

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3733142号
(P3733142)

(45) 発行日 平成18年1月11日(2006.1.11)

(24) 登録日 平成17年10月21日(2005.10.21)

(51) Int. Cl.

F I

G 2 1 K 1/06 (2006.01)

G 2 1 K 1/06

G

G 2 1 K 1/00 (2006.01)

G 2 1 K 1/00

N

請求項の数 9 (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願平9-522869
 (86) (22) 出願日 平成8年12月12日(1996.12.12)
 (65) 公表番号 特表2000-502188(P2000-502188A)
 (43) 公表日 平成12年2月22日(2000.2.22)
 (86) 国際出願番号 PCT/US1996/019565
 (87) 国際公開番号 W01997/022976
 (87) 国際公開日 平成9年6月26日(1997.6.26)
 審査請求日 平成15年10月20日(2003.10.20)
 (31) 優先権主張番号 08/574,249
 (32) 優先日 平成7年12月18日(1995.12.18)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者
 オスミック、インコーポレイテッド
 アメリカ合衆国48084 ミシガン州、
 トロイ、ノースウッド ドライブ 178
 8
 (74) 代理人
 弁理士 浅村 皓
 (74) 代理人
 弁理士 浅村 肇
 (74) 代理人
 弁理士 岩本 行夫
 (74) 代理人
 弁理士 森 徹

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 操向可能なX線光学系

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

放射線源から操向可能な単色X線あるいは中性子ビーム(20)を発生させる光学系(10)において、
 前記放射線源からコリメートされたビーム(16)を発生させる手段(14)と、
 該手段(14)からのコリメートされたビーム(16)を所定の波長で掃引されるべき試料(22)に反射させるブラッグ構造(18)と、
 所定の領域に亘って、コリメートされたビーム(16)で、所定の波長を維持しながら試料(22)を掃引するために、前記ブラッグ構造(18)を運動させて該ブラッグ構造(18)へのコリメートされたビーム(16)の入射角(θ)を変化させる手段とを含み、
 コリメートされたビーム(16)の入射領域は、前記ブラッグ構造(18)の運動の間、所定の進路に沿って該ブラッグ構造(18)上で動かされている、
 前記光学系(10)において、
 前記ブラッグ構造(18)は、該ブラッグ構造(18)を運動させることによってコリメートされたビーム(16)の入射角(θ)が変化されても、前記の所定の波長(λ)を維持するために、前記の所定の進路に沿った側方格子間隔勾配に依存して変化して、ブラッグ法則を満足させるようになった層間隔(d)を有していることを特徴とする光学系。

【請求項2】

請求項1に記載の光学系(10)において、前記ブラッグ構造(18)は、側方に勾配付けされた多層平面反射鏡を有し、前記格子間隔は、前記反射鏡の第1端から前記反射鏡の

10

20

対向端へ向かって変化するようになっている光学系。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の光学系 (10) において、前記運動させる手段が、前記反射鏡を同時に回転および併進させ、前記コリメートされたビーム (16) と前記反射鏡との間の入射角と入射領域とを同時に変化させ、前記入射領域において前記反射鏡の格子間隔は、ブラッグの法則を満足する態様で前記入射角に関連し、よって前記コリメートされたビーム (16) は、制御下で反射され、前記単色 X 線ビーム (20) は、前記光学系 (10) により前記入射角を変化させることにより操向可能である光学系。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の光学系 (10) において、前記ブラッグ構造 (18') は、軸を有する側方に勾配付けされた多層円板を有し、前記ブラッグ構造 (18') は、各部分 (1-8) に分割され、各部分 (1-8) は、周方向部分放物円筒形表面 (19) を有し、前記格子間隔は、各部分 (1-8) の周りで周方向に変化するようになっている光学系。

10

【請求項 5】

請求項 4 に記載の光学系 (10) において、前記運動させる手段は、前記円板をその軸周りに回転し、前記周方向部分放物円筒形部分 (19) により前記コリメートされたビーム (16') と前記円板との間の前記入射角と前記入射領域を同時に変化させ、前記入射領域で前記円板の前記格子間隔は、ブラッグの法則を満足する態様で前記入射角に関連し、前記コリメートされたビーム (16') は、制御下で反射され、これにより前記単色 X 線ビーム (20') は、前記光学系 (10) が前記入射角を変化させることにより操向可能

20

【請求項 6】

請求項 5 に記載の光学系において、前記部分 (1-8) の表面は、径方向傾斜され、該傾斜は、各部分 (1-8) 内で一定であり、しかして各隣接部分 (1-8) 毎に時計回りに周方向に増加し、各隣接部分 (1-8) が、前の部分 (1-8) に隣接する試料の部分 (1-8) を掃引し、もって前記光学系を X 線ラスタライザとして作用させるようになっている光学系。

【請求項 7】

請求項 1 に記載の光学系 (10) において、前記放射線源と入射点との前記距離は、前記ブラッグ構造 (18) が運動したときに一定に維持するようになっている光学系。

30

【請求項 8】

請求項 1 に記載の光学系 (10) において、前記放射線源と入射点との距離は、前記ブラッグ構造 (18) が運動したときに変化するようになっている光学系。

【請求項 9】

請求項 1 に記載の光学系において、前記ブラッグ構造 (18) は、反射ビーム (20) のバンドパスを広げる深度勾配を有するようになっている光学系。

【発明の詳細な説明】

発明の分野

本発明は、X 線ビームを走査するための方法と装置に関し、特に試料や検出器に対してコリメートされた単色 X 線を走査可能な反射光学系に関する。

40

発明の背景

科学的装置が数ある中で、試料に対して X 線ビームを掃引する必要がある場合がある。このような装置の例として、X 線と中性子解析造影システムがある。

X 線源を用いて試料を掃引する一つの方法として、隔置されたスリットを用いて X 線源からコリメートされたビームを形成させるものがある。試料を X 線源に相対的に移動させるか、あるいは X 線源を試料に対して相対的に移動するようになっている。しかしながら、いずれの場合にも、ビームは、単色化されておらず、よってある評価に対して障害をきたすものである。別システムとして、放射線源からの発散ビームは、ピンホールを有するマスクを通過させるようになっている。ピンホールから発する光線は、ほぼコリメートされ、評価のためのターゲットへ指向される。この手法は、単色化されず、さらに放射線源出

50

力の微小なアーくセグメントのみ使用して得られる放射線の強さは非常に弱くなるという欠点を同様に有する。さらに運動の精度ならびに割合は、機械的制約により限定される。単色化ビームを提供する手段として、クリスタルあるいは合成クリスタル構造が提供され、これによりブラッグの法則を用いて放射線が反射される。このようなブラッグ構成は、ブラッグの式が満足された時のみ放射線を反射させる。

すなわち、ブラッグの式は、

$$n \lambda = 2 d \sin(\theta)$$

ここで

n = 反射次数

λ = 入射放射線の波長

d = ブラッグ構造の層設定間隔すなわちクリスタルの格子間隔

θ = 入射角

である。

結晶固体の構造は、原子の正規 3 次元配列であり、X 線の自然回折格子を与えるものである。ブラッグの式の値 d は、クリスタルの原子の平面間の垂直距離である。X 線波長のオーダーでの間隔を有する人工回折格子の構造は、W. L. Bragg がその基本方程式を導き出した当時は、作り出すことが不可能であった。しかしながら、結晶構造は、フィルムの複数層で現在模倣でき、よって X 線回折は、自然に生ずる d 間隔を有する構造にもはや限定するものでない。

クリスタル構造を模倣して複数層構造に対して反射させるために、可能上最低の電子密度の軽い原子は、可能上最高も電子密度の重い原子を積層される。重い原子層は、散乱体としてのクリスタル中の原子の面と同様な作用をし、一方軽い原子層は、原子平面間のスペースと同様な作用をする。これら 2 つの原子のさらなる要求は、それらが相互に拡散しないことである。

多層構造処理は、自然結晶構造より有利である。なぜなら、多層構造の間隔 d を選ぶことにより、種々の波長ならびに入射角で使用し得るように製造できるからである。クリスタルは、耐掻き傷性などの機械的性質が良くない。

表面を側方に横切って間隔 d を変化させることにより、同じ波長の X 線を表面のどの点でも反射させることができ、どの位置でも入射角は、表面を横切って変化する。各点で、入射角と間隔 d は、ブラッグ方程式に従って操作される。深度傾斜づけもバンドパスを広げるための手段として用いることができ、具体的な多層構造の積分反射能を増大することができる。

しかしながら、上述のように、ブラッグ方程式は、角度と結晶格子間隔と波長に関係している。よって、反射光学素子に照射される光源ビームは、ある特定の出射角でのみ、ある波長領域以内でのビームを反射させる。ある角度である波長の感度により、たとえば試料を掃引するのに有効な出射ビームの方向を変化させるべく反射鏡を移動させることは、通常不可能である。

試料に対して X 線ビームを掃引する装置を改良することが現在必要であり、また試料に対してコリメートされた X 線ビームを正確にかつ高掃引速度で掃引する手段が必要となる。また、ビームの強さが単に光源出力の小アーくセグメントを使用するだけでは、成り立たないコリメートされた X 線ビームを方向変更する手段がさらに必要である。

発明の要旨

本発明は、試料を掃引するべくコリメートされた単色 X 線ビームを操向させるための光学システムを提供する。本発明の実施例では、間隔 d が表面に沿って変化する、いわゆる側方勾配多層反射鏡が用いられる。反射光学素子を同時に移動させて反射性構造の表面上での X 線ビームの入射領域および入射角を変化させることにより、ブラッグの方程式は、特定の波長バンド幅における種々の入射角および出射角において満足させることができる。よって、反射性光学素子を動かすことにより、X 線あるいは中性子ビームを試料に対して掃引させることができる。

本発明の目的は、試料に対して X 線ビームを掃引する改良された手段を提供することであ

10

20

30

40

50

る。

本発明の別の目的は、資料に対してコリメートされた単色 X 線ビームを掃引可能の反射性光学システムを提供することである。

さらに本発明の別の目的は、ビームの強さが光源出力の小アークセグメントでは達成できないコリメートされた X 線ビームを操向させる手段を提供することである。

上記目的を達成するために、本発明は、ブラッグの法則に準じてコリメートされたビームを反射するブラッグ構造を有する光学系を提供する。ブラッグ構造は、側方格子間隔勾配づけにより構成して表面を横切って d 層間隔が変化するようにされる。光学系は、コリメートされたビームに相対的にブラッグ構造（多層反射鏡）が運動可能であり、コリメートされたビームとブラッグ構造との間での入射角ならび入射面積が同時に正確に変化し得るものである。作動に際して、ブラッグ構造は、入射角が変化し、かつ入射領域が変化するようにブラッグ構造を動かす。この運動は、入射角が変化してもブラッグの法則が引き続き満足されるように計算される。すなわち、これは、コリメートされたビームとブラッグ構造と間で入射領域を同時に動かして入射角の変化を補償する d 層間隔を有するブラッグ構造の位置とすることにより達成できる。よって、入射領域に対して d 層間隔を調節することにより、ブラッグの法則を達することなく入射角を変化し得るので、ブラッグ構造は、変動する出射角でコリメートされたビームを反射し、光学系がコリメートされた反射ビームを操向して試料を操引することを可能とする。

第 1 の実施例では、ブラッグ構造は、平面鏡として構成され、d 層間隔が反射鏡の一端から他端にかけて減少するようになっている。この実施例では、放射線源は、静止状態に保持され、反射鏡が同時に回転および併進され、入射角と入射領域をそれぞれ変更する。第 2 実施例では、ブラッグ構造は、複数部分の分割される円板として構成され、分割された各部分の表面は、円周方向部分放物線円筒として構成され、各部分の d 層間隔は、時計回りに円周方向に減少する。この実施例においては、円板は、その軸周りに回転し、入射角と入射領域とを変化させ、各部分は、共同して試料を走査する走査線の役割をなす。

本発明のさらなる目的、特徴および作用効果は、以下の詳細説明ならびに請求の範囲を添付図面を参照して考察することにより明らかとする。

【図面の簡単な説明】

第 1 図は、平面反射鏡ブラッグ構造を含む本発明の第 1 実施例の概略図である。

第 2 図は、第 1 図に図示の平面反射鏡ブラッグ構造を、その d 層間隔を示すための横断面図である。

第 3 a 図は、ブラッグ構造の回転および併進運動を示すための、第 1 図の実施例の概略上面図である。

第 3 b 図は、ブラッグ構造の一端周りの回転を示す第 1 図の実施例の概略上面図である。

第 4 a 図は、ブラッグ構造の放物円筒形反射部分を示すための、本発明の第 2 実施例の概略図である。

第 4 b 図は、第 4 a 図に図示の放物円筒形反射性表面の分解展開図である。

第 5 a 図は、第 4 a 図に円板形ブラッグ構造の概略図である。

第 5 b 図から第 5 d 図は、第 6 a 図に図示のブラッグ構造の 5 b 線、5 c 線および 5 d 線の沿った分解展開横断面図である。

好適実施例の詳細な説明

本発明の操向可能な X 線ビーム光学系の好適実施例を添付図を参照して詳細に説明する。

第 1 図および第 2 図を参照するに、総称して参照番号 10 で示す光学系は、放射線を生ずる放射線源（図示せず）を含んでいる。コリメータ 14 からコリメートされた多色ビーム 16 は、ブラッグ構造 18 で反射されてブラッグ法則に応ずる単色 X 線ビーム 20 を発生させる。コリメータ 14 は、プレートやスロットとして構成でき、これらを通して放射線が通過する。あるいは、コリメータ 14 は、コリメートされたビームを発する一連の曲面反射鏡を含むガットマン光学素子で構成しても良い。あるいは、サイクロトロンからの平行ビームを用いてコリメートされたビームを発生させるようにしても良い。試料 22 を掃引するためにブラッグ構造 18 は、アクチュエータ（図示せず）により同時に併進回

10

20

30

40

50

転される。ブラッグ構造 18 を回転することにより、入射角が変化し、またブラッグ構造 18 を併進させることにより、入射領域が変化する。

多層薄膜光学素子の製造方法は、周知であり、たとえば、1995 年 6 月 7 日出願の同出願人の米国特許出願第 08 / 487、936 号に開示されている。この文献を参考としてと留めるものとする。ブラッグ構造 18 の表面を横切って側方に d 層間隔を変化させることにより、同一の波長の X 線は、入射角が変化して表面上のいずれの点でも反射可能である。各点で入射角と d 層間隔は、ブラッグ法則を満足するように操作可能である。深度勾配づけをバンドパスを広げる手段として使用できる。よって多層構造の積分反射能を増加可能である。

ブラッグ法則が d 層間隔と入射角を波長に関連づけるので、上述のようにブラッグ構造を回転して単色反射ビームを発生させることが可能である。しかしながら、深度勾配付けにより、反射ビームのバンドパスを広げて反射ビームが多波長を含むものとすることが所望により可能となる。

第 1 実施例において、ブラッグ構造 18 は、側方格子間隔勾配を有する平面反射鏡として構成でき、格子 (d 層) 間隔を構造の一端から他端へ次第に減少させる。平面反射鏡は、基板 24 の上に複数の層セットを生成させて構成する。各層セット 26 は、異なる材料製の二つの独立の層から構成され、このうちの一つの層は、比較的高い原子番号 28 を有し、他の一つは、比較的低い原子番号 30 を有する。光電子密度層 28 は、クリスタル中の原子の面と同様に挙動し、低電子密度層 30 は、この平面間の間隔とみなせる。他層の層が設定する厚みあるいは d 層間隔は、所望の放射線源の一あるいは数波長のオーダである。多数層構造の所望の性質により 10 から 1000 までの薄膜層を基板上に堆積させても良い。

単色 X 線ビーム 20 を発生させるために、d 層間隔と入射角に関するブラッグの法則を満足させなければならない。d 間隔を側方に勾配付けすることにより、単色化された X 線ビーム 20 を発生するのに必要な入射角は、コリメートされたビーム 16 とブラッグ構造 18 間の入射領域が変化するにつれて変化する。

第 2 図は、基板 24 に堆積され側方に勾配付けされた複数層を有する多層平面反射鏡を示す横断面図である。この構成では、X 線は、 θ_1 と θ_2 に等しい入射角で多層構造に衝突するようになっている。第 2 図における多層平面鏡は、反射鏡の一端近くで格子間隔 d_1 を有するように勾配付けられている。この格子間隔は、減少して他端近くで d_2 となる。角度 θ_1 で d 層間隔 d_1 が必要となり、これによりブラッグ法則に従った波長 λ を有する単色 X 線ビーム 20 が発生できる。角度 θ_2 で、d 層間隔 d_2 が必要となり、これによりブラッグ法則に従った波長 λ を有する単色 X 線ビーム 20 が発生できる。

この実施例では、アクチュエータは、計算された態様でブラッグ構造 18 を同時に回転および併進するように構成され。これにより入射面積における d 層間隔が入射角に関連付けられ、これによりブラッグの法則を満足する。第 3 a 図に図示のように、放射線源と入射角との間の距離は、一定に保持される。d 層間隔と入射角との間の関係を保持させることにより、波長 λ を有する単色 X 線ビーム 20 が発生される。単色 X 線ビーム 20 は、入射角を変更することにより操向でき、これにより、ビームの出射角が制御下で変化して、試料 22 が反射単色 X 線ビーム 20 により距離 a で掃引される。

あるいは、アクチュエータは、計算された態様で一端の周りにブラッグ構造を回転するように構成し、これにより入射領域で d 層間隔が常に入射角に関連し、よってブラッグの法則を満足させる。第 3 b 図に図示されているように、放射線源と入射面積との間の距離は、ブラッグ構造 18 が回転したときに変化する。入射角と入射領域は、双方とも、ブラッグ構造 18 が回転すると変化する。d 層間隔と入射角との関係を保持することにより、波長 λ を有する単色 X 線ビーム 20 が発生される。さらに、単色 X 線ビーム 20 は、入射角を変化させることで操向可能であり、これにより、制御下でビームの出射角が変化し、試料 22 が反射単色 X 線ビーム 20 により、第 3 a 図の距離 a より大きい距離 b で掃引される。これにより、第 3 b 図に図示の構成を用いてより大きな領域を掃引可能である。

第 4 a 図、第 4 b 図および第 5 a 図から第 5 d 図に図示の第 2 実施例は、ブラッグ構造 1

10

20

30

40

50

8'が、多層円板として構成され、この格子間隔は、円板の円周方向に変化して時計周りに格子(d層)間隔が次第に減少するようになっている。前述の実施例のように、円板は、基板の上に複数の層セットを堆積させるようにして構成され、各層セットは、異なる材料製の二つの独立の層で構成されている。

第4a図および第4b図には、円形のブラッグ構造18'が、複数部分に分割されて示されている。各部分は、ブラッグ構造18'にコリメートされたビーム16'が入射する位置で円周方向部分放物円筒形反射面19を有する。各部分のd層間隔は時計回りに側方勾配が付けられ、各部分の点aでのd層間隔は、点bでのd層間隔より小さくなっている。この実施例では、アクチュエータは、第4a図の矢印32に示すように計算された態様で反時計回りに円板をその軸を中心に回転するように構成され、これにより入射領域でのd層間隔は、常に入射角に関連し、よってブラッグの法則を満足する。d層間隔と入射角度との関係を満足することにより、波長 λ' を有する単色X線ビーム20'が発生される。さらに単色X線ビーム20'は、入射角を変化することにより操向可能であり、これにより、制御下でビームの出射角が変化し、試料22'が反射した単色X線ビーム20'により掃引される。

10

第5a図から第5d図は、円板の中心から半径方向外方に同様に傾斜したブラッグ構造18'の反射表面を図示している。第5b図から第5d図の断面図は、各継続する部分の径方向傾斜が増加することを図示している。これはブラッグ構造18'が、以下に詳述するラスタ化した態様で光を反射することを可能とする。

作動に際して、アクチュエータにより反時計方向にブラッグ構造18'を回転すると、各部分の周方向部分放物円筒形19の結果として、コリメートされたビーム14'の入射角は、ビーム14'とブラッグ構造18'の間の入射領域が変化するにつれて変化する。入射角の変化を与えるブラッグ法則に準じて各部分の側方d層間隔が計算される。よって、波長 λ' の単色X線ビーム20'は、制御下でブラッグ構造18'により反射され、単色ビーム20'は、操向されて試料を掃引する。各継続する部分の変化する径方向傾斜は、前の部分の単色ビーム20'の掃引領域に隣接する領域まで単色ビーム20'の掃引領域をステップさせるのに用いられ、光学系がX線ラスタとして動作する。

20

例えば、第4a図に図示のように、反時計方向にブラッグ構造18'が回転されると、コリメートされたビーム14'の入射領域は、#1部分の点bから点aに向けて移動する。入射領域が変化すると、単色X線ビームは、制御下で反射され、点b'から点a'まで試料が掃引される。周方向部分放物円筒形19が各部分で繰り返されるので、ブラッグ構造18'が連続して回転して入射領域を#1部分の点aから#8部分の点bまで移動させた際、反射された単色ビーム20'は、試料22'上の点b'に飛び戻る。しかしながら、ブラッグ構造18'の#8部分の増加する半径方向傾斜により、反射単色ビーム20'は、下方に反射され、試料22'の8b'として表示された領域へ指向される。さらに、#8部分の入射領域が点bから点aへ移動すると、反射された単色ビーム20'は、入射角の変化により試料22'上の点8a'から8b'へと操向される。入射領域が#8部分から#7部分へと移動すると、処理は、それ自身繰り返されて反射された単色ビーム20'は、#7部分の径方向傾斜の減少により、掃引線7へとステップアップされる。

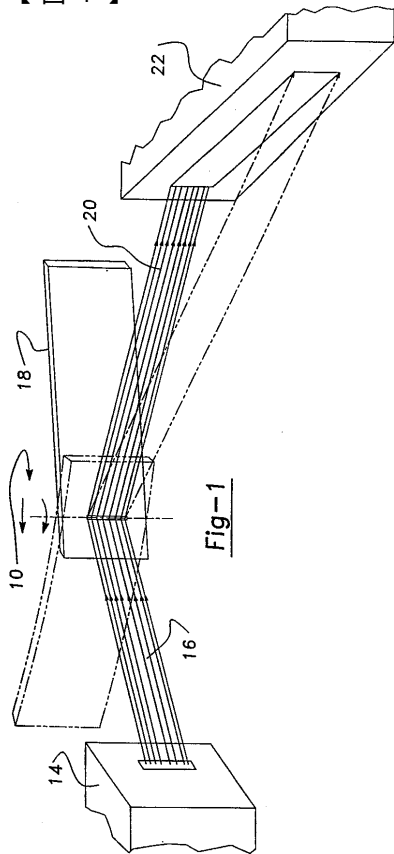
30

ステップおよび掃引処理は、ブラッグ構造18'が連続して回転すると連続して繰り返される。よって、光学系は、単色X線ビーム20'で試料22'を掃引するX線ラスタとして作用するように構成することができる。

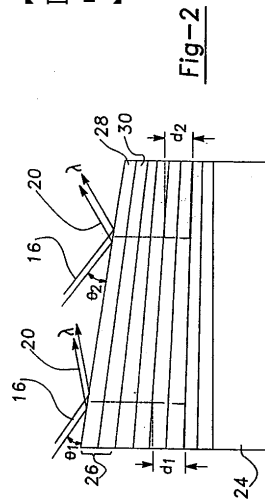
40

本発明は、図示し上述した構成に限定されるものでなく、請求の範囲に記載される発明の精神ならびに範囲から逸脱することなく、種々の変更ならびに修正をなすことが可能である。

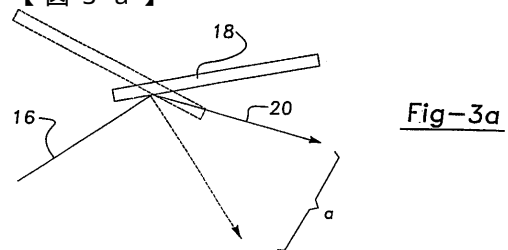
【図 1】



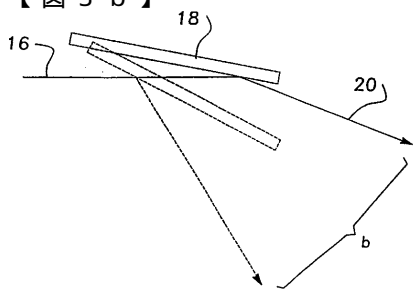
【図 2】



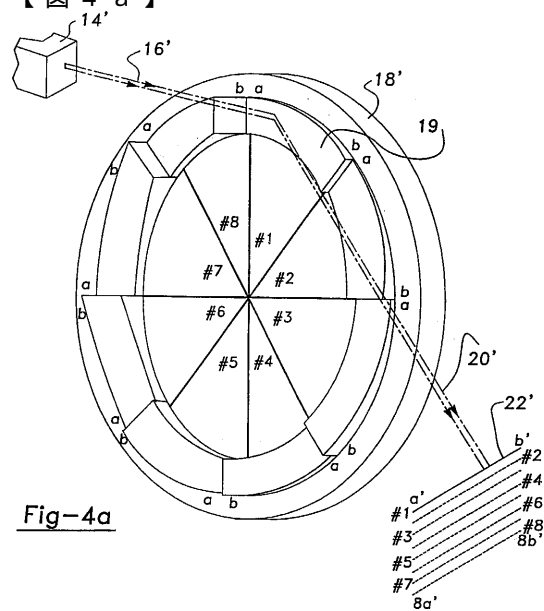
【図 3 a】



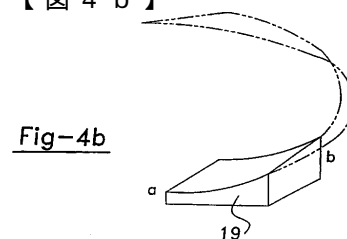
【図 3 b】



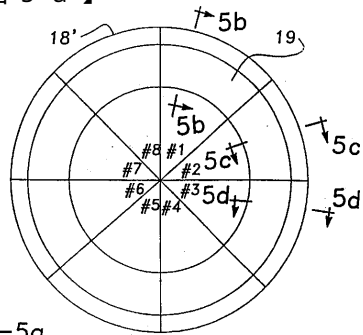
【図 4 a】



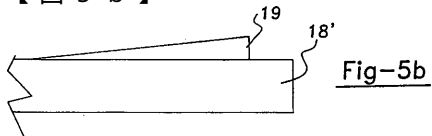
【図 4 b】



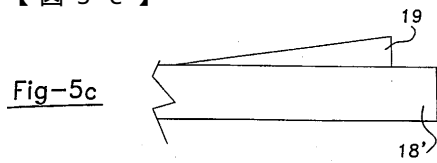
【 図 5 a 】

Fig-5a

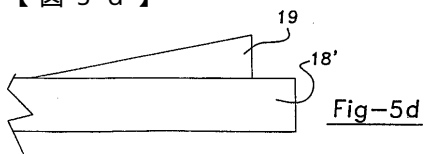
【 図 5 b 】

Fig-5b

【 図 5 c 】

Fig-5c

【 図 5 d 】

Fig-5d

フロントページの続き

(72)発明者 ゲットマン, ジョージ

アメリカ合衆国 4 8 0 0 9 ミシガン州プリミンガム, ヨークシャー ロード 1 1 0 9

審査官 中塚 直樹

(56)参考文献 特開平 5 - 1 1 1 0 0 (J P , A)

特開平 3 - 1 1 1 7 9 9 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G21K 1/00