられる X 線を回折するように位置付けられた X 線位相シフト格子を形成する複数の周期構造を有するビーム分割 X 線格子と、

複数の X 線検出素子の 2 次元配列を有し、ビーム分割格子によって回折された複数の X 線を検出するように位置付けられた、X 線検出器と、を備える X 線干渉イメージングシステムであって、

ビーム分割格子と相互作用するときに X 線源によって発せられる複数の X 線は、T a l b o t 干渉パターンを形成し、複数の X 線検出素子の寸法および位置は、T a l b o t 干渉パターン of 寸法に対応するように選択される、X 線干渉イメージングシステム。

概念 2 0。

40

T a l b o t 干渉パターン of コントラストは、2 0 % より高い、概念 1 9 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 2 1。

第 2 の材料および第 1 の材料についての比 $(Z_2 \rho_2) / (Z_1 \rho_1)$ は 1 2 より高く、ここで Z は原子番号であり、 ρ は質量密度である、概念 1 から 1 8 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 2 2。

選択された第 1 の材料は、ベリリウム、ダイヤモンド、グラファイト、ケイ素、窒化ホウ素、炭化ケイ素、サファイアおよびダイヤモンド状炭素から成る群から選択される、概念 1 から 1 8 または 2 1 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

50

概念 2 3。

第 2 の材料は、鉄、コバルト、ニッケル、銅、ガリウム、亜鉛、イットリウム、ジルコニウム、モリブデン、ニオブ、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、銀、スズ、イリジウム、タンタル、タングステン、インジウム、セシウム、バリウム、金、白金、鉛、およびこれらの組み合わせおよびこれらの合金から成る群から選択される、概念 1 から 1 8 または 2 1 から 2 2 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 2 4。

複数の離散構造は類似の形状を有する、概念 1 から 1 8 または 2 1 から 2 3 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 2 5。

類似の形状は、正角プリズム、直角長方プリズム、立方体、三角プリズム、台形プリズム、ピラミッド型、四面体、円柱、球体、卵形、およびたる形から成る群から選択される、概念 2 4 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 2 6。

複数の離散構造の周期的パターンは正方格子であり、複数の離散構造のうち 1 または複数について、一次元の幅は、1 0 ミクロン未満である、概念 1 から 1 8 または 2 1 から 2 5 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 2 7。

複数の離散構造の周期的パターンは、一式の平行な線であり、複数の離散構造のうち 1 または複数について、一次元における幅は、1 0 ミクロン未満であり、鉛直の次元における長さは 2 0 ミクロンを超える、概念 1 から 1 8 または 2 1 から 2 6 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 2 8。

ターゲットは、真空チャンバのためのウィンドウとしても機能する、概念 1 から 1 8 または 2 1 から 2 7 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 2 9。

X 線検出器はシンチレータを有し、電荷結合素子 (CCD) の配列も有する、概念 1 から 2 8 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

概念 3 0。

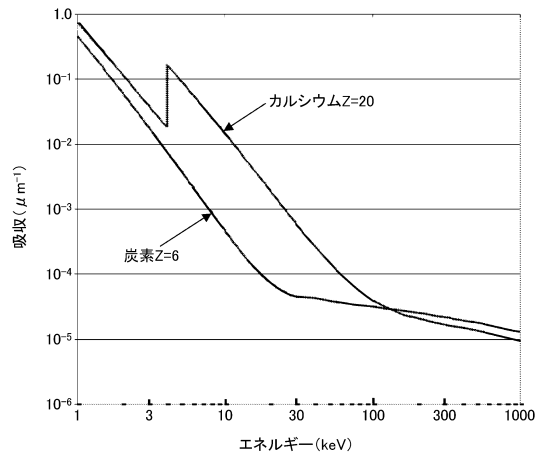
第 2 の X 線検出器は、シンチレータを有し、電荷結合素子 (CCD) の配列も有する、概念 1 8 に記載の X 線干渉イメージングシステム。

10

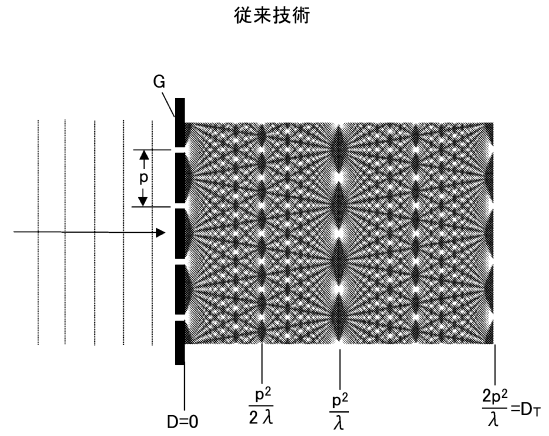
20

30

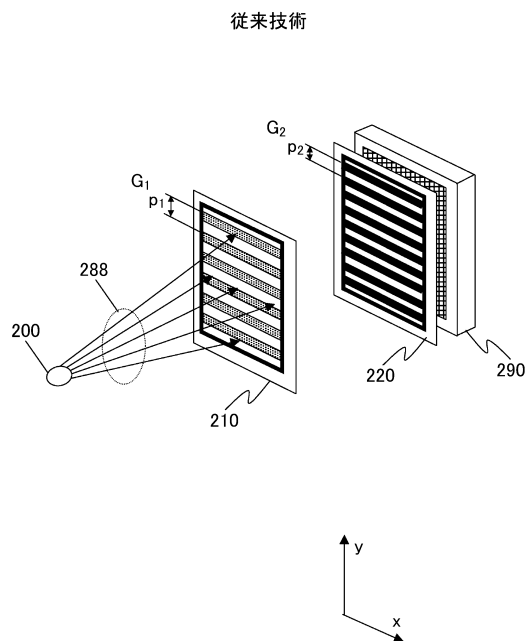
【図 1】



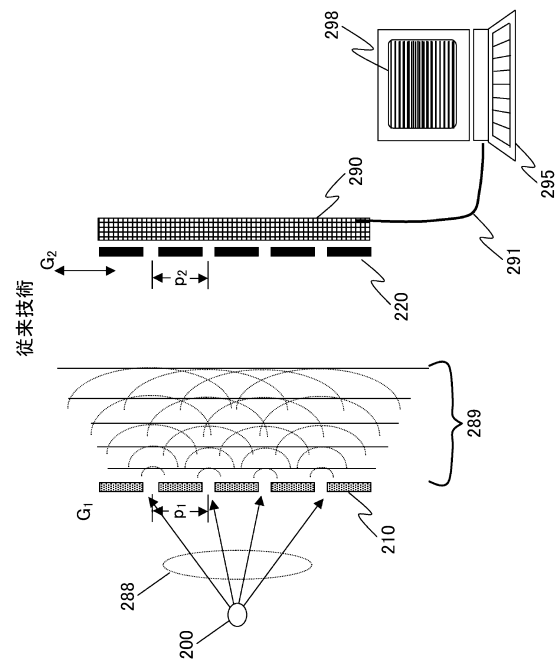
【図 2】



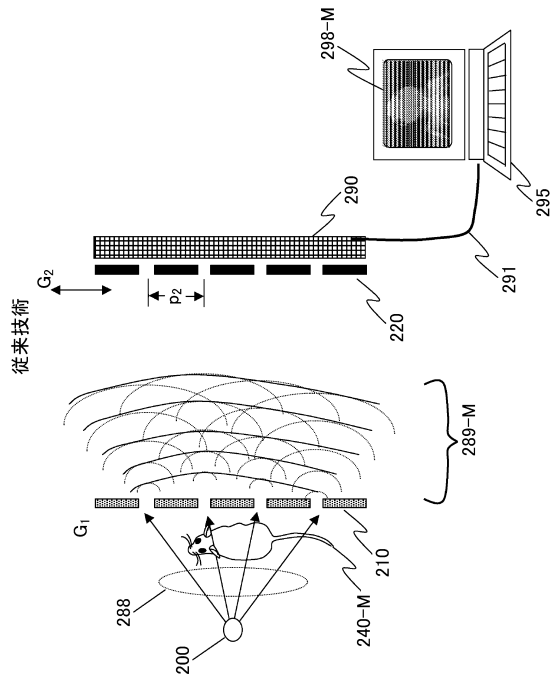
【図 3】



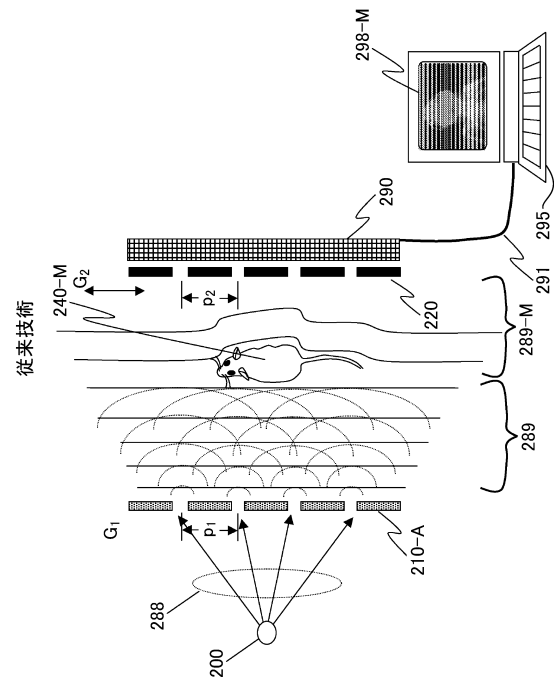
【図 4】



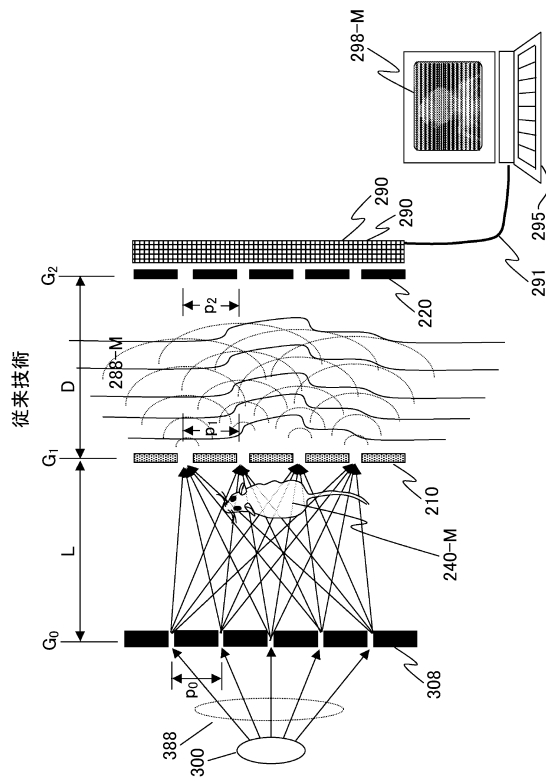
【図 5】



【図 6】

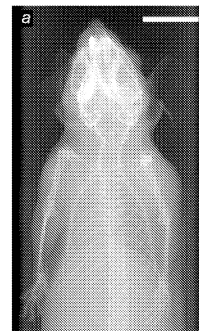


【図 7】



【図 8 A】

従来技術



【図 8 B】

従来技術



【図 8 C】

従来技術



【図 9】

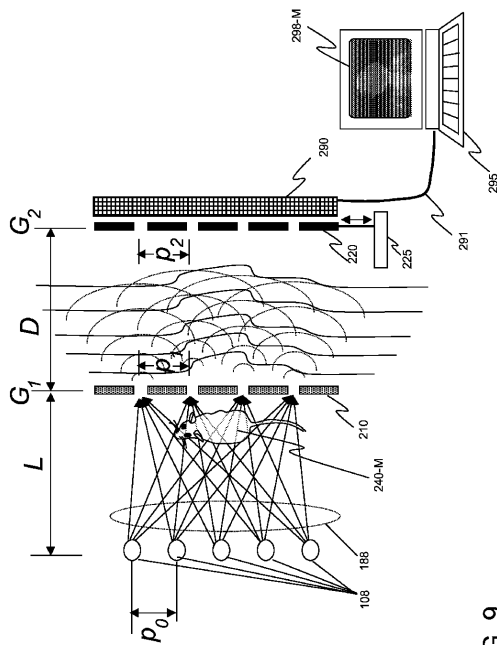


FIG. 9

【図 10】

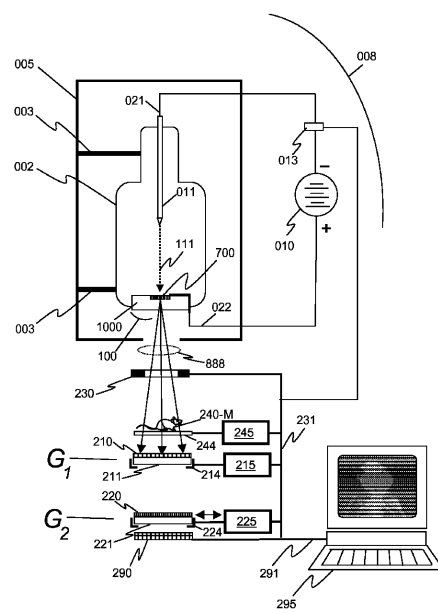


FIG. 10

【図 1 1】

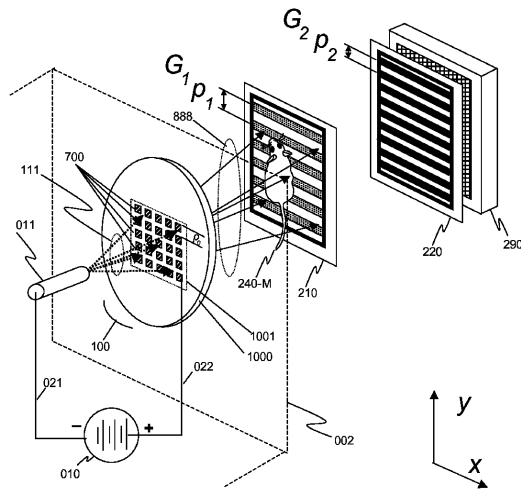


FIG. 11

【图 1 2】

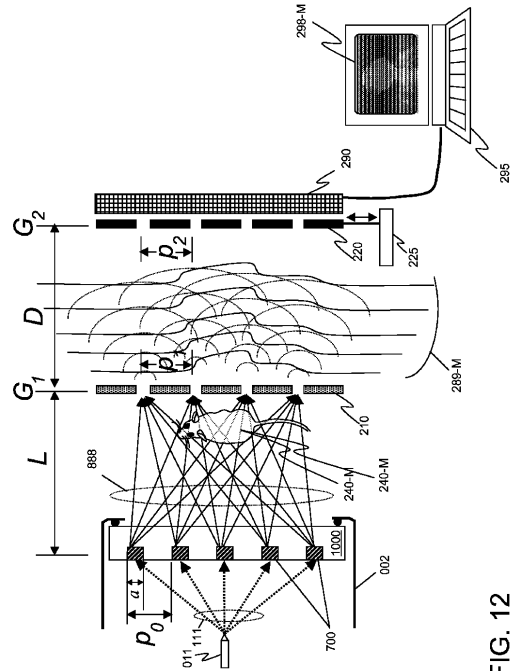


FIG. 12

【図 13】

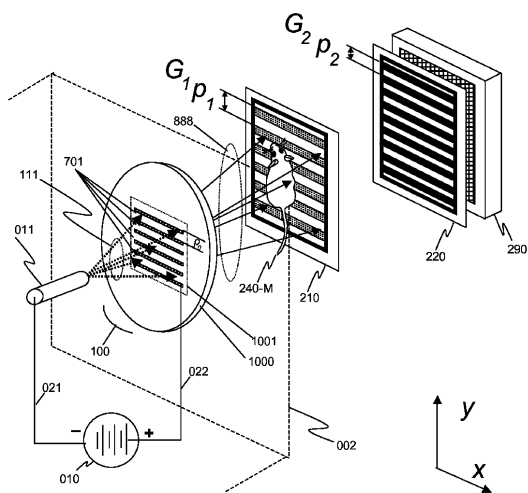


FIG. 13

【図 14】

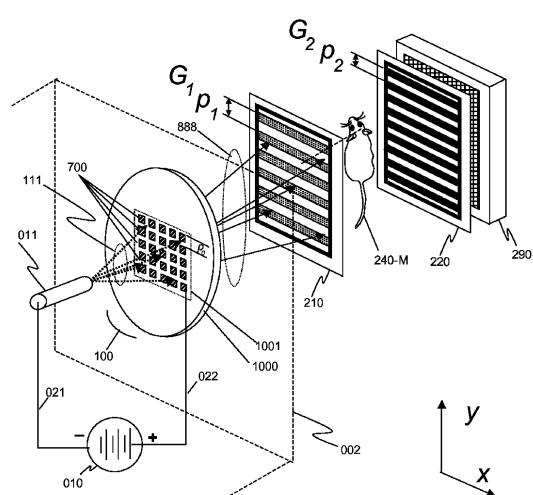


FIG. 14

【図 15】

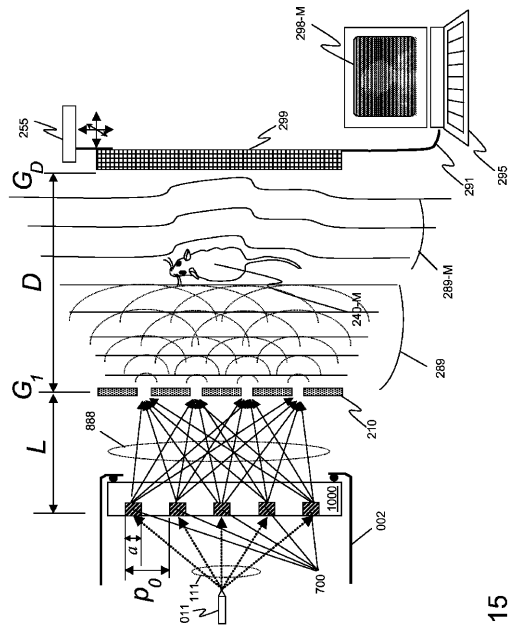


FIG. 15

【図 16】

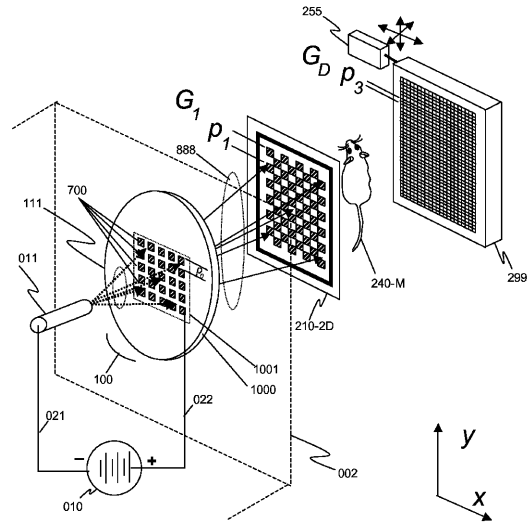
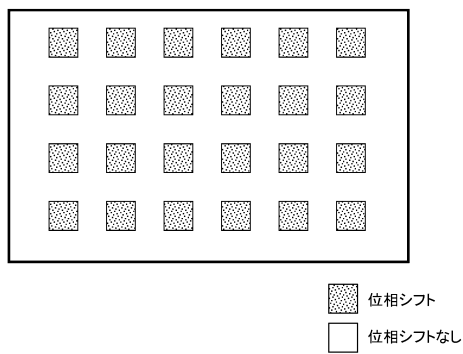
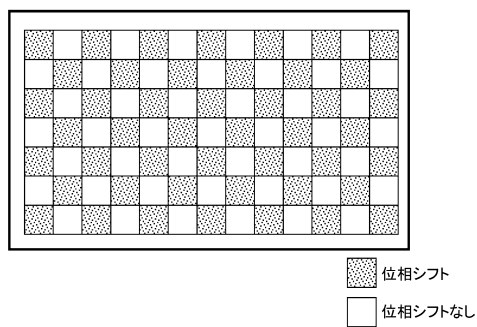


FIG. 16

【図 17】



【図 18】



【図 19】

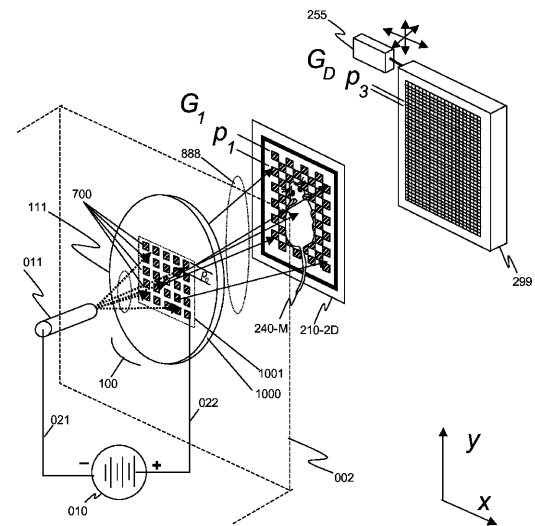


FIG. 19

【図 20】

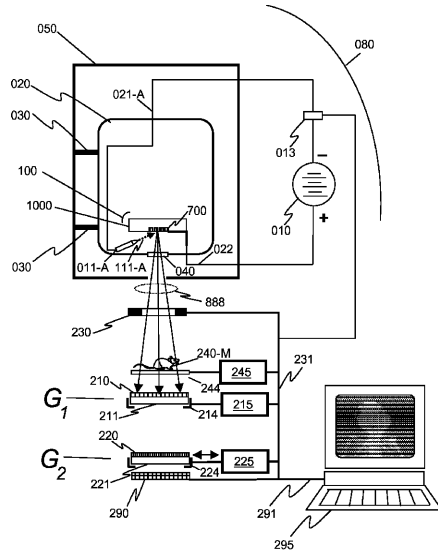


FIG. 20

【図 21】

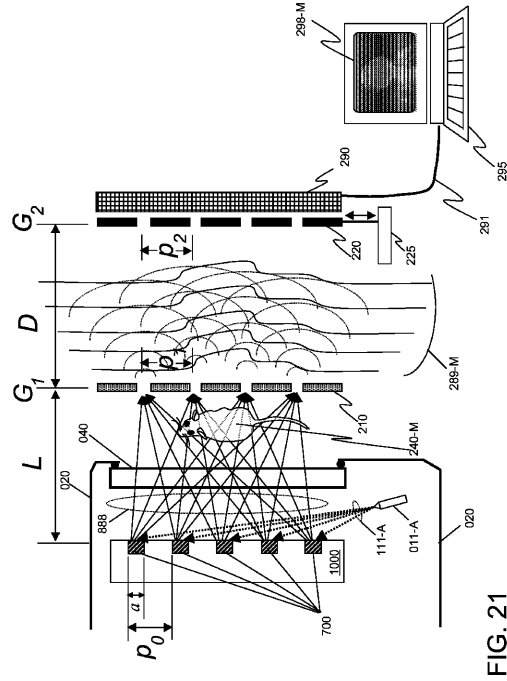


FIG. 21

【図 22】

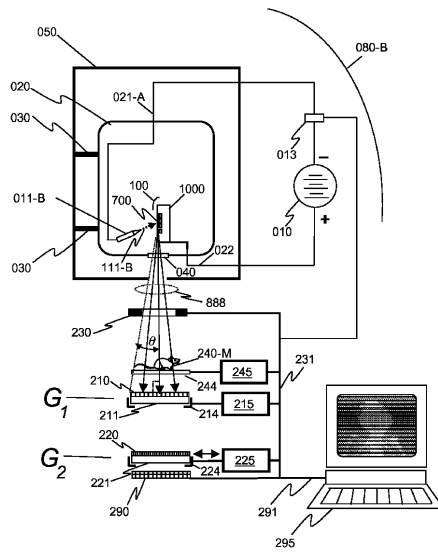


FIG. 22

【図 23】

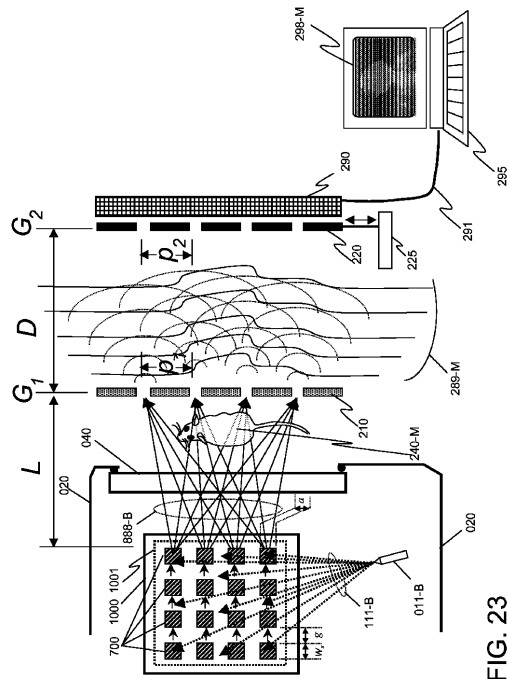


FIG. 23

【図 2 4】

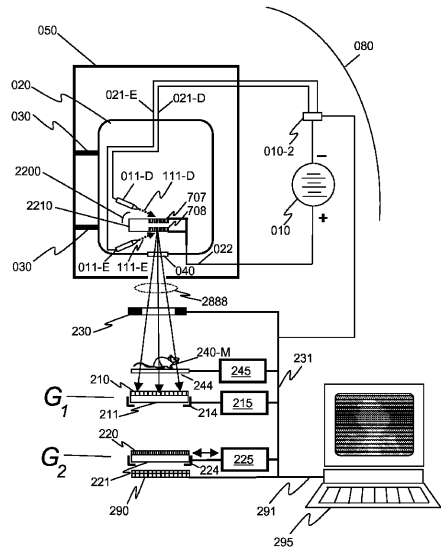


FIG. 24

【図 2 5】

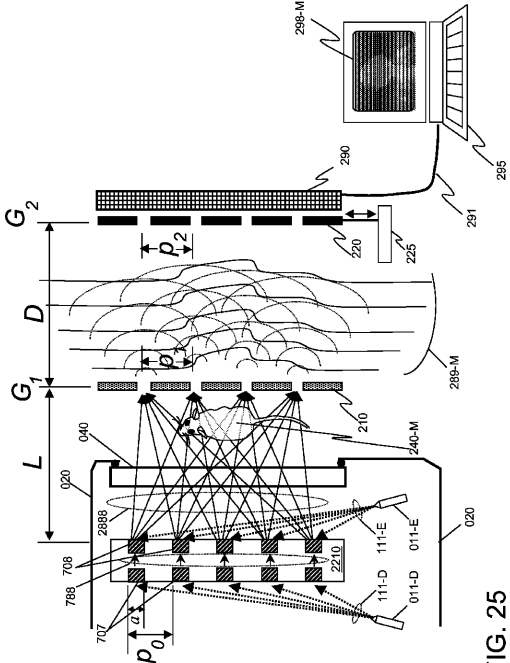


FIG. 25

【図 2 6】

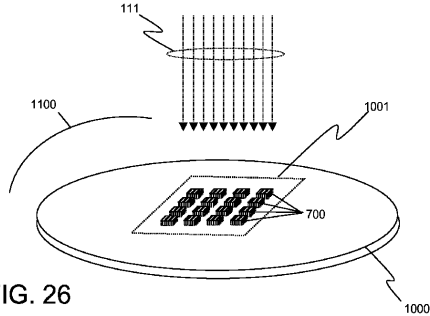


FIG. 26

【図 2 7】

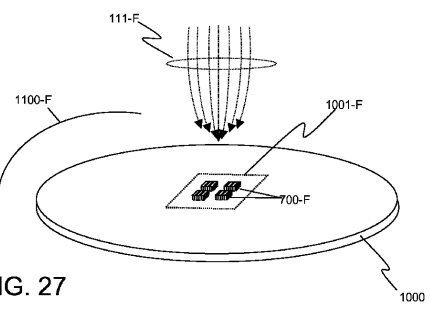


FIG. 27

【図 2 8 A】

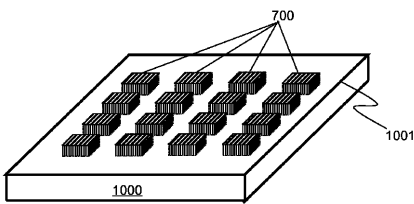


FIG. 28A

【図 2 8 B】

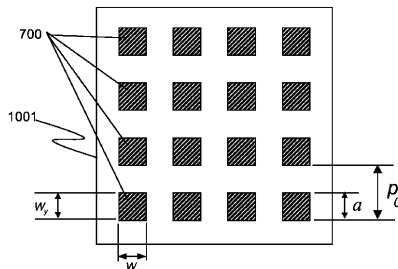


FIG. 28B

【図 2 8 C】

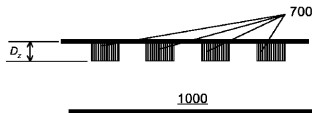


FIG. 28C

【図 29 A】

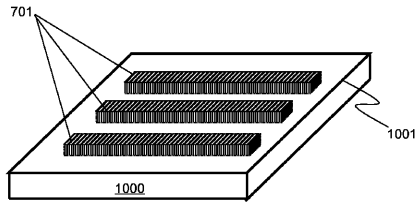


FIG. 29A

【図 29 B】

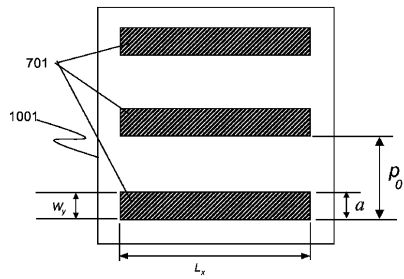


FIG. 29B

【図 29 C】

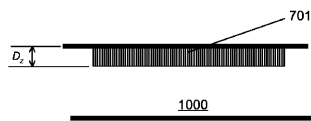


FIG. 29C

【図 32】

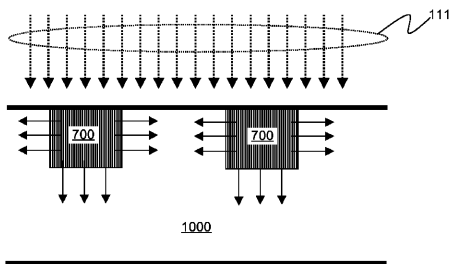


FIG. 32

【図 33】

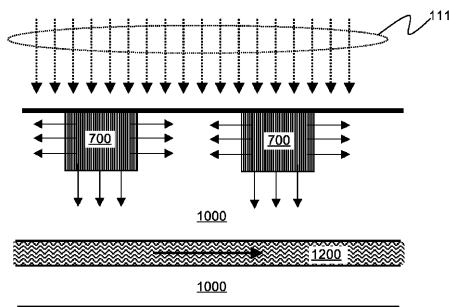


FIG. 33

【図 30】

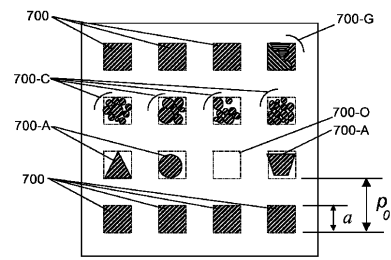


FIG. 30

【図 31】

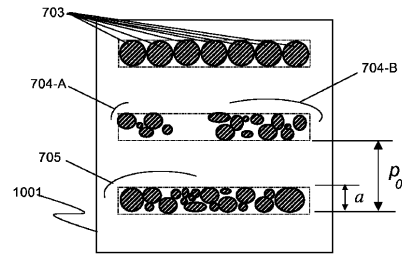


FIG. 31

【図 34】

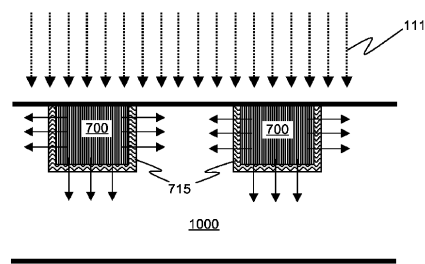


FIG. 34

【図 35】

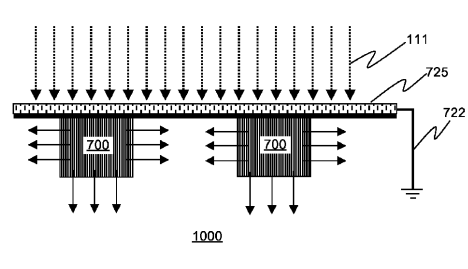


FIG. 35

【図 3 8】

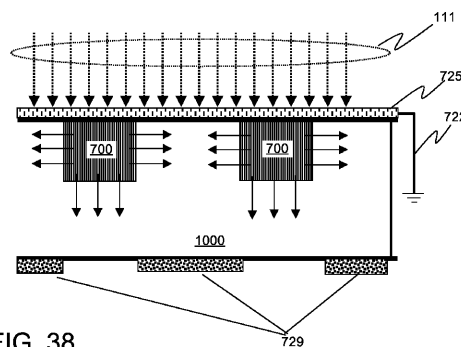


FIG. 38

FIG. 1 is a schematic diagram of a semiconductor device 1000. The device includes a substrate 111 and a layer 710. Two gate structures 702 are formed on the layer 710. Arrows indicate light or particles incident on the substrate 111, and other arrows show emission or reflection from the gate structures 702. A ground symbol is connected to the right side of layer 710.

FIG. 37

【図 40】

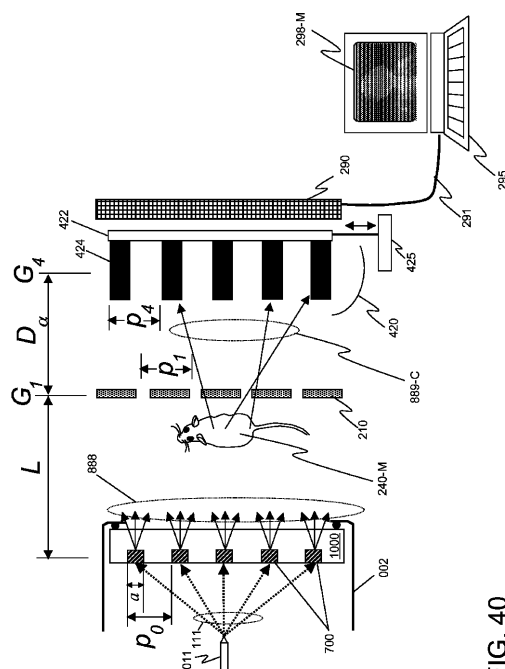


FIG. 40

【図 4 5】

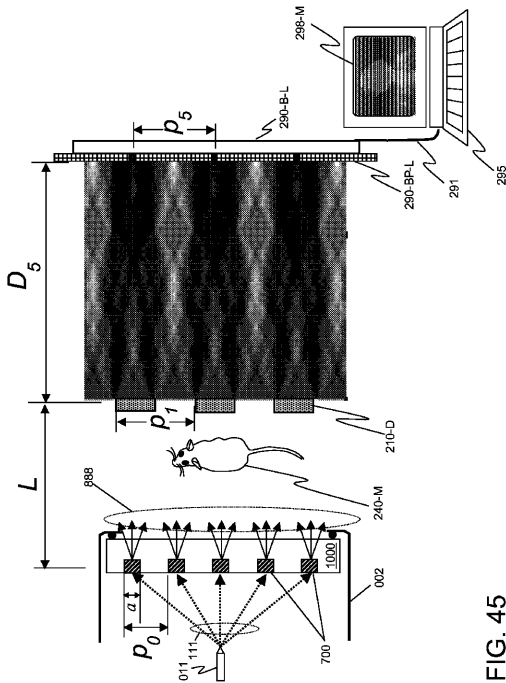


FIG. 45

【図 4 6】

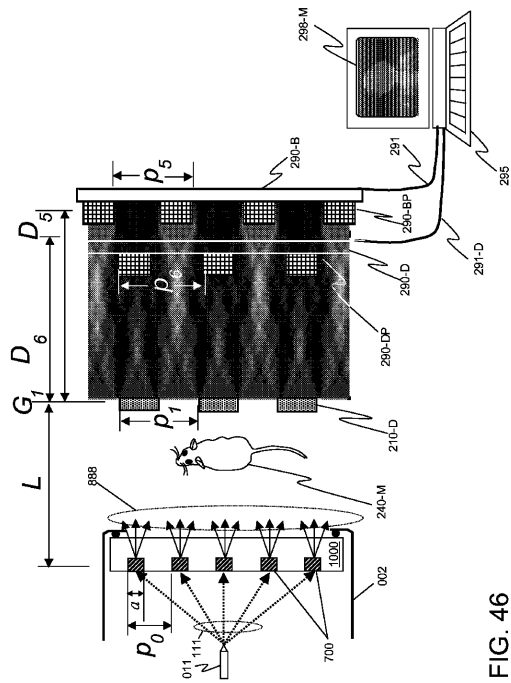


FIG. 46

【図 47】

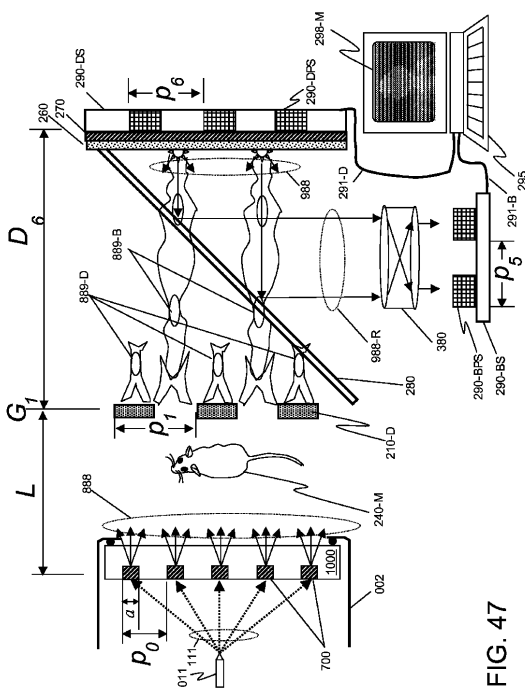
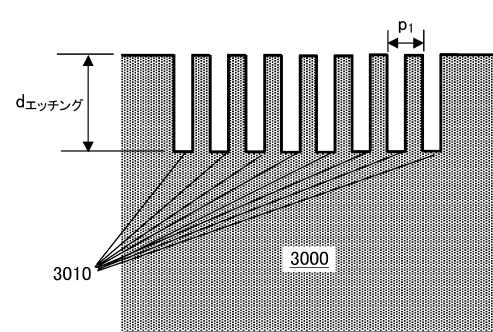


FIG. 47

【图 48】



【図 49】

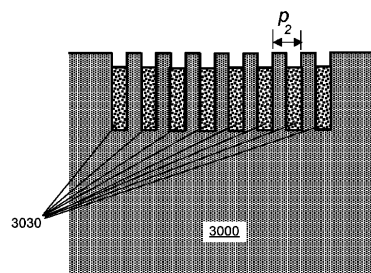


FIG. 49

フロントページの続き

- (31)優先権主張番号 61/991,889
(32)優先日 平成26年5月12日(2014.5.12)
(33)優先権主張国 米国(US)
(31)優先権主張番号 61/993,811
(32)優先日 平成26年5月15日(2014.5.15)
(33)優先権主張国 米国(US)
(31)優先権主張番号 14/527,523
(32)優先日 平成26年10月29日(2014.10.29)
(33)優先権主張国 米国(US)
(31)優先権主張番号 PCT/US2014/063164
(32)優先日 平成26年10月30日(2014.10.30)
(33)優先権主張国 米国(US)

- (72)発明者 ユン、ウェンビン
アメリカ合衆国、94520 カルフォルニア州、コンコード スイート ワン、イムホフ ドラ
イブ 5750 シグレイ、インコーポレイテッド内
(72)発明者 キーズ、ジャノス
アメリカ合衆国、94520 カルフォルニア州、コンコード スイート ワン、イムホフ ドラ
イブ 5750 シグレイ、インコーポレイテッド内

審査官 亀澤 智博

- (56)参考文献 特開2010-236986 (JP, A)
特開2009-195349 (JP, A)
特開2009-212058 (JP, A)
特開2011-218147 (JP, A)
国際公開第2013/111050 (WO, A1)
特開平06-188092 (JP, A)
特開2012-254294 (JP, A)
特開2012-032387 (JP, A)
特開2008-145111 (JP, A)
特開2004-089445 (JP, A)
特開2003-288853 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
A61B 6/00 - 6/14