

(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2011-237773

(P2011-237773A)

(43) 公開日 平成23年11月24日 (2011.11.24)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>G 0 2 B</b> 5/18 (2006.01)	G O 2 B 5/18	2 G O O 1
<b>G O 1 N</b> 23/04 (2006.01)	G O 1 N 23/04	2 H O 1 3
<b>G O 3 B</b> 42/02 (2006.01)	G O 3 B 42/02 Z	2 H 2 4 9

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2011-62025 (P2011-62025)	(71) 出願人	000001007
(22) 出願日	平成23年3月22日 (2011. 3. 22)		キヤノン株式会社
(31) 優先権主張番号	特願2010-91562 (P2010-91562)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(32) 優先日	平成22年4月12日 (2010. 4. 12)	(74) 代理人	100105289
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		弁理士 長尾 達也
		(72) 発明者	長井 健太郎
			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
		(72) 発明者	大内 千穂
			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 GA06
			LA01 SA01
			2H013 CZ01
			2H249 AA02 AA12 AA55 AA61

(54) 【発明の名称】 撮像装置及び撮像方法

## (57) 【要約】

【課題】本発明は、上記課題に鑑み、タルボ干渉によるモアレの周期を波数空間を用いて解析するに当たり、より分解能の高い解析が可能となる撮像装置および撮像方法を提供する。

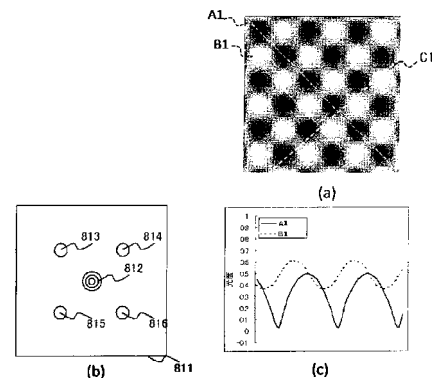
## 【解決手段】

撮像装置は、光源からの光を回折することで2次元の干渉パターンを形成する第1の格子と、前記光を遮蔽する遮蔽部と前記光を透過する透過部とが2次元に配列されており、

前記干渉パターンの一部を遮蔽する第2の格子と、前記第2の格子を経た前記光を検出する検出器と、前記検出器で検出した前記光の強度分布の周期的パターンに基づいて被検体の位相像又は微分位相像を算出する演算部と、を備え、

第1の方向における前記強度分布の周期が前記検出器の検出面上の全ての領域で等しくなるように前記第1の格子と前記第2の格子とが構成されている。

【選択図】 図4



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

光源からの光を回折することで 2 次元の干渉パターンを形成する第 1 の格子と、  
前記光を遮蔽する遮蔽部と前記光を透過する透過部とが 2 次元に配列されており、前記干渉パターンの一部を遮蔽する第 2 の格子と、  
前記第 2 の格子を経た前記光を検出する検出器と、  
前記検出器で検出した前記光の強度分布の周期的パターンに基づいて被検体の位相像又は微分位相像を算出する演算部と、を備え、  
第 1 の方向における前記強度分布の周期が前記検出器の検出面上の全ての領域で等しくなるように、前記第 1 の格子と前記第 2 の格子とが構成されていることを特徴とする撮像装置。

10

**【請求項 2】**

前記第 1 の方向と交差する第 2 の方向における前記強度分布の周期が前記検出器の前記検出面上のすべての領域で等しくなるように、前記第 1 の格子と前記第 2 の格子とが構成されていることを特徴とする請求項 1 に記載の撮像装置。

**【請求項 3】**

前記第 1 の方向と前記第 2 の方向とは垂直に交わることを特徴とする請求項 2 に記載の撮像装置。

**【請求項 4】**

前記第 1 の方向における前記強度分布の周期と、前記第 2 の方向における前記強度分布の周期が等しいことを特徴とする請求項 2 または請求項 3 に記載の撮像装置。

20

**【請求項 5】**

前記演算部はフーリエ変換法を用いて前記強度分布を解析することを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の撮像装置。

**【請求項 6】**

前記演算部は前記被検体の前記微分位相像を算出し、  
前記第 1 の方向及び前記第 2 の方向は前記微分位相像の微分方向であることを特徴とする請求項 2 から 5 のいずれか 1 項に記載の撮像装置。

**【請求項 7】**

前記光は、X 線であることを特徴とする請求項 1 から 6 のいずれか 1 項に記載の撮像装置。

30

**【請求項 8】**

光源からの光を回折することで 2 次元の干渉パターンを形成する第 1 の格子と、  
前記光を遮蔽する遮蔽部と透過する透過部とが 2 次元に配列されており、前記干渉パターンの一部を遮蔽する第 2 の格子と、  
前記第 2 の格子を経た前記光を検出する検出器と、  
前記検出器で検出した前記光の強度分布の周期的パターンに基づいて被検体の位相像又は微分位相像を算出する演算部と、を備え、  
前記干渉パターンは井桁格子状のパターンであり、  
前記第 2 の格子は、前記遮蔽部と前記透過部とが市松格子状に配置されていることを特徴とする撮像装置。

40

**【請求項 9】**

光源からの光を回折することで 2 次元の干渉パターンを形成する第 1 の格子と、  
前記光を遮蔽する遮蔽部と透過する透過部とが 2 次元に配列されており、前記干渉パターンの一部を遮蔽する第 2 の格子と、  
前記第 2 の格子を経た前記光を検出する検出器と、  
前記検出器で検出した前記光の強度分布の周期的パターンに基づいて被検体の位相像又は微分位相像を算出する演算部と、を備え、  
前記干渉パターンは井桁格子状のパターンであり、  
前記第 2 の格子は、前記遮蔽部と、前記透過部と、前記遮蔽部よりも光を透過させ、前

50

記透過部よりも光を遮蔽する半透過部とを有し、

前記遮蔽部と前記透過部と前記半透過部とが夫々市松格子状に並んだベイア配列に配置されていることを特徴とする撮像装置。

【請求項 10】

光源からの光を回折することで 2 次元の干渉パターンを形成する第 1 の格子と、

前記光を遮蔽する遮蔽部と透過する透過部とが 2 次元に配列されており、前記干渉パターンの一部を遮蔽する第 2 の格子と、

前記第 2 の格子を経た前記光を検出する検出器と、

前記検出器で検出した前記光の強度分布の周期的パターンに基づいて被検体の位相像又は微分位相像を算出する演算部と、を備え、

前記干渉パターンは市松格子状のパターンであり、

前記第 2 の格子は、前記遮蔽部と前記透過部とが市松格子状に配置されていることを特徴とする撮像装置。

10

【請求項 11】

光源からの光を回折することで 2 次元の干渉パターンを形成する第 1 の格子と、

前記光を遮蔽する遮蔽部と透過する透過部とが 2 次元に配列されており、前記干渉パターンの一部を遮蔽する第 2 の格子と、

前記第 2 の格子を経た前記光を検出する検出器と、

前記検出器で検出した前記光の強度分布の周期的パターンに基づいて被検体の位相像又は微分位相像を算出する演算部と、を備え、

前記干渉パターンは市松格子状のパターンであり、

前記第 2 の格子は、前記遮蔽部と前記透過部とが井桁格子状に配置されていることを特徴とする撮像装置。

20

【請求項 12】

第 1 の格子が光を回折することによって 2 次元の干渉パターンを形成する工程と、

前記光を遮蔽する遮蔽部と前記光を透過する透過部とが 2 次元に配列されている第 2 の格子により前記干渉パターンの一部が遮蔽される工程と、

前記第 2 の格子を経た光の強度分布が検出器により検出される工程と、

前記検出器により検出された前記強度分布の周期的パターンを前記演算部により解析して被検体の位相像又は微分位相像を算出する工程と、を備え、

第 1 の方向における前記強度分布の周期を前記検出器の検出面上において一定とし、

且つ、第 2 の方向における前記強度分布の周期が前記検出器の前記検出面上において一定であるように前記第 1 の格子と前記第 2 の格子とを構成して前記被検体を位相像又は微分位相像を取得することを特徴とする撮像方法。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、撮像装置および撮像方法に関し、特に、タルボ干渉を用いて被検体を撮像する撮像装置および撮像方法に関するものである。

【背景技術】

40

【0002】

可視光や X 線を含む様々な波長の光の干渉を利用したイメージング技術が知られている。

そのようなイメージング方法の 1 つとしてタルボ干渉法が知られている。

タルボ干渉法の概要を説明する。光を被検体に照射すると、被検体を透過することによって光の位相が変化する。

この光を特定のパターンを有した第 1 の格子（回折格子）に照射すると、第 1 の格子で回折された光は一定の距離で干渉して自己像と呼ばれる干渉パターンを形成する。この自己像を解析すると、被検体の位相に関する情報を得ることができる。

【0003】

50

また、特許文献 1 には自己像が形成される位置に光を遮蔽する遮蔽部と、光を透過する透過部を有する遮蔽格子を配置し、自己像の一部を遮蔽することによってモアレを形成させている。

記載されているような、自己像を用いてモアレを形成させ、このモアレを検出する方法を用いると、自己像の周期よりも大きな解像度の検出器を用いて被検体の位相に関する情報を得ることができる。

一般的に、光として X 線を用いると、自己像の周期が検出器の解像度よりも小さくなるため、特許文献 1 に記載されているようにモアレを形成される方法は光として X 線を用いる際に特に有効である。特許文献 1 に記載されている撮像装置は、自己像が形成される位置に光を遮蔽する遮蔽部と光を透過する透過部を有する第 2 の格子（遮蔽格子）を配置し、自己像の一部を遮蔽することによってモアレを形成させている。

10

#### 【0004】

第 2 の格子を用いてモアレを生じさせる方法には、幾つか種類がある。

例えば自己像と周期も含めて同じ形状を持った第 2 の格子を用い、その角度を微妙に回転させることにより視認性の高いモアレを出す方法がある。

また、自己像と僅かに周期の異なる第 2 の格子を用いてモアレを出す手法もある。

いずれにせよ、自己像をモアレによって強調するという点では同じである。

また、このモアレの変位から被検体による光の波面形状の変化を計算する方法も幾つか存在する。

その一つがモアレの周期を波数空間を用いて解析する方法であり、具体的にはフーリエ変換やウェーブレット変換等が挙げられる。

20

但し、本明細書においてフーリエ変換は窓関数付フーリエ変換を含む。

非特許文献 1 には、フーリエ変換法を用いてモアレをフーリエ変換し、波数空間上のモアレ成分を抽出解析する方法が記載されている。この方法の原理を簡単に説明する。

まず、検出結果をフーリエ変換し空間周波数スペクトルを得る。次にモアレの基本周期成分の周波数（以後、キャリア周波数と呼ぶ）のスペクトル及びその周辺を切り出して原点に移動する。

この周波数スペクトルを逆フーリエ変換して被検体の微分位相像を求め、さらに積分することで被検体の位相像が得られる。

30

#### 【先行技術文献】

##### 【特許文献】

##### 【0005】

【特許文献 1】米国特許第 5 8 1 2 6 2 9 号明細書

##### 【非特許文献】

##### 【0006】

【非特許文献 1】M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, J. Opt. Soc. Am. 72, 156 - 160 (1982).

##### 【発明の概要】

##### 【発明が解決しようとする課題】

##### 【0007】

40

非特許文献 1 で開示されている技術は 1 次元のフーリエ変換法であり、この変換法では、2 次元方向の微分位相像を得ることはできない。

そこで、タルボ干渉計における第 1 の格子を 2 次元構造にすることにより、2 次元のパターンを持つ自己像を形成する。そして、その自己像に対応した適切な形状の第 2 の格子を設置することにより 2 次元のモアレを出現させることができる。

しかし、モアレの周期を波数空間を用いて解析する場合には、どのような形状のモアレでも同様な精度で光の位相を回復できるわけではない。

すなわち、モアレの周期を波数空間を用いて解析する方法を用いた位相回復に際しては、第 1 の格子と第 2 の格子の組合せによっては、精度の点で必ずしも満足の行く結果が得られないことがある。

50

このため、第 1 の格子と第 2 の格子の組合せにより、波数空間を用いて解析する方法に適したモアレを形成することが重要な課題となる。

【 0 0 0 8 】

そこで、本発明は、上記課題に鑑み、タルボ干渉によるモアレの周期を波数空間を用いて解析するに当たり、より分解能の高い解析が可能となる撮像装置および撮像方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 9 】

本発明の撮像装置は、光源からの光を回折することで 2 次元の干渉パターンを形成する第 1 の格子と、

10

前記光を遮蔽する遮蔽部と前記光を透過する透過部とが 2 次元に配列されており、前記干渉パターンの一部を遮蔽する第 2 の格子と、

前記第 2 の格子を経た前記光を検出する検出器と、

前記検出器で検出した前記光の強度分布の周期的パターンに基づいて被検体の位相像又は微分位相像を算出する演算部と、を備え、

第 1 の方向における前記強度分布の周期が前記検出器の検出面上の全ての領域で等しくなるように、前記第 1 の格子と前記第 2 の格子とが構成されていることを特徴とする。

また、本発明の撮像方法は、第 1 の格子が光を回折することによって 2 次元の干渉パターンを形成する工程と、

前記光を遮蔽する遮蔽部と前記光を透過する透過部とが 2 次元に配列されている第 2 の格子により前記干渉パターンの一部が遮蔽される工程と、

20

前記第 2 の格子を経た光の強度分布が検出器により検出される工程と、

前記検出器により検出された前記強度分布の周期的パターンを前記演算部により解析して被検体の位相像又は微分位相像を算出する工程と、を備え、

第 1 の方向における前記強度分布の周期を前記検出器の検出面上において一定とし、

且つ、第 2 の方向における前記強度分布の周期が前記検出器の前記検出面上において一定であるように前記第 1 の格子と前記第 2 の格子とを構成して前記被検体を位相像又は微分位相像を取得することを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 1 0 】

30

本発明によれば、タルボ干渉によるモアレの周期を波数空間を用いて解析するに当たり、より分解能の高い解析が可能となる撮像装置および撮像方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 1 】

【図 1】実施形態に関する X 線位相イメージングの装置構成を示す図である。

【図 2】( a ) は実施形態に関する第 1 の格子を示す図、( b ) は実施形態に関する自己像を示す図である。

【図 3】実施形態に関する第 2 の格子を示す図である。

【図 4】( a ) は実施形態に関するモアレを示す図、( b ) は実施形態に関するモアレをフーリエ変換したものの概略図、( c ) は実施形態に関するモアレの強度分布を示す図である。

40

【図 5】実施形態による波面解析の結果を示した図である。

【図 6】( a ) は実施例 2 に関する第 2 の格子を示す図、( b ) は実施例 2 に関するモアレを示す図、( c ) は実施例 2 に関するモアレをフーリエ変換したものの概略図、( d ) は実施例 2 に関するモアレの強度分布を示す図である。

【図 7】実施例 2 による波面解析の結果を表した図である。

【図 8】( a ) は実施例 3 に関する第 1 の格子を示す図、( b ) は実施例 3 に関する自己像を示す図である。

【図 9】( a ) は実施例 3 に関する第 2 の格子を示す図、( b ) は実施例 3 に関するモアレを示す図、( c ) は実施例 3 に関するモアレをフーリエ変換したものの概略図、( d )

50

は実施例 3 に関するモアレの強度分布を示す図である。

【図 10】実施例 3 による波面解析の結果を表した図である。

【図 11】(a) は実施例 4 に関する第 2 の格子を示す図、(b) は実施例 4 に関するモアレを示す図、(c) は実施例 4 に関するモアレをフーリエ変換したものの概略図、(d) は実施例 4 に関するモアレの強度分布を示す図である。

【図 12】実施例 4 による波面解析の結果を表した図である。

【図 13】被検体を示す図である。

【図 14】(a) はフーリエ変換を用いた位相回復法手順の一例を示す図、(b) はフーリエ変換を用いた位相回復法手順の一例を示す図、(c) はフーリエ変換を用いた位相回復法手順の一例を示す図、(d) はフーリエ変換を用いた位相回復法手順の一例を示す図である。

10

【図 15】(a) は比較例に関する第 2 の格子を示す図、(b) は比較例に関するモアレを示す図、(c) は比較例に関するモアレをフーリエ変換したものの概略図、(d) は比較例に関するモアレの強度分布を示す図である。

【図 16】比較例による波面解析の結果を表した図である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下、本発明の実施形態を添付の図面に基づいて詳細に説明する。

本実施形態の撮像装置は、光として波長が 10 nm 以下の X 線を用い、タルボ干渉によるモアレの周期的パターンを窓フーリエ変換法により解析し、被検体の位相像又は微分位相像を得る。

20

図 1 に本実施形態に用いられる撮像装置を示す。

本実施形態の撮像装置は、空間的に可干渉な X 線を放出する X 線源 110、X 線を回折することで 2 次元の干渉パターンを形成する第 1 の格子 130、X 線を遮蔽する遮蔽部と X 線が透過する透過部が 2 次元周期的に配列された第 2 の格子 140 を備えている。

また、第 2 の格子を経た X 線の強度分布を検出する検出器 150、検出結果を解析する演算装置 160 を備えている。

本実施形態の撮像装置は光源として X 線源 110 を備えている。X 線源 110 から出射した X 線は、被検体 120 を透過すると被検体の屈折率及び形状に応じて位相が変化する。

図 1 では、被検体 120 を X 線源 110 と第 1 の格子 130 の間に配置しているが、第 1 の格子 130 と第 2 の格子 140 の間に配置しても良い。

30

第 1 の格子 130 は位相格子と呼ばれる透過型の回折格子で、二種類の透過特性を持った箇所が 2 次元の周期構造を持つように配置されている。そのため、第 1 の格子を透過した X 線は一定の距離を隔てて明部と暗部が 2 次元周期的に配列された自己像を形成する。

【0013】

本実施形態に用いられる第 1 の格子を図 2 (a) に示す。但し、図 2 (a) は第 1 の格子の一部を拡大して示した図である。

図 2 (a) は一方の領域 301 を透過した X 線が、他方の領域 302 を透過した X 線より位相が相対的にずれることを特徴とした格子である (格子)。

図 2 (b) は図 2 (a) の位相格子を用いた時に形成される自己像である。自己像は暗部 311 と明部 312 が周期 p1 で井桁格子状に配置されており、この自己像は 2 次元に周期を持つ。

40

但し、図 2 (b) に示した自己像は X 線源と第 1 の格子の間に被検体が置かれていないときの自己像である。以下、特に断りのない限り、本明細書で自己像の形状について説明する際は X 線源と第 1 の格子の間に被検体が置かれていないときの自己像を指す。

また、本実施形態では図 2 (a) に示した第 1 の格子を用いて図 2 (b) に示した自己像を形成したが、本発明に用いられる第 1 の格子はこれに限定されず、第 1 の格子によって形成される自己像もこれに限定されない。

【0014】

X 線を用いた位相イメージングを行う場合、第 1 の格子の周期は数ミクロンメートル程

50

度になる。

これは、タルボ干渉計の場合、第 1 の格子周期を  $d$ 、入射光の波長を  $\lambda$ 、としたとき、タルボ距離と呼ばれる基本距離  $z$  が、

$$z = d^2 / \lambda \quad \dots \dots (1)$$

で与えられるためである。

実際には第 1 の格子の形状や所望するコントラストによって (1) 式に様々な係数がかかる。

しかし、この (1) 式を基準とすると第 1 の格子と自己像までの距離を装置の大きさと鑑みて数 10 センチメートル程度にするには、第 1 の格子の格子周期を数ミクロン程度のオーダーにする必要がある事がわかる。

また、その結果自己像の周期も数ミクロンメートル程度になる。一般的に使用されている X 線の検出器の分解能は高くても数 10 ミクロン程度であり、自己像の周期と差がある。そのためこのままでは自己像が撮像できないため本実施形態の撮像装置ではモアレを利用して自己像を強調している。

#### 【0015】

本実施形態では、第 2 の格子 140 を用いてモアレを形成している。本実施形態における第 2 の格子を図 3 に示す。但し、図 3 は第 2 の格子の一部を拡大して示した図である。第 2 の格子 140 は X 線を遮蔽する遮蔽部 802 と X 線を透過する透過部 801 が周期  $p_2$  で市松格子状に配置されており、第 2 の格子は 2 次元に周期を持つ。第 2 の格子 140 の周期  $p_2$  は自己像の周期  $p_1$  とは僅かに異なっており、周期の差異によって明暗のうねり、すなわちモアレが生じる。

図 2 (a) に示した第 1 の格子と図 3 に示した第 2 の格子を用いて形成されるモアレを図 4 (a) に示す。モアレとフーリエ変換については後ほど説明をする。尚、図 4 (a) に示したモアレは X 線源と第 1 の格子の間または第 1 の格子と第 2 の格子の間に被検体が置かれていないときのモアレである。以下、特に断りのない限り、本明細書でモアレ形状について説明する際は X 線源と第 1 の格子の間または第 1 の格子と第 2 の格子の間に被検体が置かれていないときのモアレを指す。また、本実施形態では、遮蔽部と透過部が市松格子状に配列された第 2 の格子 140 を用いたが、本発明に用いられる第 2 の格子はこれに限定されない。また、遮蔽部は完全に X 線を遮蔽しなくても良いし、透過部は完全に X 線を透過しなくても良い。但し、遮蔽部と透過部は自己像に重ねることでモアレを形成することができる程度に X 線を遮蔽あるいは透過する必要がある。

#### 【0016】

検出器 150 は X 線の強度を検出することができる撮像素子（例えば CCD）であり、第 2 の格子を経た X 線の強度分布つまりモアレを検出する。

検出器 150 が検出した X 線の強度分布は演算部 160 によって解析される。

本実施形態では、窓関数付フーリエ変換法（窓フーリエ変換）に基づいた手法を用いて被検体の位相像又は微分位相像を得る。

窓フーリエ変換とは、モアレに局所的な値を持つ窓関数をかけながら逐次フーリエ変換を行って位相を決定する処理である。この処理はデータ量が多く、時間がかかるものの、窓関数を用いないフーリエ変換法より正確で精密な位相回復が可能である。

#### 【0017】

ここで、フーリエ変換による位相回復方法についてその概念を簡単に説明する。図 14 はその概略を示す図である。

フーリエ変換法ではモアレをフーリエ成分に分解し、特定の周波数領域に対して解析を行い画像復元する技術である。

図 14 (a) は解析する前のモアレの一例である。

画面 201 内に周期的なモアレ 202 が形成されている。このモアレの位置ずれが被検体による X 線の位相変化に関する情報を表している。

このモアレ 2 0 2 を画面 2 0 1 全体でフーリエ変換すると図 1 4 ( b ) のようになる。  
ここでは、波数空間の原点を画面 2 1 1 の中心に置いている。波数空間上では原点に 0 次  
スペクトル 2 1 2 が現れ、その周りに 1 次スペクトルである 2 1 3、2 1 4、2 1 5、2  
1 6 が現れる。

原点周りのスペクトルの位置と数はフーリエ変換前のモアレの形状に依存する。このスペ  
クトルのうち少なくとも一つを波面解析に利用する。一般的には 1 次スペクトル点のどれ  
かを利用する。

#### 【 0 0 1 8 】

非特許文献 1 に従った方法では、この 1 次スペクトル点の一点とその周囲をカッティン  
グし、これを別の波数空間 2 2 1 上の原点 2 2 2 に移動させる ( 図 1 4 ( c ) ) 。

10

これを逆フーリエ変換することによって被検体の微分像 2 3 2 が実空間 2 3 1 上に取得で  
きる ( 図 1 4 ( d ) ) 。この微分像 2 3 2 を積分することによって波面を回復する。

上記の方法はフーリエ変換法の一例であって、本発明はこのような解析手法に限定される  
ものではなく、その他の手法も用いることができる。

例えば、波数空間を更に詳しく解析するために複数のスペクトル点を利用しても良い。

#### 【 0 0 1 9 】

本実施形態において検出したモアレの強度分布から被検体の位相像または微分位相像を  
得る解析方法について簡単に説明をする。本実施形態におけるモアレ ( 図 4 ( a ) ) を検  
出器 1 5 0 の検出面全体でフーリエ変換したものを概略的に表すと図 4 b の形となる。

図 4 ( b ) には波数空間 8 1 1 の中央に 0 次スペクトル 8 1 2 が、その周りに 1 次スペク  
トル 8 1 3、8 1 4、8 1 5、8 1 6 が存在する。

20

この 1 次スペクトルから図 1 4 で示したように少なくとも一つ以上の任意のスペクトルを  
解析すると被検体の微分位相像が得られる。また、これを積分すると被検体の位相像が得  
られる。

#### 【 0 0 2 0 】

図 4 ( c ) は図 4 ( a ) のモアレの軸 A 1 と軸 B 1 に沿った X 線の強度分布を示したも  
ので、軸 A 1 に沿った強度分布を実線、軸 B 1 に沿った強度分布を破線で示した。軸 B 1  
は軸 A 1 と平行である。図 4 ( c ) に示した通り、軸 A 1 に沿った強度分布と、軸 B 1 に  
沿った強度分布は形状や振幅は異なるものの、同じ周期を有している。

軸 B 1 以外でも同様に、図 4 ( a ) に示したモアレは軸 A 1 と平行な全ての軸に沿った強  
度分布は、軸 A 1 に沿った強度分布と、同じ周期を有する強度分布が得られる。

30

つまり、図 4 ( a ) の軸 A 1 と平行な方向を第 1 の方向とすると、図 4 ( a ) に示したモ  
アレは第 1 の方向において、強度分布の周期がモアレ上 ( 検出器の検出面上 ) の全ての領  
域で等しい。

また、このモアレは 2 次元に周期を有しており、軸 A 1 と垂直な軸 C 1 に沿った強度分布  
も周期を有している。

また、軸 A 1 と同様に軸 C 1 と平行な方向を第 2 の方向とすると、図 4 ( a ) に示したモ  
アレは上記第 1 の方向と交差する第 2 の方向において、強度分布の周期がモアレ上の全て  
の領域で等しい。

但し、本明細書におけるモアレ上の全ての領域とは、波数空間を用いた解析 ( 例えばフー  
リエ変換 ) に用いない領域を含まない。

40

フーリエ変換法では正しく X 線の波面微分を計算するために微分方向に沿った断面の X 線  
強度分布の周期が等しいことが必要であり、この強度分布の形状は正弦波の形を有してい  
ることがより望ましい。

#### 【 0 0 2 1 】

上述したように、図 4 ( a ) の軸 A 1 と平行な方向を第 1 の方向とすると、図 4 ( a )  
に示したモアレは第 1 の方向において、強度分布の周期がモアレ上の全ての領域で等しい  
。

また、図 4 ( a ) の軸 C 1 と平行な方向を第 2 の方向とすると、図 4 ( a ) に示したモア  
レは第 2 の方向においても強度分布の周期がモアレ上の全ての領域で等しい。

50



そのため、第 1 の方向と第 2 の方向を微分方向とすると、モアレ上の全ての領域からフーリエ変換によってその周期のスペクトルが抽出できるため、従来と比べて被検体による X 線の位相変化が詳細に解析することが可能となる。尚、微分方向は 1 つでも良いため、第 1 の方向又は第 2 の方向のみを微分方向としても従来（微分方向は 1 つ）と比べて被検体による X 線の位相変化を詳細に解析することができる。

#### 【 0 0 2 2 】

以下に、具体的な実施例及び比較例について説明する。

以下の実施例及び比較例では、図 1 3 に示すようなシリコン上にパターンニングされた厚さ 40 ミクロンメートルの円形のパターンを被検体として用いた場合に得られる微分位相像を算出し、各実施例と比較例を比較した。

尚、図中ではパターンの高さをコントラストで表現している。

まず、比較例について説明する。

#### 〔 比較例 〕

図 1 5 を用いて本比較例について説明をする。

本比較例の撮像装置は実施形態で説明した撮像装置と第 2 の格子が異なり、それ以外の構成は実施形態の撮像装置と同じである。

本比較例の撮像装置は光源としては 17.5 keV の平行 X 線を出射する X 線源、第 1 の格子としては図 2 ( a ) に示した位相格子（格子）、第 2 の格子としては図 1 5 ( a ) に示した構造を有する格子を備え、その他に検出器と、演算部を備えている。

図 1 5 ( a ) は、第 2 の格子の形状の一部を拡大した概略図である。本比較例の第 2 の格子は入射した X 線が透過する透過部 601 と、入射した X 線が遮蔽する遮蔽部 602 を有する。第 2 の格子は第 1 の格子とは僅かに違う周期を持っており、その差異によって図 1 5 ( b ) に示すようなモアレが生じる。

#### 【 0 0 2 3 】

図 1 5 ( b ) に示すモアレをフーリエ変換したものの模式図を図 1 5 ( c ) に示す。

図 4 ( b ) と同様に波数空間 611 の中央に 0 次スペクトル 612 と、その周りに 1 次スペクトル 613、614、615、616 が存在する。この 1 次スペクトルから任意のスペクトルを解析し、被検体の微分位相像を算出する。

#### 【 0 0 2 4 】

図 1 6 は、この本比較例で得られた被検体の微分位相像である。

この図では、図 1 3 の被検体を x 軸（横軸）方向に微分した形状になる。全体的に形状を再現しているが、細かく見ると本来丸いはずの形状に階段状のノイズ（ジャギー）が存在し詳細な形状が再現できていない。

これは第 1 の格子による自己像と第 2 の格子の組合せによるモアレの形状が波面の回復に適していないためである。

#### 【 0 0 2 5 】

図 1 5 ( d ) は図 1 5 a のモアレの軸 A5 と軸 B5 に沿った X 線の強度分布を示したもので、軸 A5 に沿った強度分布を実線、軸 B5 に沿った強度分布を破線で示した。

軸 B5 は軸 A5 と平行である。上述したように、フーリエ変換法では微分方向に沿った X 線強度分布の周期が等しいことが必要である。

図 1 5 ( d ) に示すように、軸 A5 に沿った X 線の強度分布は三角波の形状を有しておりフーリエ変換を用いた解析可能な周期を持っているが、軸 B5 に沿った X 線の強度分布は軸上において恒常的に 0 になっており、この B5 の軸に関する波面の情報は得られないことになる。

そのため、波面が詳細に解析できず図 1 6 のような全体的に階段状のジャギーが出現する。

#### 【 0 0 2 6 】

#### 〔 実施例 1 〕

図 4 を用いて実施例 1 について説明をする。

実施例 1 は実施形態で説明をした撮像装置と同じ構成であり、比較例とは第 2 の格子が異

10

20

30

40

50

なる。つまり、本実施例の撮像装置の光源は  $17.5 \text{ keV}$  の平行 X 線を出射する X 線源、第 1 の格子は図 2 ( a ) に示した位相格子、第 2 の格子は図 3 に示した構造を有する格子であり、その他に検出器と、演算部を備えている。上述した通り、第 2 の格子の周期  $p_2$  は第 1 の格子の周期  $p_1$  とは僅かに異なっており、その差異によって図 4 ( a ) に示したようなモアレが形成され、このモアレをフーリエ変換したものが図 4 ( b )、モアレ上の軸 A 1、軸 B 1 に沿った X 線の強度分布が図 4 ( c ) の実線と破線である。

図 4 ( b ) の 1 次スペクトル 8 1 3、8 1 4、8 1 5、8 1 6 から任意のスペクトルを 1 つ選び、解析し、被検体の微分位相像を算出する。

図 5 は本実施例で得られた微分位相像である。

比較例と比べると、1 次スペクトルの位置が斜め 45 度方向にあるため、微分位相像も図 16 と比べると斜め 45 度に傾いている。しかし、その違いを除くと図 16 の微分位相像に比べてエッジのジャギーが目立たず、詳細な形状再現できている。

#### 【0027】

上述の通り、図 4 ( c ) は図 4 ( a ) のモアレの軸 A 1 と軸 B 1 に沿った X 線の強度分布を示したもので、軸 A 1 に沿った強度分布と、軸 B 1 に沿った強度分布は形状や振幅は異なるものの、同じ周期を有している。

軸 B 1 以外でも同様であり、図 4 ( a ) の軸 A 1 と平行な方向を第 1 の方向とすると、図 4 ( a ) に示したモアレは第 1 の方向において、強度分布の周期がモアレ上の全ての領域で等しい。

そのため、第 1 の方向を微分方向とすると、モアレ上の全ての領域からフーリエ変換によってその周期のスペクトルが抽出できるため波面を詳細に解析することができ、比較例と比べて詳細な形状を解析することが可能となる。

#### 【0028】

##### [ 実施例 2 ]

実施例 2 として、半透過部を有する第 2 の格子を用いた撮像装置について図 6 を用いて説明する。実施例 2 の撮像装置は、第 2 の格子以外は実施例 1 と同様の構造を持つ。

本実施例の第 2 の格子の構造を図 6 ( a ) に示す。図 6 ( a ) は第 2 の格子の形状の一部を拡大した模式図である。1001 は入射した X 線の透過部を表し、1002 は遮蔽部を表す。

更に、本実施例に用いられる第 2 の格子には入射した X 線のうち 50 % が透過するような半透過部 1003 が存在する。

本実施例の半透過部を X 線が透過すると、入射した X 線の強度は半分になるが、遮蔽部よりも X 線を透過させ、透過部よりも X 線を遮蔽すれば良い。

本実施例の第 2 の格子は、遮蔽部と、透過部と、半透過部が図 6 ( a ) に示すように夫々市松格子状に配列されており、遮蔽部と、透過部と、半透過部がいわゆるペイヤ配列に配置されている。

実施例 1 と同様に第 2 の格子の周期は自己像の周期と僅かに異なり、その差異によって図 6 ( b ) に示すようなモアレが形成される。

実施例 1 同様、このモアレをフーリエ変換したものが図 6 ( c )、モアレ上の軸 A 2 に沿った X 線の強度分布が図 6 ( d ) の実線、軸 B 2 に沿った X 線の強度分布が図 6 ( d ) の破線である。

#### 【0029】

図 6 ( b ) に示したモアレをフーリエ変換すると図 6 ( c ) の様なスペクトルが出現する。

図 4 ( b ) と同様に、図 6 ( c ) も波数空間 1011 の中央に 0 次スペクトル 1012、その周りに 1 次スペクトル 1013、1014、1015、1016 が存在する。

図 6 ( c ) の 1 次スペクトル 1013、1014、1015、1016 から任意のスペクトルを 1 つ選び、解析し、被検体の微分位相像を算出する。

図 7 は本実施例で得られた微分位相像である。

比較例と同じ位置に 1 次スペクトルが現れており、図 16 の微分位相像に比べてエッジの

10

20

30

40

50

ジャギーが目立たず、詳細な形状再現できている。

#### 【 0 0 3 0 】

図 6 ( d ) は図 6 ( b ) のモアレの軸 A 2 と軸 B 2 に沿った X 線の強度分布を示したものである。図 4 ( a ) のモアレ同様、図 6 ( b ) のモアレも軸 A 2 と平行な方向を第 1 の方向とすると、第 1 の方向において強度分布の周期がモアレ上の全ての領域で等しいため、実施例 1 同様、比較例と比べて詳細な形状を解析することが可能となる。

また、図 4 ( a ) のモアレとは異なり、図 6 に示す軸 B 2 のモアレは第 1 の方向において強度分布が振幅や形状も揃っており、モアレ上の全ての領域で同じパターンが同じ周期で繰り返されている。そのため、フーリエ変換によってその周期のスペクトルの抽出が容易にできる。

#### 【 0 0 3 1 】

##### [ 実施例 3 ]

実施例 3 では実施例 1 の撮像装置と異なる自己像を形成する撮像装置について図 8 と図 9 を用いて説明する。実施例 3 の撮像装置は、第 1 の格子と第 2 の格子以外は実施例 1 と同様の構造を持つ。

本実施例に用いた第 1 の格子を図 8 ( a ) に示した。但し、図 8 ( a ) は第 1 の格子の一部を拡大した概略図である。

図 8 ( a ) は一方の領域 4 0 1 を透過した x 線が、他方の領域 4 0 2 を透過した x 線より位相が相対的に  $\pi/2$  ずれることを特徴とした格子である ( $\pi/2$  格子)。また、図 8 ( b ) は図 8 a の位相格子を用いた時に形成される自己像である。自己像は暗部 4 1 1 と明部 4 1 2 が周期市松格子 (チェッカーボード) 状に配置されており、この自己像は 2 次元に周期を持つ。

本実施例に用いた第 2 の格子を図 9 ( a ) に示した。但し、図 9 ( a ) は第 2 の格子の一部を拡大した概略図である。本実施例に用いた第 2 の格子は X 線を透過する透過部 1 2 0 1 と、X 線を遮蔽する遮蔽部 1 2 0 2 が市松格子状に配置されている。第 2 の格子は第 1 の格子とは僅かに違う周期を持っており、その差異によって図 9 ( b ) に示したようなモアレが生じる。実施例 1 同様、このモアレをフーリエ変換したものが図 9 ( c )、モアレ上の軸 A 3 に沿った X 線の強度分布が図 9 ( d ) の実線、軸 B 3 に沿った X 線の強度分布が図 9 ( d ) の破線である。

#### 【 0 0 3 2 】

図 9 ( b ) に示したモアレをフーリエ変換すると図 9 ( c ) の様なスペクトルが出現する。図 4 ( b ) と同様に、同様に、波数空間 1 2 0 3 の中央に 0 次スペクトル 1 2 0 4 とその周りに 1 次スペクトル 1 2 0 5、1 2 0 6、1 2 0 7、1 2 0 8 が存在する。

図 1 0 は本実施例で得られた微分位相像である。

比較例と比べると、1 次スペクトルの位置が斜め 4 5 度方向にあるため、微分位相像も図 1 6 と比べると斜め 4 5 度に傾いている。しかし、その違いを除くと図 1 6 の微分位相像に比べてエッジのジャギーが目立たず、詳細な形状が再現できている。

図 9 ( d ) は図 9 ( b ) のモアレの軸 A 3 と軸 B 3 に沿った X 線の強度分布を示したものである。図 4 ( a ) のモアレ同様、図 9 ( b ) のモアレも軸 A 3 と平行な方向を第 1 の方向とすると、第 1 の方向において強度分布の周期がモアレ上の全ての領域で等しいため、実施例 1 同様、比較例と比べて詳細な形状を解析することが可能となる。

#### 【 0 0 3 3 】

##### [ 実施例 4 ]

実施例 4 では実施例 3 と同じ第 1 の格子を用いる撮像装置について図 1 1 を用いて説明をする。本実施例は実施例 3 と用いる第 2 の格子が異なり、その他の構成は同じである。

図 1 1 ( a ) は第 2 の格子の一部を拡大した概略図である。

本実施例に用いられる第 2 の格子は X 線の透過部 1 4 0 1 と遮蔽部 1 4 0 2 が井桁格子状に配置されたものが自己像に対して 4 5 ° 回転したような形状を有している。第 2 の格子は第 1 の格子とは僅かに違う周期を持っており、その差異によって図 1 1 ( b ) に示したようなモアレが生じる。実施例 1 同様、このモアレをフーリエ変換したものが図 1 1 ( c

）、モアレ上の軸 A 4 に沿った X 線の強度分布が図 1 1 ( d ) の実線、軸 B 4 に沿った X 線の強度分布が図 1 1 ( d ) の破線である。

【 0 0 3 4 】

図 1 1 ( b ) に示したモアレをフーリエ変換すると図 1 1 ( c ) の様なスペクトルが出現する。図 4 ( b ) と同様に、図 1 1 ( c ) も波数空間に波数空間 1 4 1 1 の中央に 0 次スペクトル 1 4 1 2 とその周りに 1 次スペクトル 1 4 1 3、1 4 1 4、1 4 1 5、1 4 1 6 が存在する。

図 1 0 は本実施例で得られた微分位相像である。

比較例と比べると、1 次スペクトルの位置が斜め 4 5 度方向にあるため、微分位相像も図 1 6 と比べると斜め 4 5 度に傾いている。しかし、その違いを除くと図 1 6 の微分位相像に比べてエッジのジャギーが低減しており、滑らかな曲面が表現されている。

図 1 1 ( d ) は図 1 1 ( b ) のモアレの軸 A 4 と軸 B 4 に沿った X 線の強度分布を示したものである。図 4 ( a ) のモアレ同様、図 1 1 ( b ) のモアレも軸 A 4 と平行な方向を第 1 の方向とすると、第 1 の方向において強度分布の周期がモアレ上の全ての領域で等しいため、実施例 1 同様、比較例と比べて詳細な形状を解析することが可能となる。

また、強度分布の周期の形状が実施例の中で最もサインカーブに近い。これはフーリエ変換した際にノイズとなる高次のスペクトルが出現しにくいことを示しており、この点においてこの実施例 4 は波面解析においては実施例 1 ～ 3 よりも適している。

【 符号の説明 】

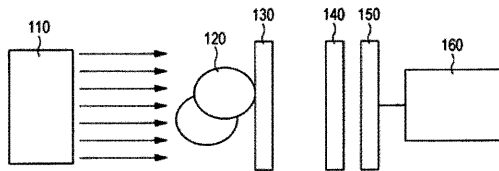
【 0 0 3 5 】

- 1 1 0 : X 線源
- 1 2 0 : 被検体
- 1 3 0 : 第 1 の格子
- 1 4 0 : 第 2 の格子
- 1 5 0 : 検出器
- 1 6 0 : 演算部

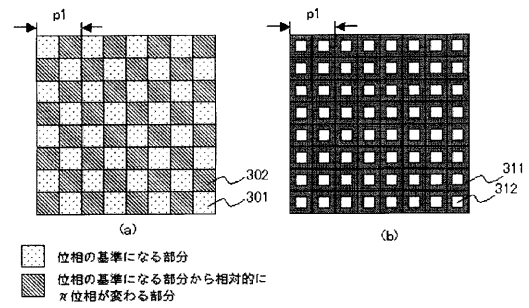
10

20

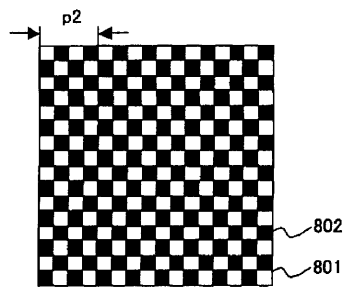
【 図 1 】



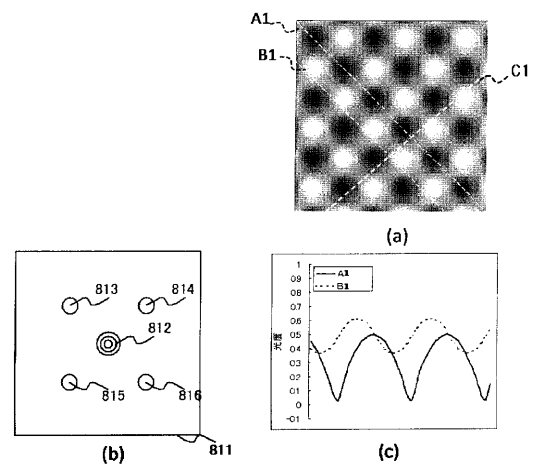
【 図 2 】



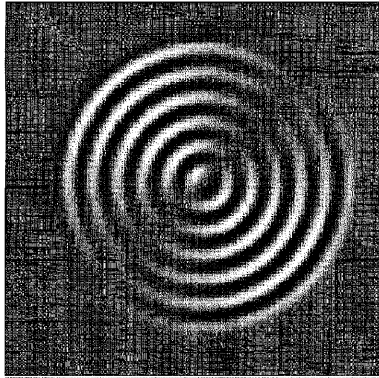
【 図 3 】



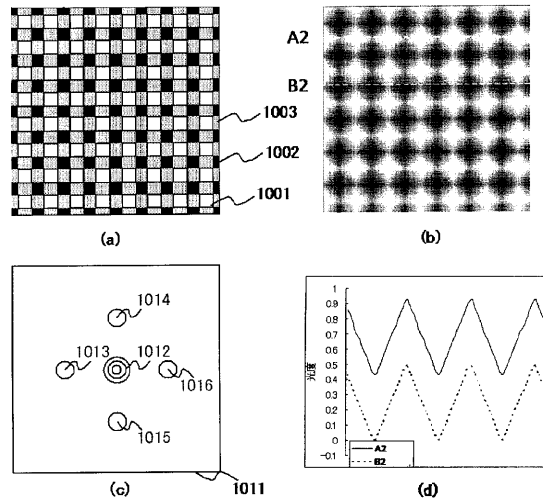
【 図 4 】



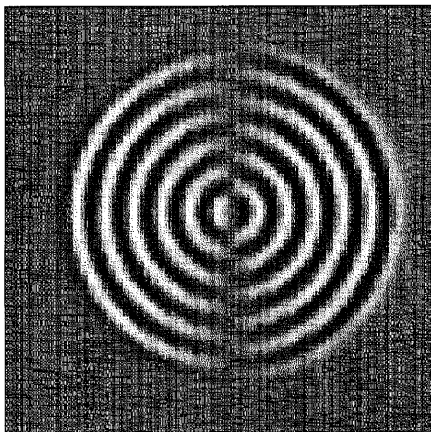
【図 5】



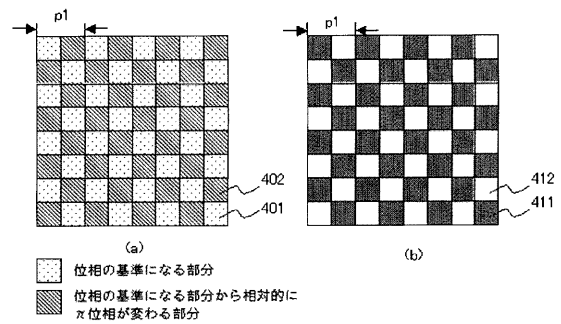
【図 6】



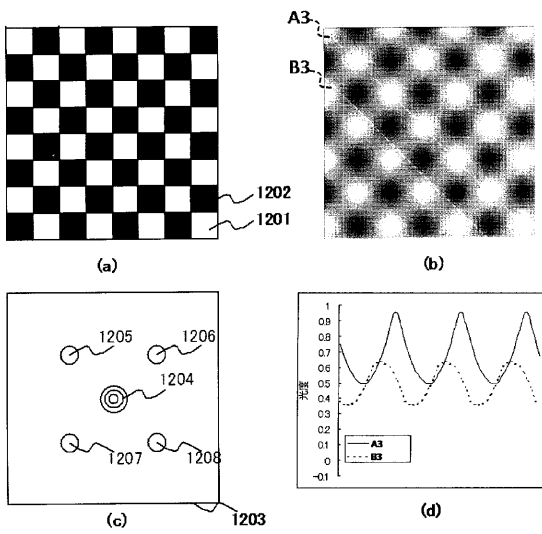
【図 7】



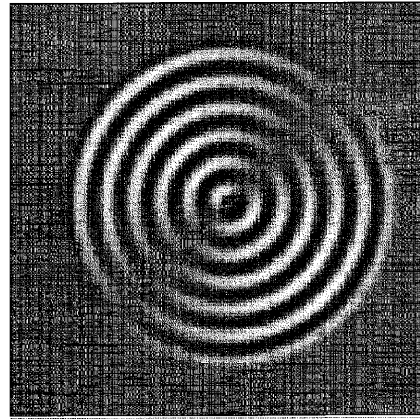
【図 8】



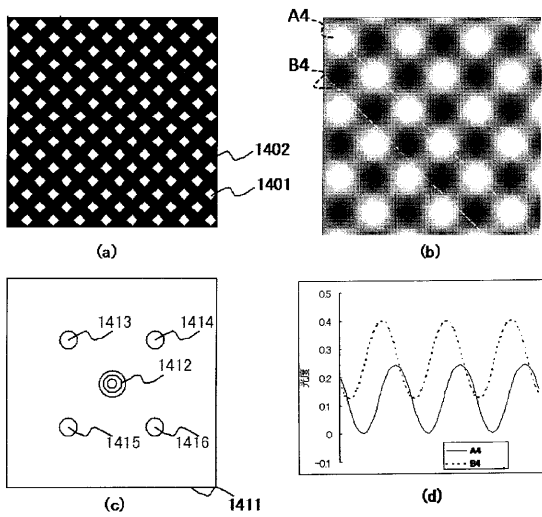
【図 9】



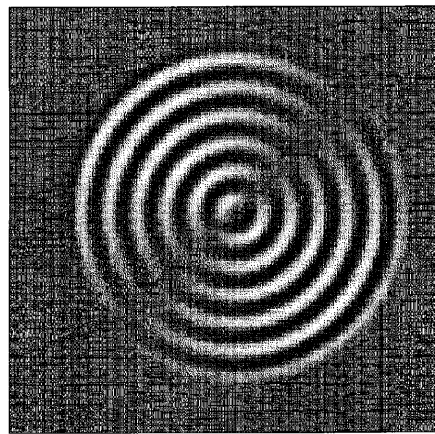
【図 10】



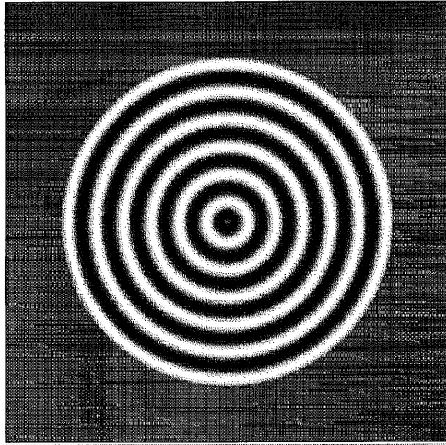
【図 11】



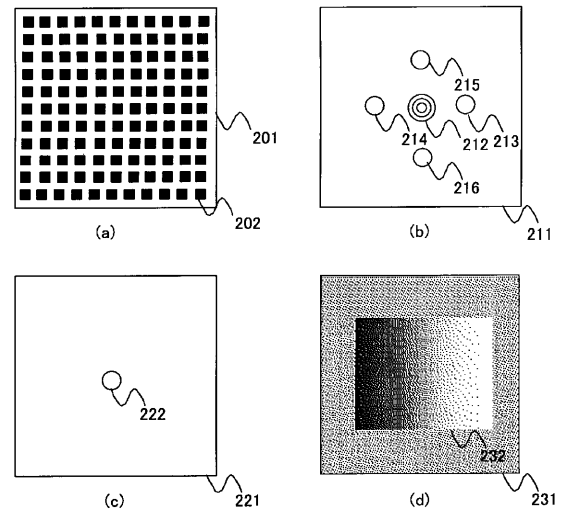
【図 12】



【図 13】



【図 14】



【図 15】

【図 16】

