



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 603 08 645 T2** 2007.10.18

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 468 428 B1**

(51) Int Cl.⁸: **G21K 1/06** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **603 08 645.4**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/FR03/01896**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 760 756.1**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2004/001770**

(86) PCT-Anmeldetag: **19.06.2003**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **31.12.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **20.10.2004**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **27.09.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **18.10.2007**

(30) Unionspriorität:

0207546	19.06.2002	FR
0300623	21.01.2003	FR

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR

(73) Patentinhaber:

Xenocs, Sassenage, FR

(72) Erfinder:

HOGHOJ, Peter, F-38950 Saint Martin le Vinoux, FR; DARIEL, Aurelien, F-38250 Saint Nizier du Moucherotte, FR; RODRIGUES, Sergio, F-38000 Grenoble, FR

(74) Vertreter:

Betten & Resch, 80333 München

(54) Bezeichnung: **OPTISCHE ANORDNUNG UND VERFAHREN DAZU**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein reflektierende optische Vielschichtanordnungen mit lateralem Gradienten, die dazu ausgelegt sind, Röntgenstrahlen unter kleinem Einfallswinkel zu reflektieren.

[0002] Es wird hier präzisiert, dass unter einem "kleinen Einfallswinkel" Einfallswinkel verstanden werden, die kleiner als ein Wert in der Größenordnung von 10° sind (wobei der Einfallswinkel bezüglich der reflektierenden Oberfläche definiert wird).

[0003] Genauer gesagt betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung einer reflektierenden optischen Vielschichtanordnung mit lateralem Gradienten, deren reflektierende Oberfläche dazu ausgelegt ist, unter kleinem Einfallswinkel einfallende Röntgenstrahlen unter Erzeugung eines zweidimensionalen optischen Effekts zu reflektieren.

[0004] Unter einem "zweidimensionalen optischen Effekt" versteht man einen optischen Effekt, der zwei verschiedene Raumrichtungen benutzt.

[0005] Es kann sich beispielsweise um eine Fokussierung auf einen Punkt (ausgehend von einer Punktquelle) oder eine Kollimation eines Strahlenbündels handeln, dessen Teilstrahlen in keiner Raumrichtung parallel sind (bspw. ein divergierendes konisches Strahlbündel). Zur Erzeugung eines derartigen zweidimensionalen Effekts kann man zwei eindimensionale optische Effekte kombinieren.

[0006] Beispielsweise kann man ein aus einer Punktquelle stammendes divergierendes Strahlbündel in einer ersten Richtung fokussieren (d. h. einen solchen divergierenden Strahlbündel auf eine Fokusslinie fokussieren, und nicht auf einen einzigen Punkt), und zudem das Strahlbündel in einer zweiten Richtung, die zur ersten Richtung orthogonal ist, ebenfalls fokussieren, um das resultierende Strahlbündel in Wirklichkeit auf einen einzigen Bildpunkt zu fokussieren.

[0007] Wie oben erwähnt wurde findet die Erfindung eine Anwendung bei der Erzeugung und der Konditionierung von Röntgenstrahlen im Rahmen von winkeldispersiven Röntgenreflektometrie-Anwendungen.

[0008] Weitere (nicht beschränkende) Anwendungen der Erfindung betreffen die Erzeugung von Röntgenstrahlen, analytische Röntgenstrahlenanwendungen wie z. B. Diffraktion (Beugung), Kristalldiffraktion, Proteinkristallographie, Texturanalyse, Dünnschichtdiffraktion, die Messung von Spannungen, Reflektometrie, Röntgenstrahlfluoreszenz.

[0009] Es wird präzisiert, dass in diesem Text außerdem eine Definition von "lateralem Gradienten" gegeben wird.

[0010] Man kennt bereits optische Anordnungen vom oben erwähnten Typ.

[0011] So kennt man aus dem Dokument US 6 041 099 optische Vielschichtanordnungen vom Typ Montel-Spiegel, die eingesetzt werden können, um die optischen Eigenschaften von einfallenden Röntgenstrahlen unter Erzeugung eines zweidimensionalen optischen Effekts zu ändern.

[0012] Dieser Optiktyp ist eine Variante des herkömmlichen sogenannten Kirkpatrick-Baez-Optikschemas, das darin besteht, zwei nicht miteinander verbundene Spiegel, die in zwei orthogonalen Richtungen gekrümmt sind, auszurichten, um einen zweidimensionalen optischen Effekt zu erzeugen.

[0013] Gemäß einer Weiterentwicklung dieser Konfiguration sind die im Dokument US 6 041 099 beschriebenen Optiken in einer Gegenüber-Konfiguration angeordnet ("Kirkpatrick-Baez-Vorrichtung side by side") und weisen eine Vielschicht-Beschichtung auf.

[0014] [Fig. 1a](#) zeigt eine solche optische Anordnung **33**, die zwei aneinander gegenüberliegend angebrachte Spiegel **331**, **332** umfasst, wobei die Oberflächen dieser zwei Spiegel Krümmungen aufweisen, die auf zwei zueinander orthogonalen Achsen zentriert sind.

[0015] Es wird hier präzisiert, dass in diesem Text die den Stand der Technik betreffenden Figuren mit einem Index "a" bezeichnet sind.

[0016] Eine Einschränkung dieser optischen "Gegenüber"-Anordnungen KB (die Abkürzung KB wird benutzt, um den Begriff Kirkpatrick-Baez zu bezeichnen) beruht genau genommen auf der Tatsache, dass sie aus zwei getrennten, aneinander angebrachten Elementen gebildet sind (zwei Elementarspiegel, die jeweils eine eigene Oberfläche aufweisen, um einen eindimensionalen optischen Effekt zu erzeugen, wobei sich diese zwei optischen Effekte überlagern, um den gewünschten zweidimensionalen optischen Effekt zu erzeugen).

[0017] Diese Elementarspiegel müssen nämlich mit hoher Präzision zusammengebaut werden, was einer heiklen Operation entspricht.

[0018] Außerdem erfahren bei diesen optischen Anordnungen die einfallenden Strahlen zwei Reflexionen, um die zwei eindimensionalen optischen Effekte zu erzeugen – eine Reflexion auf jedem Elementarspiegel – was Intensitätsverluste mit sich bringt.

[0019] Das Patent US 6,278,764 B1 beschreibt ein Verfahren zur Herstellung einer reflektierenden optischen Vielfachschichtanordnung, die eine Rotationsgeometrie aufweist, mittels einer Beschichtung eines Drehdorns.

[0020] Es ist eine Aufgabe der Erfindung, die Herstellung optischer Anordnungen, wie sie in der Einleitung dieses Textes erwähnt wurden, zu erlauben, die nicht durch die oben erwähnten Nachteile beeinträchtigt werden.

[0021] Ferner wird die Verwendung solcher Optiknordnungen für winkeldispersive Röntgenreflektometrie-Anwendungen beschrieben.

[0022] In einer solchen Anwendung wird ein einfaches Bündel von Röntgenstrahlen derart auf einer zu analysierenden Probe konditioniert, dass die Röntgenstrahlen einen Bereich von Einfallswinkeln θ auf der betrachteten Probe (im Bereich des Bildflecks) in der Größenordnung von einigen Grad haben.

[0023] Die Analyse der Intensität der reflektierten Röntgenstrahlen als Funktion des Einfallswinkels θ erlaubt die Bestimmung von Eigenschaften wie z. B. Dicke, Struktur, Dichte oder Grenzflächenrauigkeit eines auf der Probe vorhandenen dünnen Materialfilms.

[0024] Es geht somit darum, Messungen $R(\theta)$ durchzuführen, wobei R die gemessene Reflektivität und θ der Einfallswinkel der auf der Probe eintreffenden Röntgenstrahlen ist.

[0025] Eine solche Anwendung betrifft insbesondere die Dünnschichtanalyse für die Mikroelektronikindustrie.

[0026] Die Röntgenreflektometrietechnik ist dann nämlich besonders effizient für die Analyse sehr dünner Schichten (typischerweise kleiner als 50 nm) im Vergleich zu sogenannten optischen Techniken wie z. B. Ellipsometrie (einer in der Halbleiterindustrie sehr weit verbreiteten Technik zur Kontrolle von Dicken und Strukturen dielektrischer Materialien).

[0027] Es ist bekannt, Röntgenreflektometriemessungen unter Verwendung verschiedener Gerättypen und verschiedener Methoden durchzuführen.

[0028] Gemäß einem ersten bekannten Methodentyp wird die Dispersion der Winkel der Strahlen des auf der Probe eintreffenden Bündels durch die Verlagerung beweglicher Elemente der Messvorrichtung erhalten.

[0029] Gemäß einer ersten Variante dieses ersten Methodentyps führt man die Messungen $R(\theta)$ unter

Verwendung einer Röntgenstrahlungsquelle und eines flachen Monochromators durch, wobei die Winkeldispersion erhalten wird, indem man die Probe um eine Achse dreht, die orthogonal zur Probenoberfläche sowie zur Ausbreitungsrichtung der Röntgenstrahlen ist.

[0030] Ein Beispiel einer solchen bekannten Konfiguration ist in [Fig. 2a](#) dargestellt.

[0031] Diese Figur zeigt eine Röntgenstrahlungsquelle S , deren Röntgenstrahlungsfluss auf einen Monochromator M gerichtet wird.

[0032] Eine Probe $E1$ wird von einem Probenträger $E2$ getragen.

[0033] Die Probe $E1$ umfasst an der Oberfläche einen dünnen Film $E10$, den man mittels Reflektometrie charakterisieren möchte.

[0034] Die aus der Reflexion am Monochromator hervorgegangenen Strahlen werden auf die Probe gerichtet. Und nach ihrer Reflexion an der Probe fängt ein Röntgendetektor D die reflektierten Strahlen auf und erlaubt ihre Analyse.

[0035] Der Pfeil F erläutert die gesteuerten Verlagerungen des Probenträgers und seiner Probe.

[0036] In dieser bekannten Konfiguration erfordern die Messungen $R(\theta)$ eine Steuerung der Verlagerungen mechanischer Elemente der Vorrichtung.

[0037] Dies wirkt sich natürlich auf die Dauer der Messoperationen aus, denn solche Verlagerungen, die eine hohe Genauigkeit erfordern, sind zeitaufwendig.

[0038] In einer zweiten Variante diesen ersten Methodentyps ist es ebenfalls bekannt, Messungen $R(\theta)$ durchzuführen, indem man die Probe festhält, wobei man aber dann die Verlagerung der Röntgenstrahlungsquelle und des Detektors steuert, der die Strahlen nach ihrer Reflexion an der Probe empfängt, wobei die Bewegungen der Quelle und des Detektors so gesteuert werden, dass sie bezüglich der Probe symmetrisch sind.

[0039] Man begreift, dass auch in diesem Fall die durchgeführten Verlagerungen wesentlich zur Dauer der Messdatenerfassung beitragen.

[0040] Diese bekannten Techniken zur Durchführung von Messungen $R(\theta)$ gehen somit mit verhältnismäßig langen Durchführungszeiten einher, was eine Einschränkung darstellt (bspw. für Anwendungen wie z. B. die Dünnschichtanalyse für die Mikroelektronikindustrie).

[0041] Gemäß einem zweiten bekannten Methodentyp der Röntgenreflektometrie wird die Winkelverteilung der Strahlen des auf der Probe eintreffenden Bündels mittels einer optischen Anordnung erhalten, die dazu ausgelegt ist, einen eindimensionalen oder einen zweidimensionalen Effekt zu erzeugen.

[0042] Dieser zweite Methodentyp ist bekannt unter der Bezeichnung winkeldispersive Röntgenreflektometriemethode.

[0043] Das Prinzip dieser Methode ist in [Fig. 3a](#) erläutert, wo eine Ansicht einer Vorrichtung **40** zur Durchführung winkeldispersiver Röntgenreflektometriemessungen in einer Dimension dargestellt ist.

[0044] Diese Vorrichtung **40** umfasst:

- Mittel **41** zur Erzeugung und Konditionierung von Röntgenstrahlen. Diese Mittel umfassen eine Röntgenstrahlungsquelle und eine Optikanordnung zur Konditionierung des Bündels von aus der Quelle austretenden Röntgenstrahlen, wobei die Optikanordnung in gewünschter Weise die Konditionierung eines Röntgenstrahlungsbündels erlaubt, das man auf eine Probe **42** richten möchte,
- sowie einen Röntgendetektor **43**.

Die durch die optische Anordnung der Mittel **41** sichergestellte Konditionierung entspricht einer kontrollierten Dispersion der Einfallswinkel des Röntgenstrahlungsbündels, das auf die Probe gerichtet wird.

[0045] Man möchte somit, dass die Röntgenstrahlen auf der Probe mit einer Winkeldispersion von einigen Grad eintreffen.

[0046] Gemäß einer bevorzugten Anwendung der Erfindung möchte man eine Winkeldispersion in der Größenordnung von 2° oder mehr erhalten.

[0047] Das im Bereich der Probe reflektierte Strahlbündel wird dann mittels des Detektors **43** eingesammelt.

[0048] Es wird hier präzisiert, dass die durch die optische Anordnung der Mittel **41** durchgeführte optische Konditionierung einem eindimensionalen Effekt entsprechen kann (bspw. Fokussierung in einer einzigen Dimension), oder einem zweidimensionalen optischen Effekt.

[0049] Im allgemeinen ist der Detektor **43** vom PSD Typ ("Position Sensitive Detector") und umfasst einen Sensor **430** vom Typ CCD oder eine Fotodiode mit einer großen Zahl von Pixeln.

[0050] Im Fall der Erfindung und zweidimensionaler Optiken im allgemeinen kann der Detektor **43** vom Typ zweidimensionaler Detektor sein.

[0051] Ein zweidimensionaler Detektor erlaubt die Identifikation und Gruppierung von Pixeln, die identischen Einfallswinkelwerten entsprechen.

[0052] Dieser Detektortyp ist besonders interessant, denn Pixel, die an verschiedenen Horizontalpositionen angeordnet sind (die Horizontalrichtung ist hier definiert als die Richtung orthogonal zur Zeichenebene der [Fig. 3a](#)) können identischen Einfallswinkeln entsprechen.

[0053] Eine bestimmte Divergenz in dieser zweiten Dimension (orthogonal zur Zeichenebene) führt nämlich zu einer kleinen Variation des Einfallswinkels der Röntgenstrahlen auf der Probe.

[0054] Divergenzen in der Größenordnung von 1° können somit in dieser zweiten Dimension im Fall des erfindungsgemäßen Anwendungsgebiets toleriert werden.

[0055] Dieser Typ von zweidimensionalem Detektor erlaubt es somit, von zweidimensionalen Optiken zu profitieren, und insbesondere von Optiken, die es erlauben, in zwei Dimensionen hohen Fluss zu sammeln, was bei der in der Erfindung betrachteten optischen Anordnung der Fall ist.

[0056] Zur Realisierung einer zweidimensionalen Konditionierung des Strahlbündels für winkeldispersive Röntgenreflektometriemessungen ist es in einer ersten Variante bekannt, die Diffraktion des aus einer Röntgenquelle stammenden Strahlenbündels an einer optischen Anordnung auszunutzen, deren Oberfläche ein in zwei Dimensionen gekrümmter Kristall ist.

[0057] Solche Kristalle erlauben die Konditionierung eines anfänglichen Strahlbündels entsprechend einem Röntgenbeugungsphänomen, das gemäß dem Bragg-Gesetz erfolgt.

[0058] Es wird daran erinnert, dass die Bragg-Bedingung für einen Kristall die Form $n\theta = 2d\sin\theta_B$ hat, wobei n die Reflexionsordnung ist, θ die Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist, für die die Diffraktion erfolgt, d die Periode des Abstands zwischen den an der Diffraktion beteiligten Atomebenen des Kristalls ist, und θ_B der Einfallswinkel auf diesen Atomebenen ist, der erforderlich ist, damit das Diffraktionsphänomen auftritt.

[0059] Betrachtet man ein einfallendes Röntgenstrahlbündel, so werden die Strahlen mit der Wellenlänge θ , die den Kristall sehr genau unter einem Einfallswinkel θ_B bezüglich einer bestimmten Familie von Atomebenen des Kristalls treffen, an genau diesen Atomebenen gebeugt, wenn die oben genannte Bragg-Bedingung erfüllt ist.

[0060] Die in zwei Dimensionen gekrümmten Kristalle erlauben somit die Erzeugung eines zweidimensionalen Effekts beim Anfangsstrahlbündel im Hinblick auf die Realisierung der gewünschten Konditionierung.

[0061] Diese Konditionierung kann somit einer Fokussierung in zwei verschiedenen Richtungen entsprechen.

[0062] Eine Besonderheit von Kristallen bezüglich einer Beschichtung mit Vielfachschichten besteht darin, dass es schwierig ist, bei solchen Kristallen im Hinblick auf die Vergrößerung der Nutzoberfläche des Kristalls einen Gradienten anzulegen.

[0063] In dieser Hinsicht wird Bezug genommen auf das Dokument "Approaching real X-ray optics", Hildebrandt et al., Rigaku Journal, Band 17 Nr. 1/2000, (insbesondere Seiten 18 bis 20).

[0064] Aus dem Vorstehenden folgt, dass ein Kristall begrenzt ist im Hinblick auf den Fluss gebeugter Röntgenstrahlen, entsprechend der Richtung der durch den Kristall gebildeten optischen Anordnung, für die die Einfallswinkel der auf den Kristall einfallenden Strahlen stark variieren (die Sammeloberfläche ist begrenzt aufgrund des Fehlens von Gradienten).

[0065] Diese Richtung entspricht der Meridianrichtung der durch den Kristall gebildeten optischen Anordnung.

[0066] Gemäß einer zweiten Variante der winkeldispersiven Röntgenreflektometriemethode, die darin besteht, eine Konditionierung eines Strahlbündels mittels einer optischen Anordnung zu realisieren, die einen zweidimensionalen Effekt erzeugt, ist es ebenfalls bekannt, die Reflexion eines Anfangsstrahlbündels, das aus einer Röntgenquelle austritt, an einer optischen Anordnung vom Typ "Gegenüber"-Kirkpatrick-Baez-Vorrichtung auszunutzen, wie sie im Dokument US 6 041 099 offenbart ist.

[0067] Jeder der zwei Spiegel der Vorrichtung KB umfasst vorzugsweise eine Vielfachschicht-Beschichtung mit einem lateralen Gradienten, was die Reflexion des Anfangsstrahls X1 gemäß dem Bragg-Gesetz ermöglicht.

[0068] Wir werden auf die Definition einer Vielfachschicht mit lateralem Gradienten zurückkommen.

[0069] Diese optischen Anordnungen vom Typ Gegenüber-KB erlauben somit eine Konditionierung eines Anfangsstrahlbündels.

[0070] Wie man jedoch in diesem Text nachfolgend detailliert sehen wird, können solche optischen Anordnungen mit einem verhältnismäßig hohen Platz-

bedarf einhergehen.

[0071] Dies stellt natürlich eine Beschränkung dieser bekannten Vorrichtungen dar.

[0072] Es wird somit deutlich, dass die bekannten Lösungen zum Realisieren von Messungen $R(\theta)$ für winkeldispersive Röntgenreflektometrie-Anwendungen alle Einschränkungen beinhalten.

[0073] Dies ist insbesondere der Fall, wenn die gewünschte Dispersion von Einfallswinkeln auf der Probe größer als 2° ist, bei Fokaldistanzen größer als 150 mm, und wenn der gesammelte Fluss groß sein muss (Winkeldispersion in der Größenordnung von 1° in der Richtung quer zur allgemeinen Strahlausbreitungsrichtung).

[0074] Es ist ein weiteres Ziel der Erfindung diese Einschränkungen zu beseitigen.

[0075] Um die oben erwähnten Ziele zu erreichen schlägt die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung einer optischen Anordnung gemäß einem der oben genannten Aspekte und entsprechend Anspruch 1 vor.

[0076] Bevorzugte, jedoch nicht beschränkende Aspekte dieses Herstellungsverfahrens sind in den abhängigen Ansprüchen 2-16 aufgeführt.

[0077] Beschrieben wird ferner eine Vorrichtung zur Erzeugung und Konditionierung von Röntgenstrahlen für winkeldispersive Röntgenreflektometrie-Anwendungen vor, umfassend eine optische Anordnung gemäß einem der obigen Aspekte, die an eine Röntgenstrahlungsquelle derart gekoppelt ist, dass die von der Quelle emittierten Röntgenstrahlen in zwei Richtungen konditioniert werden, um das von der Quelle in Richtung einer Probe emittierte Strahlenbündel anzupassen, wobei die Röntgenstrahlen verschiedene Einfallswinkel auf der betrachteten Probe haben.

[0078] Weitere Aspekte, Ziele und Vorteile der Erfindung werden deutlich werden beim Lesen der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung mit Bezug zu den beigefügten Zeichnungen, in denen zusätzlich zu den oben bereits kommentierten [Fig. 1a](#), [Fig. 2a](#) und [Fig. 3a](#):

[0079] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen optischen Anordnung ist, die die Erzielung einer zweidimensionalen Fokussierung eines einfallenden Röntgenstrahlungsbündels erlaubt,

[0080] [Fig. 2](#) eine analoge Ansicht ist, die eine zweite Ausführungsform einer erfindungsgemäßen optischen Anordnung zeigt, die die Erzielung einer Kollimation eines einfallenden Röntgenstrahlungsbün-

dels erlaubt,

[0081] **Fig. 3** eine analoge Ansicht ist, die eine dritte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen optischen Anordnung zeigt, bei der man eine geringe Divergenz des reflektierten Flusses anstrebt,

[0082] **Fig. 4** eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen winkeldispersiven Röntgenreflektometrie-Vorrichtung ist (wobei der Röntgendetektor in dieser Figur aus Klarheitsgründen nicht dargestellt ist),

[0083] die **Fig. 5a** und **Fig. 6a** schematisch die Verlängerungsbedingungen verdeutlichen, die mit optischen KB-Anordnungen des bekannten Typs einhergehen, und die erforderlich sind, um die Winkeldispersion des reflektierten Strahlenbündels in Richtungen quer zur Strahlausbreitungsrichtung zu erhöhen.

[0084] Zu Beginn dieser Beschreibung soll präzisiert werden, dass die Figuren dazu bestimmt sind, das Prinzip der Erfindung zu erläutern, jedoch nicht zwingend die Dimensionen und Maßstäbe in realistischer Weise darstellen.

[0085] Dies gilt insbesondere für die Einfallswinkel (bzw. Reflexionswinkel) der Röntgenstrahlen.

[0086] Diese Röntgenstrahlen treffen in Wirklichkeit auf die erfindungsgemäßen reflektierenden Oberflächen mit einem Einfallswinkel von weniger als 10° .

[0087] Ferner definiert man die Meridian- und Sagittalrichtungen bezüglich der allgemeinen Röntgenstrahlausbreitungsrichtung wie folgt:

- Die Meridianrichtung entspricht der mittleren Ausbreitungsrichtung dieses Strahlenbündels (und genauer gesagt der gemittelten Richtung zwischen den mittleren Ausbreitungsrichtungen des Strahlenbündels vor und nach seiner Reflexion an den fraglichen optischen Anordnungen)
- Die Sagittalrichtung entspricht einer horizontalen Richtung quer zu dieser Meridianrichtung (wobei die Vertikale hier definiert ist durch die mittlere Normale auf dem Teil der reflektierenden Oberfläche der optischen Anordnungen, die beschrieben werden, und der effektiv benutzt wird, um das einfallende Röntgenstrahlungsbündel zu reflektieren).

Beschreibung der optischen Anordnung

[0088] In **Fig. 1** ist eine optische Anordnung **10** dargestellt, die dazu ausgelegt ist, einfallende Röntgenstrahlen zu reflektieren, die aus einer Röntgenstrahlungsquelle S stammen.

[0089] Die Quelle S kann insbesondere vom Typ Röntgenröhre, Drehanode oder auch Mikrofo-

kus-Röntgenquelle sein.

[0090] Die optische Anordnung **10** umfasst eine auf einem Substrat (bspw. aus Glas) gebildete Vielschichtstruktur, die eine reflektierende Oberfläche für die einfallenden Röntgenstrahlen definiert.

[0091] Die reflektierende Oberfläche dieser optischen Anordnung hat eine besondere Geometrie.

[0092] Genauer gesagt ist diese reflektierende Oberfläche mit zwei Krümmungen entsprechend zwei verschiedenen Richtungen geformt.

[0093] Diese reflektierende Oberfläche weist somit wichtige Unterschiede bezüglich reflektierenden Oberflächen desjenigen Typs auf, die in optischen Anordnungen eingesetzt werden, wie sie bspw. durch das Dokument US 6 041 099 gelehrt werden:

- die reflektierende Oberfläche ist eine einzige reflektierende Oberfläche, anders als im Fall optischer Anordnungen, bei denen man zwei verschiedene Elementarspiegel zusammengefügt hat,
- diese reflektierende Oberfläche ist gleichmäßig (wobei dieser Begriff im vorliegenden Text bedeutet, dass die reflektierende Oberfläche keine Diskontinuität zweiter Ordnung aufweist (winklige Punkte oder Kanten – Vorsprünge oder Aushöhlungen – etc...)),
- außerdem besteht ein ebenfalls wichtiger Unterschied darin, dass im Fall der Erfindung die einfallenden Strahlen nur ein einziges Mal reflektiert werden, um den gewünschten zweidimensionalen optischen Effekt zu erzeugen, wohingegen im Fall der optischen Anordnung des Dokuments US 6 041 099 zwei Reflexionen erforderlich sind.

[0094] Noch genauer gesagt weist die reflektierende Oberfläche der durch ein erfindungsgemäßes Verfahren erhaltenen optischen Anordnung eine Krümmung R_x in der Meridianrichtung X sowie eine Krümmung R_y in der Sagittalrichtung Y auf.

[0095] **Fig. 1** erlaubt die Darstellung dieser Krümmungsradien, wobei zwei Kurven C_x und C_y dargestellt sind, um den Verlauf der Kurven zu zeigen, die durch die Krümmungsradien R_x bzw. R_y definiert werden.

[0096] Jeder der zwei Krümmungsradien kann konstant sein oder entlang seiner zugeordneten Kurve variieren.

[0097] Jede der Kurven C_x , C_y kann somit ein Kreis sein, aber auch eine Ellipse, eine Parabel oder eine andere Kurve (offen oder geschlossen).

[0098] Jedenfalls hat die reflektierende Oberfläche der optischen Anordnung **10** keine einfache Kugel-

form (d. h. dass die Radien R_x und R_y nicht gleichzeitig gleich und konstant sind).

[0099] Jede der Kurven C_x , C_y ist somit einer anderen Raumrichtung zugeordnet (im hier kommentierten Beispiel zwei orthogonale Richtungen).

[0100] Jede dieser Kurven erzeugt bei den an der reflektierenden Oberfläche reflektierten Röntgenstrahlen einen eindimensionalen optischen Effekt:

- Die Kurve C_x erzeugt einen eindimensionalen optischen Effekt in der Richtung X,
- die Kurve C_y erzeugt einen eindimensionalen optischen Effekt in der Richtung Y.

[0101] Jeder dieser eindimensionalen Effekte hängt von der Krümmung ab, die der Kurve zugeordnet ist, sowie von ihrer Entwicklung entlang dieser Kurve. Somit kann man die Kurven C_x und C_y parametrisieren, um selektiv entsprechende eindimensionale Effekte zu erhalten, bspw. eine Fokussierung oder eine eindimensionale Kollimation.

[0102] [Fig. 1](#) stellt den Fall dar, in dem jede Kurve C_x , C_y eine eindimensionale Fokussierung erzeugt.

[0103] Zu diesem Zweck sind R_x und R_y verschieden, aber jeder ist konstant (die Kurven C_x und C_y sind Kreise).

[0104] In dieser ersten bevorzugten Ausführungsform hat die reflektierende Oberfläche der optischen Anordnung somit eine toroidale Geometrie.

[0105] Hieraus resultiert eine zweidimensionale Fokussierung, die die divergierenden Strahlen aus der Quelle S auf einen einzigen Bildpunkt I konzentriert.

[0106] Der Krümmungsradius R_y (sagittaler Krümmungsradius) kann (in dieser Ausführungsform ebenso wie bei den anderen) gemäß einer bevorzugten Anwendung einer durch ein erfindungsgemäßes Verfahren erhaltenen optischen Anordnung einen Wert kleiner als 20 mm haben, der erforderlich ist für Fokussierungen auf kurze Abstände kleiner als 90 cm (Abstand Quelle-Fokuspunkt). Auf diesen Aspekt wird später zurückgekommen.

[0107] Man beachte, dass die durch ein erfindungsgemäßes Verfahren erhaltene optische Anordnung die Beseitigung der Nachteile ermöglicht, die in der Einleitung dieses Textes in Zusammenhang mit Spiegeln vom Typ "Montel" mit Vielfachschicht-Beschichtungen erwähnt wurden.

[0108] Insbesondere, wie oben bereits erwähnt wurde, ist diese optische Anordnung einteilig (sie erfordert kein heikles Zusammenfügen).

[0109] Die einfallenden Röntgenstrahlen werden

nur ein einziges Mal an der reflektierenden Oberfläche reflektiert.

[0110] Ferner ist die reflektierende Oberfläche einstückig und gleichmäßig.

[0111] Es wurde gesagt, dass die reflektierende Oberfläche der optischen Anordnung **10** durch eine Vielfachschicht definiert ist.

[0112] Diese Vielfachschicht (wie alle Vielfachschichten, von denen in diesem Text gesprochen wird) umfasst mindestens einen "lateralen Gradienten".

[0113] Diese Eigenschaft erlaubt eine wirksame Reflexion von Röntgenstrahlen, die lokal unterschiedliche Einfallswinkel bezüglich der reflektierenden Oberfläche aufweisen.

[0114] Es versteht sich nämlich, dass die verschiedenen Stellen der reflektierenden Oberfläche die einfallenden Röntgenstrahlen nicht mit dem gleichen lokalen Einfallswinkel empfangen (wegen der Divergenz des einfallenden Strahlungsbündels sowie der Geometrie dieser reflektierenden Oberfläche).

[0115] Unter einer Vielfachschicht mit einem lateralen Gradienten wird hier eine Vielfachschicht verstanden, deren Schichtstruktur so angepasst ist, dass die Bragg-Bedingung an jedem Punkt der Nutzoberfläche des Spiegels eingehalten wird.

[0116] Es wird daran erinnert, dass die Bragg-Bedingung die Form $n \lambda = 2d \sin \theta$ hat, mit:

- n : Reflexionsordnung,
- λ : Wellenlänge der einfallenden Strahlung,
- d : Periode der Vielfachschicht,
- θ : Einfallswinkel auf der Oberfläche der Vielfachschicht.

[0117] So erlaubt der Vielfachschichtspiegel mit lateralem Gradienten die Beibehaltung der Bragg-Bedingung auf der gesamten Nutzoberfläche des Spiegels für Röntgenstrahlen, die in einem engen Wellenlängenband einfallen, das bspw. Kupfer-K α -Strahlen enthält (Cu-K α -Strahlen mit Wellenlängen in der Nähe von 0,154 nm).

[0118] Dies führt zu einer Reflexion des vorbestimmten Wellenbands (das im obigen Beispiel die Kupfer-K α -Strahlen enthält), durch verschiedene Bereiche des Spiegels, auf denen die einfallenden Strahlen lokal unterschiedliche Einfallswinkel aufweisen.

[0119] Somit kann man die effektiv benutzte Spiegeloberfläche vergrößern.

[0120] Der Gradient wird erhalten, indem man die Periode der Vielfachschicht lokal in geeigneter Weise variieren lässt.

[0121] Dieser Typ von Vielfachschichtstruktur mit lateralem Gradienten erlaubt somit eine Vergrößerung des Sammelraumwinkels der optischen Anordnung, was bei einer identischen Geometrie der Optik zu einem höheren reflektierten Fluss als bei Einzelschichtspiegeln führt, die in Totalreflexion arbeiten.

[0122] Das Vorhandensein eines lateralen Gradienten erlaubt ferner die Überwindung der Grenzen bestimmter bekannter Konfigurationen, bspw. der Konfigurationen, die den Rowland-Kreis verwenden, für die der Abstand zwischen der Quelle und der Optik sowie der Abstand zwischen der Optik und der Probe identisch sind, und die Einfallswinkelabweichungen auf den Optiken können für Optiken mit kleinen Abmessungen gering sein.

[0123] Die Konfigurationen, die den Rowland-Kreis verwenden, erlauben nämlich die Verwendung von Optiken ohne Gradienten, weisen jedoch die Einschränkung auf, keine Vergrößerung oder Verkleinerung des Bildflecks bezüglich der Quelle bewirken zu können (eine Verkleinerung des Bildflecks bezüglich der Quelle kann durch die Verwendung von Blenden vorgesehen werden, doch erweist sich diese Maßnahme als ungenau und sie begrenzt den gesammelten Fluss).

[0124] Eine Erläuterung dieses bekannten Konfigurationstyps findet man im Dokument "A point-focusing small-angle x-ray scattering camera using a doubly curved monochromator of a W/Si multilayer" von Sasanuma et al. (Review of Scientific Instruments, American Institute of Physics, New York, Band 67, Nr. 3, 1. März 1996 (Seiten 688-692)).

[0125] Es wird hier präzisiert, dass die Vielfachschicht der verschiedenen Ausführungsformen der Erfindung zudem einen Tiefengradienten aufweisen kann.

[0126] Ein solcher Tiefengradient erlaubt die Erfüllung der Bragg-Bedingung für feste Einfallswinkel und variable Wellenlängen oder vice versa.

[0127] Es ist somit möglich, bspw. das Wellenlängendurchlassband der Vielfachschicht der optischen Anordnung zu vergrößern und Röntgenstrahlen verschiedener Wellenlängen im Bereich ein und derselben gegebenen Bildebene zur fokussieren oder kollimieren (im Fall einer festen Geometrie – d. h. einer Konfiguration, in der die Relativpositionen der Quelle der einfallenden Strahlen, der optischen Anordnung sowie der Bildebene fest sind).

[0128] Man kann somit Quellen von Röntgenstrah-

len mit verschiedenen Wellenlängen einsetzen, um mit ein und derselben optischen Anordnung Röntgenstrahlen aus verschiedenen Quellen zu reflektieren, ohne dass dies eine neue Positionierung der Quelle und/oder der Bildebene(n) bezüglich der optischen Anordnung erfordern würde.

[0129] Man verwendet in diesem Fall die Wellenlängentoleranz der optischen Anordnung (Toleranz in $\Delta\lambda$).

[0130] In gleicher Weise ist es ferner möglich, diese Toleranz in $\Delta\lambda$ als eine Toleranz in $\Delta\theta$ auszudrücken.

[0131] Da nämlich eine Wellenlängentoleranz – im Rahmen der Bragg-Bedingung – einer Einfallswinkeltoleranz entspricht, ist es bei konstanter Wellenlänge des einfallenden Strahlungsbündels möglich, einen einfallenden Leuchtfluss zu sammeln und reflektieren, dessen Strahlen mit gleicher Wellenlänge lokal verschiedene Einfallswinkel haben.

[0132] Insbesondere kann man daher Röntgenstrahlungsquellen mit größeren Abmessungen verwenden (Vergrößerung der Winkelakzeptanz).

[0133] Nun wird auf [Fig. 2](#) Bezug genommen, in der eine weitere Ausführungsform dargestellt ist, die anhand einer optischen Anordnung **20** erläutert wird.

[0134] Die reflektierende Oberfläche der Vielfachschicht dieser optischen Anordnung ist in den Richtungen X und Y entsprechend zwei Kurven Cx bzw. Cy geformt, die parabolisch bzw. kreisförmig sind, wobei jede dieser Kurven eine Kollimation in der zugeordneten Richtung X oder Y erzeugt.

[0135] Man erzeugt daher ausgehend vom divergierenden Einfallsstrahlbündel eine parallele Kollimation in allen Raumrichtungen.

[0136] Somit können optische Anordnungen realisiert werden, die mit einem Vielfachschichtspiegel ausgestattet sind (mit einem lateralen Gradienten und eventuell zudem einem Tiefengradienten), deren reflektierende Oberfläche eine von verschiedenen beliebigen aspherischen komplexen Formen haben kann.

[0137] Insbesondere kann dieser reflektierenden Oberfläche somit eine der folgenden Geometrien gegeben werden:

- eine im wesentlichen toroidförmigen Geometrie,
- eine im wesentlichen paraboloidförmige Geometrie,
- eine im wesentlichen ellipsoidförmige Geometrie,
- eine in einer ersten Richtung (insbesondere der Sagittalrichtung) im wesentlichen kreisförmige und in einer zweiten Richtung (insbesondere der

Meridianrichtung) elliptische oder parabolische Geometrie.

Beschreibung eines bevorzugten Herstellungsverfahrens

[0138] Der laterale Gradient kann insbesondere entlang der Meridianrichtung der einfallenden Röntgenstrahlen verlaufen.

[0139] Die Periode der Vielfachschicht kann dazu ausgelegt sein, insbesondere Cu-K α -Strahlen zu reflektieren.

[0140] Nun wird auf [Fig. 3](#) Bezug genommen, in der eine durch ein erfindungsgemäßes Verfahren erhaltene Anordnung **30** dargestellt ist, die mit zwei Endwänden **31** und **32** ausgestattet ist, welche am Eintrittsbereich bzw. am Austrittsbereich der Strahlung positioniert sind, die von dieser optischen Anordnung reflektiert werden soll.

[0141] Jede Wand **31**, **32** weist eine Öffnung auf (**310** bzw. **320**), die die Röntgenstrahlung passieren läßt, wobei die Wände ansonsten für Röntgenstrahlen undurchlässig sind.

[0142] Die Wände können beispielsweise aus Blei sein.

[0143] Die Form und die Größe jeder Öffnung kann (unabhängig von der anderen Öffnung) so eingestellt werden, dass der einfallende Fluss (mittels der am Eintrittsbereich gelegenen Öffnung) und die reflektierte Strahlung (mittels der am Austrittsbereich gelegenen Öffnung) kontrolliert werden.

[0144] Man kann die Öffnungen so definieren, dass ein Kompromiss zwischen der Intensität des Flusses (am Eintritt oder Austritt) und seiner Divergenz gesucht wird.

[0145] Es wird hier präzisiert, dass die Wände **31** und **32** dazu ausgelegt sein können, abnehmbar zu sein, indem sie bspw. auf horizontale Querränder der optischen Anordnung geschraubt sind, wie dies in [Fig. 3](#) dargestellt ist.

[0146] Man kann daher optische Anordnungen in flexibler Weise anpassen, um erforderlichenfalls einen gewünschten Kompromiss Fluss/Divergenz zu suchen.

[0147] Ebenso ist es möglich, nur eine Eintrittswand oder eine Austrittswand vorzusehen.

[0148] Jede Wand bildet mit ihrer zugeordneten Öffnung somit ein "Fenster", das Röntgenstrahlen passieren läßt.

[0149] Nun wird ein bevorzugtes Verfahren beschrieben werden, das es ermöglicht, eine optische Anordnung des oben beschriebenen Typs zu erhalten, wobei man die folgenden Vorteile erzielt:

- man garantiert einen sehr guten Zustand der Oberfläche des verwendeten Substrats, um die Vielfachschicht-Beschichtung zu realisieren (die Oberflächenrauigkeitsspezifikationen für Substrate von Röntgen-Vielfachschichtspiegeln entsprechen üblicherweise Rauigkeiten, die einen Maximalwert in der Größenordnung von 10 angström rms (root mean square) nicht überschreiten sollen), und
- man ermöglicht gleichzeitig die Bildung der Oberflächen entsprechend einem extrem verringerten sagittalen Krümmungsradius R_y mit einem Wert von beispielsweise kleiner als 20 mm (was beispielsweise die Fokussierung entsprechend einem Abstand Quelle-Fokuspunkt unterhalb von 90 cm ermöglicht).

[0150] Es wäre nämlich schwierig, eine Substratoberfläche für die Aufbringung der Vielfachschicht zu erhalten, die solche Krümmungsradius- und Oberflächenzustandswerte aufweist:

- wenn man ein Substrat poliert, das bereits eine derart kleine Sagittalkrümmung aufweist: in diesem Fall würde sich das Polieren des vorgeformten Substrats als heikel erweisen,
- oder wenn man ein bereits poliertes flaches Substrat entsprechend dem sagittalen Krümmungsradius R_y krümmt – in diesem Fall wäre es schwierig, die gewünschten kleinen Krümmungsradien zu erhalten (wohingegen solche Krümmungsradien es erlauben, die gewünschten optischen Effekte auf kurzen Abständen zu erzeugen und somit den Platzbedarf der optischen Anordnung zu verringern).

[0151] Im Fall des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens wird der benötigte Oberflächenzustand ohne besondere Behandlung erhalten, indem man zur Herstellung der optischen Anordnung ein Substrat verwendet, das bereits eine Krümmung in der Krümmungsrichtung aufweist.

[0152] Die Richtung, in der das Substrat bereits eine Krümmung aufweist, entspricht vorzugsweise der Sagittalrichtung der optischen Anordnung, wenn diese hergestellt und bezüglich der Röntgenquelle positioniert ist (wie gesagt ist diese Richtung definiert bezüglich der einfallenden Strahlung, sie kann aber auch bezüglich der optischen Anordnung selbst insofern definiert werden als die optische Anordnung dazu bestimmt ist, in spezieller Weise bezüglich der einfallenden Strahlung orientiert zu werden).

[0153] Ein solches Substrat weist eine Seite auf, die derjenigen Seite der optischen Anordnung entspricht, welche die reflektierende Oberfläche tragen wird. Man nennt diese Substratseite "optische Seite".

[0154] Somit verwendet man allgemein erfindungsgemäß ein Substrat, welches bereits eine Krümmung aufweist (entlang einer Richtung, die man vorzugsweise der Sagittalrichtung der optischen Anordnung entsprechen läßt), und man krümmt dieses Substrat in einer unterschiedlichen zweiten Richtung (die vorzugsweise der Meridianrichtung der optischen Anordnung entspricht).

[0155] Ferner führt man eine Beschichtung der optischen Seite des Substrats mit einer Vielfachschicht durch. Diese Beschichtung kann vor oder nach der Krümmung des Substrats vorgenommen werden.

[0156] In allen Fällen erhält man auf diese Weise eine optische Anordnung.

[0157] Durch Auswählen eines Substrats, das die gewünschte Krümmung aufweist (mit der Form und dem Wert/den Werten des Krümmungsradius/der Krümmungsradien) und durch sein Krümmen in gewünschter Weise kann man eine optische Anordnung erhalten, die die gewünschte Geometrie hat.

[0158] Ebenso ist es möglich das Substrat selbst zu formen, insbesondere ausgehend von einem Element (insbesondere aus Glas) wie z. B. einem Rohr, einem Konus oder selbst einem Pseudo-Konus (der hier definiert wird als eine Rotationsfläche, die erzeugt wird durch die Rotation einer erzeugenden Geraden, welche bezüglich ihrer Rotationsachse schräg liegt und diese im Raum schneidet, entlang einer Kurve wie z. B. einer Ellipse).

[0159] Im Fall eines Rohrelements kann das Rohr einen kreisförmigen Querschnitt haben, jedoch auch einen elliptischen oder entsprechend jeder geschlossenen Kurve.

[0160] Ferner kann ein solches Element ein offener Zylinder sein, dessen Leitlinie eine offene Kurve wie z. B. ein Parabelabschnitt ist.

[0161] In allen Fällen weist das Ausgangselement eine Krümmung in eine Richtung auf, die vorzugsweise der Sagittalrichtung der optischen Anordnung entspricht, welche man herstellen möchte.

[0162] Diese Richtung ist orthogonal zur Achse des Rohrs, des Konus oder des Pseudo-Konus.

[0163] In einer bevorzugten Ausführungsform kann ein solches Substrat insbesondere ausgehend von einem Glasrohr erhalten werden, dessen Querschnitt kreisförmig ist.

[0164] In dieser bevorzugten Ausführungsform kann das Substrat, ausgehend von dem man die optische Anordnung herstellen wird und das eine Krümmung in eine Richtung aufweist, insbesondere erhalten werden durch:

- Abschneiden eines Glasrohrs, das den gewünschten sagittalen Krümmungsradius aufweist, beispielsweise ein Glasrohr vom Typ Duran (eingetragene Marke) hergestellt von der Firma SCHOTT, und anschließend
- Beschichten des derart abgeschnitten Rohrs durch sukzessives Aufbringen von Material, um hierauf die Vielfachschicht zu bilden.

[0165] Ein solches Substrat wird anschließend in eine Richtung (vorzugsweise meridional) mit der gewünschten Krümmung gekrümmt, um die optische Anordnung zu erhalten.

[0166] Es wird präzisiert, dass es möglich ist – in dieser Ausführungsform wie in den anderen – zunächst das Krümmen des Elements vorzunehmen (hier des abgeschnittenen Rohrs) und anschließend die Beschichtung.

[0167] Es wird präzisiert, dass in allen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens die derart gebildete Vielfachschicht eine Vielfachschicht mit einem lateralen Gradienten ist (und möglicherweise auch einem Tiefengradienten).

[0168] Das Abschneiden des Glasrohrs erfolgt in der Längsrichtung des Rohrs, indem man einen Schnitt in einer Richtung parallel zur Symmetrieachse des Rohrs vornimmt (die diese Achse sogar erhalten kann, um ein Halbrohr zu bilden), um ein Substrat in Form eines offenen Zylinders zu erhalten.

[0169] Die Leitlinie dieses offenen Zylinders hat somit in dieser bevorzugten Ausführungsart die Form eines Kreisabschnitts – bspw. eines Halbkreises.

[0170] Auf diesen Längsschnitt folgt ein weiterer Schnitt um die Optik in der Länge zu dimensionieren.

[0171] Am Ende dieser Schnittpoperationen hat man somit ein Substrat für die Herstellung einer erfindungsgemäßen optischen Anordnung geformt.

[0172] Nachdem man das Substrat mit der Vielfachschicht beschichtet hat, krümmt man das beschichtete Substrat in der gewünschten zweiten Richtung, die der Meridianrichtung entspricht, um die Oberfläche der Vielfachschicht in der gewünschten Geometrie zu formen.

[0173] Somit kann man in dieser bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens zur Herstellung der erfindungsgemäßen optischen Anordnung ein zylindrisches Substrat bilden, dessen Leitlinie im wesentli-

chen die Form eines Kreisabschnitts hat und dann führt man die Beschichtung eines solchen Substrats sowie das Krümmen dieses Substrats in einer Richtung durch, die nicht in der Ebene der Leitlinie des Zylinders des Substrats liegt (insbesondere in der Richtung der Erzeugenden des Zylinders).

[0174] Der Anmelder hat beobachtet, dass es so viel leichter ist, erfindungsgemäße optische Anordnungen herzustellen, als mittels einer der weiter oben erwähnten Techniken (Beschichtung eines Substrats, das bereits komplett in der gewünschten Geometrie geformt ist, oder Krümmen einer flachen Vielfachschicht in zwei Richtungen).

[0175] Somit können Substrate erhalten werden, die im folgenden für die Vielfachschicht-Beschichtung eingesetzt werden, die einen sehr guten Oberflächenzustand (die Rauigkeit überschreitet nicht 10 angström rms) und kleine Sagittalkrümmungsradien (kleiner als 20mm) aufweisen.

[0176] Man kann daher die optischen Effekte auf kurze Entfernungen erzielen.

[0177] Im Fall von zwei eindimensionalen Fokussierungen wird daran erinnert, dass die Eigenschaften der tangentialen (meridionalen) und sagittalen Fokussierung für einen Toroidspiegel durch die folgenden Formeln gegeben sind:

- tangentiale Fokussierung: $1/p + 1/q = 2/(R_x \sin\theta)$, mit p: Abstand Quelle – Spiegel, q: Abstand Spiegel – Fokusebene, θ : Einfallswinkel
- sagittale Fokussierung: $1/p + 1/q = 2 \sin\theta/R_y$ (für eine Fokussierung in zwei Dimensionen sind die Abstände p und q bei den zwei Formeln identisch).

[0178] Es wird präzisiert, dass es in einer Variante ebenfalls möglich ist, von einem gleichen abgeschnittenen Rohrteil auszugehen, um einen Zylinder zu formen, dessen Leitlinie offen ist, und die Reihenfolge der Beschichtung und der Krümmung in der zweiten Richtung bezüglich dem oben Beschriebenen umzukehren.

[0179] In diesem Fall krümmt man zuerst das zylindrische Substrat, dann führt man die Beschichtung durch, um die Vielfachschicht auf der derart geformten Oberfläche zu bilden.

[0180] In allen Fällen kann die Beschichtung mit allen Materialtypen erfolgen, die die Realisierung von Vielfachschichten erlauben, welche Röntgenstrahlen reflektieren.

[0181] Diese Beschichtung kann jeden zu diesem Zweck bekannten Verfahrenstyp einsetzen, bspw. Sputtern (ggf. plasmaunterstützt) oder einen anderen Typ von Vakuumbeschichtung.

[0182] Es wird ebenfalls präzisiert, dass für Anwendungen, die eine hohe spektrale Reinheit erfordern, die zum Reflektieren der Röntgenstrahlen bestimmte optische Anordnung an einen Filter gekoppelt sein kann, der mit einem geeigneten Material und Dicke hergestellt ist, um die Dämpfung der unerwünschten Spektralbänder sicherzustellen und gleichzeitig eine ausreichende Transmission eines vorbestimmten Wellenlängenbands zu garantieren, in dem man die einfallenden Röntgenstrahlen reflektieren möchte.

[0183] Für Optiken, die ausgehend von Vielfachschicht-Beschichtungen W/Si hergestellt sind, um Kupfer-K α -Strahlen zu reflektieren, kann somit ein Nickelfilter mit 10 μ m eingesetzt werden, um die Kupfer-K β -Strahlung (0,139 nm) um einen Faktor 8 zu dämpfen und eine ausreichende Transmission für die K α -Strahlen beizubehalten (größer als 60 %).

[0184] Diese Filterfunktion ergänzt die "natürliche Monochromatisierung", die mit Hilfe der Vielfachschicht erhalten wird, und kann somit für Anwendungen, wo die spektrale Reinheit prioritär ist, eine Vergrößerung der Leistungsfähigkeit der in der Erfindung beschriebenen Vielfachschicht-Optik ermöglichen.

[0185] Betreffend diesen Aspekt sind zwei alternative Filterausführungsformen zu betrachten:

- Realisation von zwei Filtern, deren Dicken zusammen der gewünschten Filterdicke entsprechen (bspw. zwei Filter mit gleicher Dicke gleich der Hälfte der gewünschten Gesamtdicke), die am Strahlungseintritts- bzw. austrittsfenster eines Schutzbehälters positioniert sind, der die optische Anordnung enthält,
- Aufbringen einer Materialschicht (die zur Filterung verwendet wird) auf der Vielfachschicht-Beschichtung. Die Oberfläche der Optik wird dann gebildet durch eine reflektierende Vielfachschicht-Beschichtung (mit einem lateralen Gradienten) und einer Oberflächenschicht, die die Filterfunktion gewährleistet, um die spektrale Reinheit der reflektierten Strahlung zu erhöhen. Die aufgebrachte Dicke ist dann ungefähr durch die folgende Relation gegeben: $d = (e \sin\theta)/2$ (wobei e die benötigte "optische" Filterdicke und θ der Einfallswinkel auf der Optik ist).

Beschreibung einer besonderen Anwendungsart

[0186] Nun wird ein Erfindungsaspekt beschrieben werden, der speziell die winkeldispersive Röntgenreflektometrie betrifft.

[0187] **Fig. 4** zeigt eine Vorrichtung **60**, die die Durchführung von Messungen vom Typ R (θ) für diesen Anwendungstyp erlaubt.

[0188] Genauer gesagt sind in dieser Figur darge-

stellt:

- eine Röntgenstrahlungsquelle S,
- eine optische Anordnung **61** zum Konditionieren des Anfangsstrahlbündels X1 aus der Quelle S,
- sowie eine Probe **62**.

[0189] Der Röntgendetektor, der normalerweise dazu ausgelegt ist, die von der Reflexion an der Probe stammenden Strahlen zu detektieren, ist in dieser Figur zur besseren Klarheit nicht dargestellt.

[0190] Mit Bezug zu [Fig. 4](#) wird präzisiert, dass die Winkeldispersionen des Strahlbündels X2, das an der optischen Anordnung **61** reflektiert wird nicht repräsentativ sind.

[0191] In [Fig. 4](#) erscheint nämlich die Winkeldispersion (β_M) in der Meridianrichtung größer als die Winkeldispersion in der Sagittalrichtung (β_S).

[0192] Die Vorrichtung **60** umfasst eine Röntgenstrahlungsquelle S, die ein Anfangsstrahlbündel X1 emittiert.

[0193] Das Anfangsstrahlbündel X1 aus der Quelle wird auf die optische Anordnung **61** gerichtet, deren reflektierende Oberfläche mit zwei Krümmungen in zwei verschiedenen Richtungen geformt ist.

[0194] Diese optische Anordnung **61** ist somit geeignet, beim Anfangsstrahlbündel X1 einen zweidimensionalen optischen Effekt zu bewirken, um ein Strahlbündel X2 zu erzeugen, das eine kontrollierte Winkeldispersion aufweist.

[0195] Das Strahlbündel X2 wird anschließend auf die Probe **62** gerichtet, deren Reflektivität man charakterisieren möchte, beispielsweise für Anwendungen, wie sie zu Beginn dieses Textes in Zusammenhang mit Messungen vom Typ $R(\theta)$ erwähnt wurden.

[0196] Die verschiedenen Elemente der Vorrichtung **60** sind für die Gesamtheit der Messungen $R(\theta)$ für einen gegebenen Analysebereich auf der Probe fest.

[0197] Die optische Anordnung **61** erlaubt die Erzeugung eines Strahlbündels X2, das in der gewünschten Weise entsprechend einem zweidimensionalen Effekt konditioniert ist (der typischerweise eine zweidimensionale Fokussierung ist). Genauer gesagt konditioniert die optische Anordnung **61** das Bündel X2 derart, dass man im Bereich der Probe einen erhöhten Konvergenzwinkel erhält, und insbesondere in einer Dimension, die der Sagittaldimension der optischen Anordnung **61** entspricht (d. h. der Richtung Y in [Fig. 4](#)).

[0198] Noch genauer gesagt gilt folgendes:

- der Einfangwinkel im Bereich der Probe (d. h. der Konvergenzwinkel der Optik) ist:

in einer Dimension (entsprechend der Sagittaldimension der Optik) größer als 2° und in einer anderen Dimension (entsprechend der Meridiandimension der Optik) in der Größenordnung von 1°

- die Einfallswinkeldispersion der Strahlen des Bündels X2 auf der Probe ist größer als 2° , wobei die Probe in Abständen von mehr als 15 cm von der optischen Anordnung plaziert ist.

[0199] Dies wird insbesondere erreicht:

- durch die Geometrie der Oberfläche der optischen Anordnung **61**,
- durch die Positionierung dieser optischen Anordnung bezüglich der Probe **62**:

[0200] Diese Positionierung ist derart definiert, dass die Einfallswinkeldispersion der auf die Probe treffenden Röntgenstrahlen größer als 2° ist.

[0201] Diese Vorrichtung **60** erlaubt die Durchführung schneller winkeldispersiver Röntgenreflektometriemessungen, denn sie beinhaltet keine mechanische Elementenverlagerung.

[0202] Es ist nämlich die optische Anordnung **61**, die die Winkeldispersion des Bündels X2 gewährleistet, indem dieses Bündel derart konditioniert wird, dass es im Bereich der Probe so angepasst wird, dass die auf dieser Probe eintreffenden Röntgenstrahlen im Bereich des betrachteten Bildflecks (Fokuspunkt der optischen Anordnung auf der Probe) verschiedene Einfallswinkel haben.

[0203] Die optische Anordnung **61** weist somit eine einzige reflektierende Oberfläche auf, wobei diese Oberfläche entlang zwei Dimensionen gekrümmt ist, mit einer ersten Krümmung entlang der Sagittalrichtung und einer zweiten Krümmung entlang der Meridianrichtung.

[0204] [Fig. 4](#) gibt eine detailliertere Erläuterung dieser optischen Anordnung.

[0205] Es handelt sich in diesem Fall um eine optische Anordnung, die es erlaubt, eine Fokussierung in zwei Dimensionen durchzuführen, mit einer ersten Krümmung in der Richtung Y (kreisförmige Krümmung CY) und einer zweiten Krümmung in der Richtung X (kreisförmige Krümmung CX).

[0206] In genau diesem Fall hat die Optik somit eine Toroidform.

[0207] Allgemein kann die optische Anordnung **61** eine Toroidform oder eine Ellipsoidform im Fall einer zweidimensionalen Fokussierung haben.

[0208] Ferner kann die optische Anordnung **61** eine Paraboloidform im Falle einer zweidimensionalen

Kollimation haben.

[0209] Gemäß einer weiteren Variante kann die optische Anordnung **61** ferner eine kreisförmige Krümmung in einer Dimension besitzen, bspw. in der Sagittalrichtung, und eine parabolische Krümmung in einer anderen Dimension, bspw. in der Meridianrichtung.

[0210] Die optische Anordnung **61** besitzt eine Vielfachschicht-Beschichtung mit einem lateralen Gradienten (d. h. in der Meridianrichtung, die in [Fig. 4](#) der Richtung X entspricht).

[0211] Man beachte, dass weitere Elemente strahlauwärts der optischen Anordnung **61** platziert sein können (zwischen der Quelle S und dieser optischen Anordnung), bspw. Blenden zum Regeln des Strahlbündels.

[0212] Die optische Anordnung **61** besitzt eine große Sammel-Nutzeroberfläche, was es erlaubt, einen erhöhten Konvergenzwinkel im Bereich der Probe zu erhalten, insbesondere in der Sagittaldimension der Optik.

[0213] Beispielsweise kann die nutzbare Sammeloberfläche der optischen Anordnung somit in der Sagittalrichtung eine Abmessung in der Größenordnung von 1 cm für Fokusbereiche in der Größenordnung von 200 mm haben. Die Dimension, von der oben gesprochen wird, entspricht der Länge der Gerade, die man erhält, wenn man die zwei Endpunkte der nutzbaren Sammeloberfläche in der Sagittalrichtung verbindet.

[0214] Für eine optische Anordnung mit einem Krümmungsradius in der Größenordnung von 7 mm (die das Strahlbündel von einer Quelle fokussiert, welche 40 cm entfernt platziert ist) kann die nutzbare Sammeloberfläche einem Bereich entlang der Sagittaldimension in der Größenordnung von einem Viertelkreis entsprechen, d. h. ungefähr 1 cm, was einem Einfallswinkel im Bereich der Probe in der Größenordnung von 3° entspricht.

[0215] Gemäß einer vorteilhaften Variante erlaubt es die optische Anordnung **61** somit, einen Einfallswinkel im Bereich der Probe zu erhalten, der

- größer als 2° in einer ersten Dimension der optischen Anordnung **41** ist (entsprechend ihrer Sagittalrichtung, d. h. der Richtung Y in [Fig. 4](#)),
- in der Größenordnung von 1° in einer zweiten Dimension der optischen Anordnung **61** ist (entsprechend ihrer Meridianrichtung, d. h. der Richtung X in [Fig. 4](#)).

[0216] In einer solchen Konfiguration ist die Probe in Fokusbereichen (Abstand zwischen der optischen Anordnung **61** und der Probe) von mehr als 150 mm

angeordnet.

[0217] Beispielsweise können die Fokusbereiche in der Größenordnung von 300 mm bis 200 mm liegen.

[0218] Man passt somit die Orientierung der optischen Anordnung **61** bezüglich der Probe derart an, dass die Einfallswinkeldispersion der Röntgenstrahlen auf der Probe größer als 2° ist.

[0219] Man definiert die Orientierung der optischen Anordnung **61** als die Winkelposition dieser optischen Anordnung für eine gegebene Rotation um ihre optische Achse (die Achse parallel zur Meridianrichtung).

[0220] Eine bevorzugte Positionierung der Elemente der Vorrichtung besteht darin, die optische Anordnung so zu orientieren, dass die Einfallswinkeldispersion auf der Probe im wesentlichen der Winkeldispersion des im Bereich der optischen Anordnung reflektierten Strahlenbündels X2 in der Sagittaldimension entspricht (der Richtung Y in [Fig. 4](#)).

[0221] Eine bevorzugte Positionierung besteht dann darin, die optische Anordnung so zu orientieren, dass die mittlere Senkrechte auf der nutzbaren Oberfläche der optischen Anordnung (oder die Mittelsenkrechte der Optik) im wesentlichen parallel zur Probenoberfläche ist.

[0222] Für das Anwendungsgebiet sind die mittleren Einfallswinkel auf der Probe streifend, und im Fall sehr streifender Einfallswinkel (mittlerer Einfallswinkel in der Größenordnung von 1°) kann die Orientierung der optischen Anordnung **61** wie folgt beschrieben werden:

- die mittlere Normale der optischen Anordnung ist im wesentlichen parallel zur Oberfläche der Probe **62**,
- die Sagittalrichtung der optischen Anordnung **61** ist im wesentlichen orthogonal zur Oberfläche der Probe **62**,
- die Meridianrichtung der optischen Anordnung **61** ist im wesentlichen parallel zur Oberfläche der Probe **62**.

[0223] Eine Erläuterung dieses Anordnungstyps wird anhand von [Fig. 6](#) gegeben.

[0224] Jedenfalls ist gemäß einer Anwendung die optische Anordnung **61** nicht derart orientiert, dass die mittlere Normale auf der nutzbaren Oberfläche der optischen Anordnung **61** im wesentlichen orthogonal zur Oberfläche der Probe **62** ist, wenn man einen streifenden Einfall betrachtet (die Einfallswinkeldispersion auf der Probe **62** entspräche dann im wesentlichen der Winkeldispersion des Strahlbündels X2 in der Meridianrichtung).

[0225] In der zweiten Dimension der optischen Anordnung, d. h. der Meridianrichtung, erlaubt die optische Anordnung das Sammeln eines großen Flusses, und gemäß einer bevorzugten Anwendung ist die Winkeldispersion des reflektierten Strahlbündels X2 in dieser Meridianrichtung in der Größenordnung von 1° (Richtung X in [Fig. 4](#)).

[0226] Die optische Anordnung 61 ermöglicht somit die Erlangung einer erhöhten Einfallswinkeldispersion im Bereich der Probe bei gleichzeitiger Konditionierung eines Flussmaximums im Bereich der Probe.

[0227] Man wird feststellen, dass im Vergleich zu einer Konfiguration, bei der man als optische Anordnung, die einen zweidimensionalen Effekt erzeugt, eine optische Anordnung vom Typ Gegenüber-KB verwenden würde, die Erfindung die Realisierung kompakterer Vorrichtungen erlaubt. Die optische Anordnung 61 erlaubt es nämlich, für eine gegebene Länge (in der Meridianrichtung) eine Sammeloberfläche zu erhalten, die in der Sagittalrichtung größer als jene ist, die man mit einer Konfiguration erhalten würde, welche eine Konditionierung mittels einer Optik vom Typ KB einsetzt.

[0228] Somit ist im Fall einer durch ein erfindungsgemäßes Verfahren erhaltenen optischen Anordnung die Winkeldispersion des von der Nutzoberfläche der optischen Anordnung behandelten Strahlbündels in der Sagittalrichtung größer, und man erhält eine größere Winkeldispersion auf der Probe.

[0229] Zur Erläuterung und mit Bezug zu den [Fig. 5a](#) und [Fig. 6a](#) würde die Erzielung einer äquivalenten Winkeldispersion mit optischen Anordnungen vom Typ KB die Verlängerung der optischen Anordnung in der Richtung Y erfordern.

[0230] Im Fall optischer Elemente vom Typ KB muss nämlich jeder einfallende Strahl die optische Anordnung in einer speziellen Zone treffen (entsprechend den schraffierten Zonen der Spiegel der [Fig. 5a](#) und [Fig. 6a](#)) um eine doppelte Reflexion zu erfahren.

[0231] Hieraus folgt, dass bei einem solchen bekannten Typ von optischem Element der Raumwinkel, der eingesammelt werden kann, durch die Länge der optischen Anordnung begrenzt ist.

[0232] Dies gilt ebenso für die horizontalen Querrichtungen wie für die vertikalen Querrichtungen (Richtung Z bzw. Richtung X in den [Fig. 5a](#) und [Fig. 6a](#)).

[0233] Es ist somit möglich, die nutzbare Sammeloberfläche in der Sagittalrichtung zu vergrößern, ohne die Länge der Vorrichtung zu vergrößern.

[0234] Dies ist insbesondere in dem Fall wichtig, wo man den Platzbedarf, und somit die Größe der Optik begrenzen möchte, wie es der Fall ist beim Anwendungsgebiet der Erfindung.

[0235] In dem Fall bspw., wo die optische Anordnung 61 eine toroidale Oberflächengeometrie hat, kann die nutzbare Sammeloberfläche des Spiegels in der Sagittaldimension einen Bereich wie z. B. einen Viertel- oder sogar einen Halbkreis beschreiben, was einem großen Einfangwinkel im Bereich der Probe in der Sagittaldimension entspricht.

[0236] Die Möglichkeit für die optische Anordnung 61, die nutzbare Sammeloberfläche in der Sagittalrichtung zu vergrößern, beruht auf der Tatsache, dass der Einfallswinkel der aus ein und derselben Punktquelle stammenden Röntgenstrahlen auf der Optik in dieser Richtung sehr wenig variiert (Richtung Y in [Fig. 4](#)).

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer reflektierenden optischen Vielschicht-Anordnung mit lateralem Gradienten, deren reflektierende Oberfläche dazu ausgelegt ist, unter kleinem Einfallswinkel einfallende Röntgenstrahlen unter Erzeugung eines zweidimensionalen optischen Effekts zu reflektieren, wobei die reflektierende Oberfläche durch eine einzige Oberfläche gebildet und mit zwei Krümmungen entsprechend zwei verschiedenen Richtungen geformt ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- Beschichten eines Substrats, welches bereits eine Krümmung in einer ersten Richtung aufweist, sowie
- Krümmen dieses Substrats in einer unterschiedlichen zweiten Richtung.

2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Richtung, in der das Substrat bereits eine Krümmung aufweist, der Sagittalrichtung der optischen Anordnung entspricht.

3. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Krümmung des Substrats, die der Sagittalrichtung der optischen Anordnung entspricht, einen Krümmungsradius von weniger als 20 mm definiert.

4. Verfahren nach einem der drei vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Richtung, in der man das Substrat krümmt, der Meridianrichtung der optischen Anordnung entspricht.

5. Verfahren nach einem der vier vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat eine Oberflächenrauigkeit von weniger als

10 angström rms aufweist.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass man zur Erzielung des Oberflächenzustands des Substrats keine spezielle Behandlung durchführt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass man das Substrat selbst ausgehend von einem Element in Form eines Rohrs, eines Konus oder eines Pseudo-Konus bildet, das bereits eine Krümmung in einer Richtung orthogonal zur Achse des Rohrs, des Konus oder des Pseudo-Konus aufweist.

8. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass das Element ein Glasrohr mit kreisförmigem Querschnitt ist.

9. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass das Glas vom Typ Duran (eingetragene Marke) ist.

10. Verfahren nach einem der zwei vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Bildung des Substrats das Schneiden des Rohrs in der Längsrichtung des Rohrs derart umfasst, dass ein Substrat in Form eines offenen Zylinders erhalten wird.

11. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass auf das Schneiden in der Längsrichtung des Rohrs ein Schneiden folgt, um die optische Anordnung in der Länge zu dimensionieren.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass man die Beschichtung zum Bilden einer Vielfachschicht vor dem Krümmen des Substrats durchführt.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass man das Substrat krümmt, um es mit der gewünschten Geometrie zu formen, bevor man es zur Bildung einer Vielfachschicht beschichtet.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass man die optische Anordnung an einen Filter koppelt, um die Dämpfung unerwünschter Spektralbänder sicherzustellen und gleichzeitig eine ausreichende Transmission eines vorbestimmten Wellenlängenbands zu gewährleisten, für das man die einfallenden Röntgenstrahlen reflektieren möchte.

15. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass der Filter ein Nickelfilter mit 10 μm ist.

16. Verfahren nach einem der zwei vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Filter durch eine der folgenden Techniken realisiert ist:

- Realisierung von zwei Filtern, deren Dicken zusammen der gewünschten Filterdicke entsprechen, die am Strahlungseintritts- bzw. Austrittsfenster eines Schutzgehäuses positioniert werden, das die optische Anordnung enthält,
- Aufbringen einer Schicht aus Filtermaterial auf der Vielfachschicht-Beschichtung mit einer Aufbringungsdicke, die ungefähr durch die folgende Relation gegeben ist: $d = (e \sin\theta)/2$ (wobei e die benötigte "optische" Filterdicke und θ der Einfallswinkel auf der Optik ist).

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

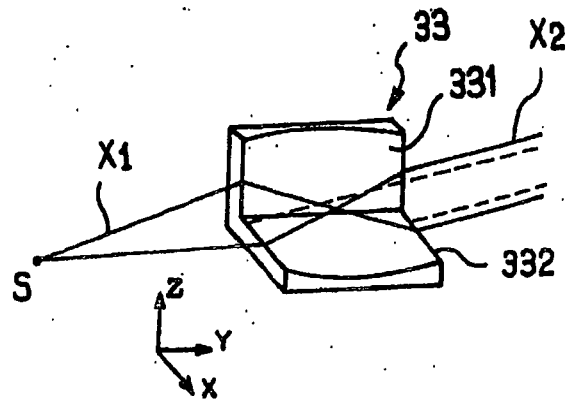


FIG. 1a

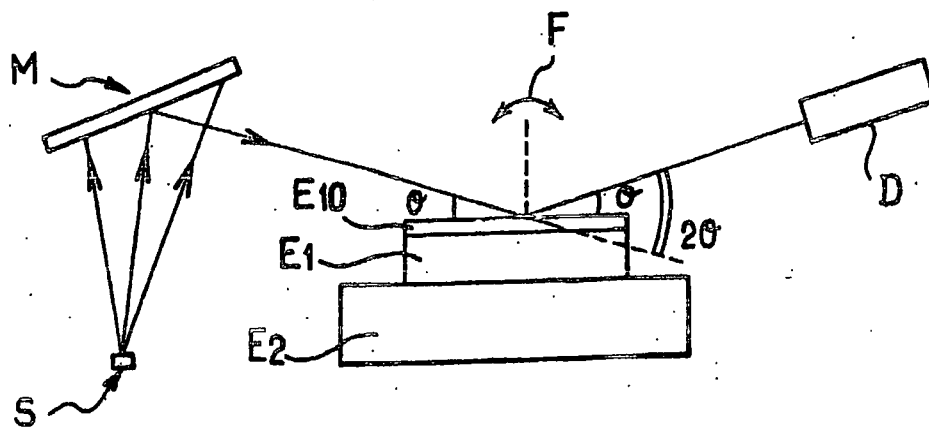


FIG. 2a

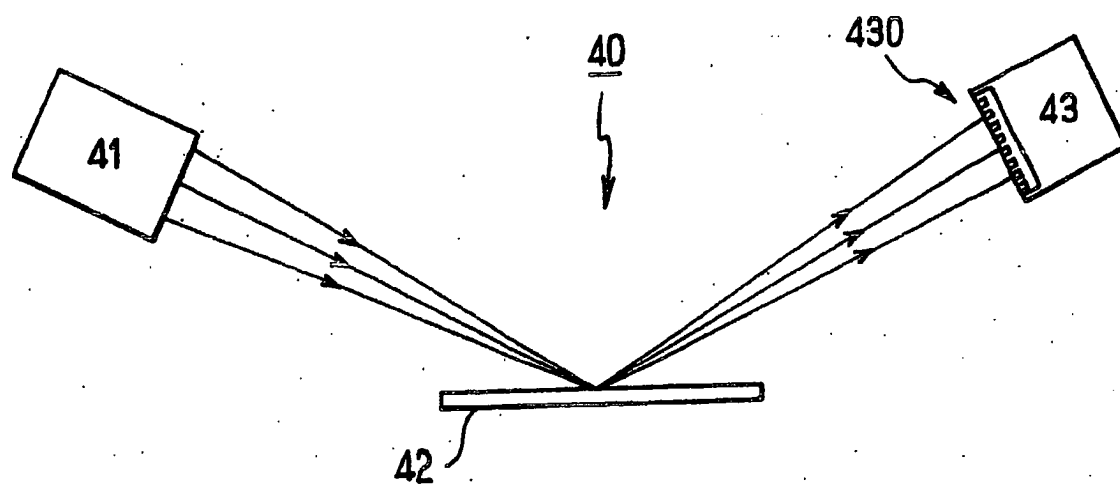


FIG.3a

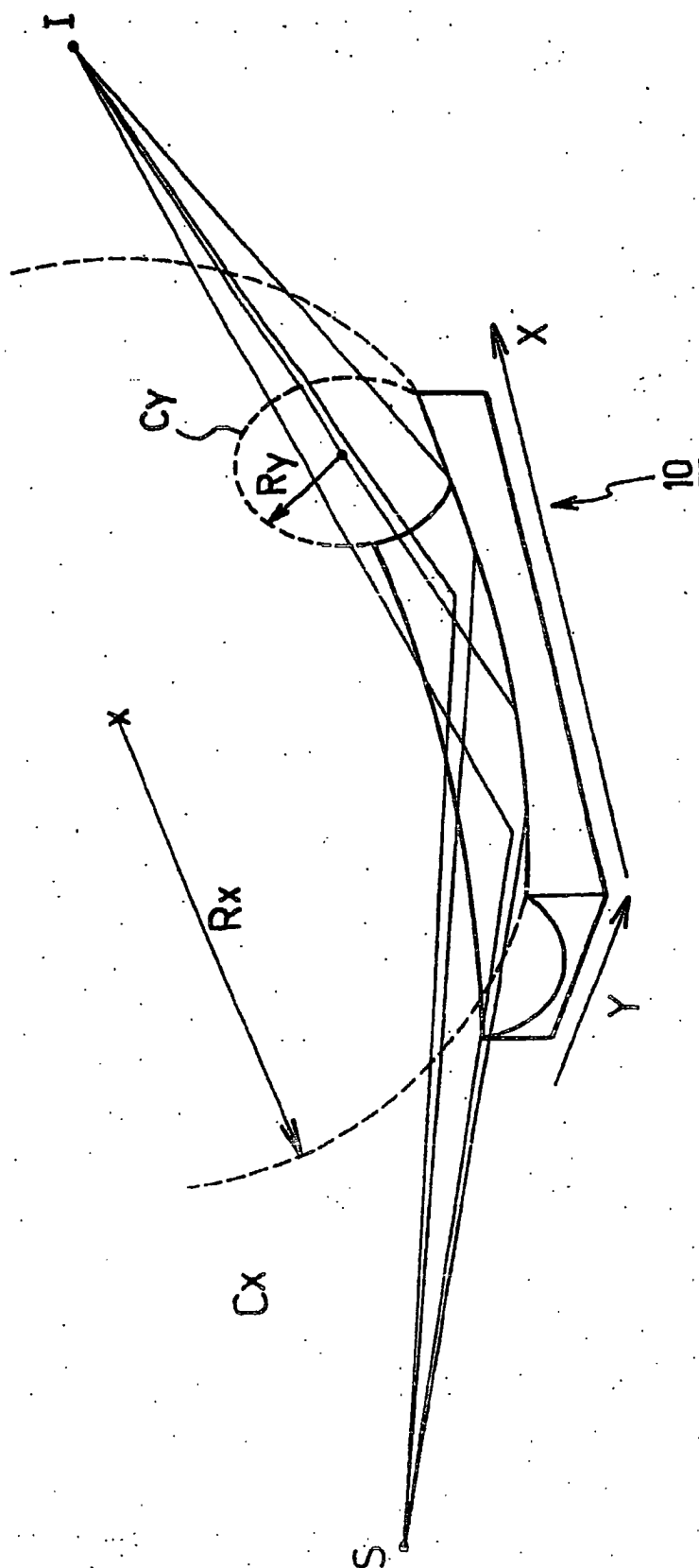


FIG. 1

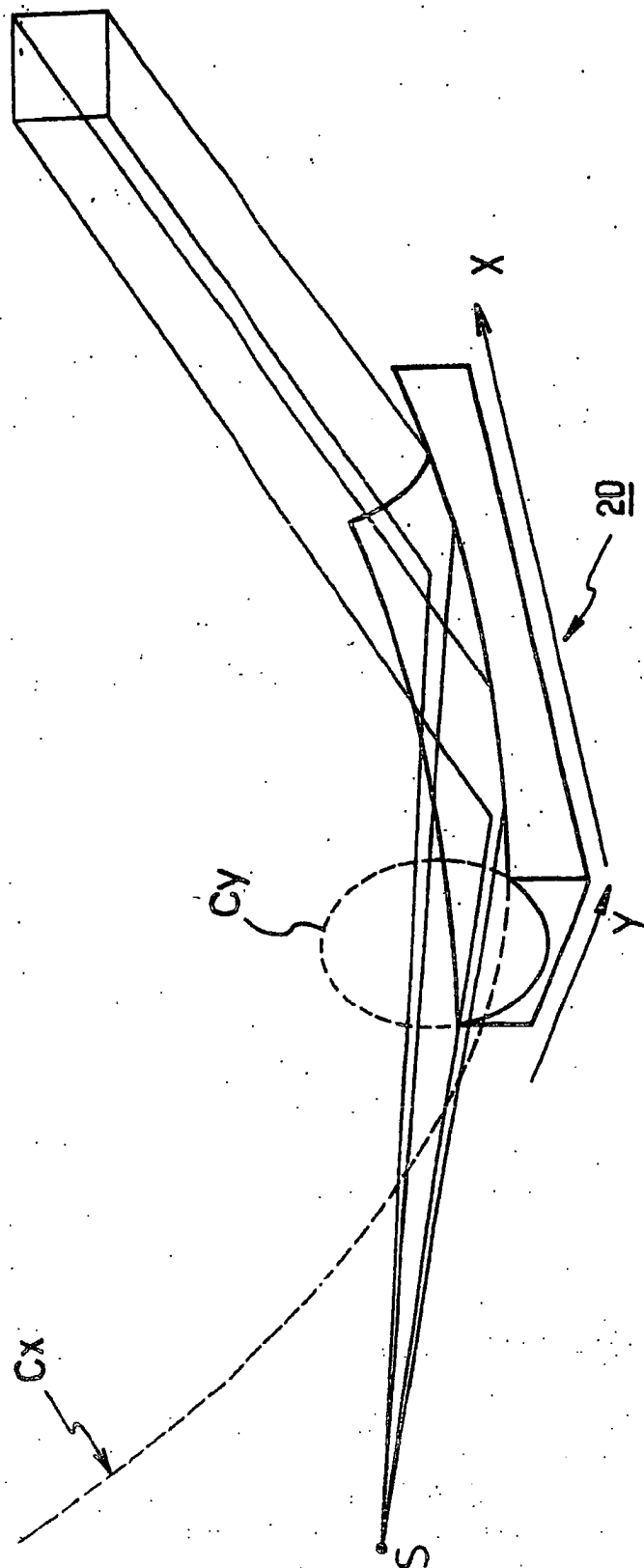
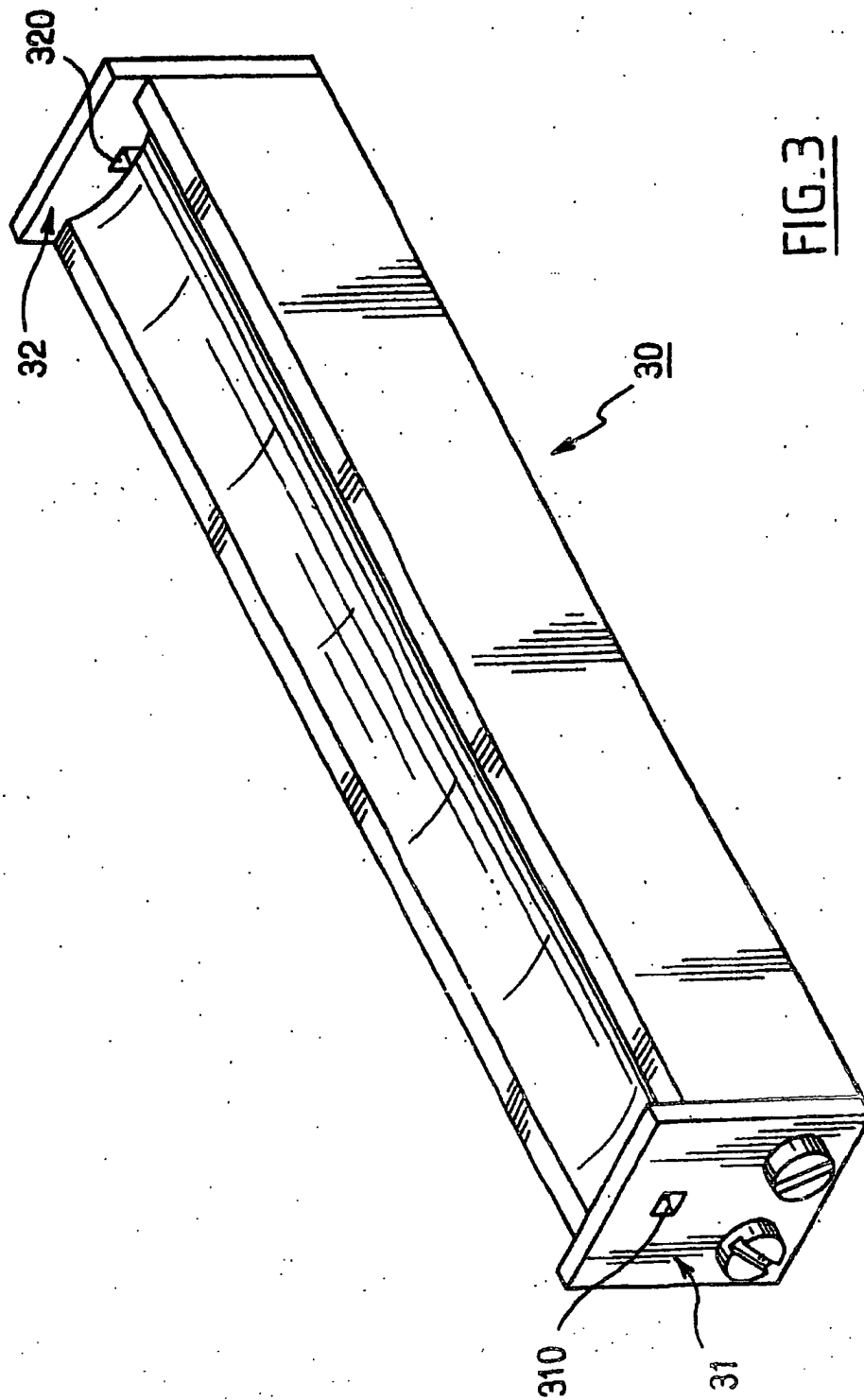


FIG. 2



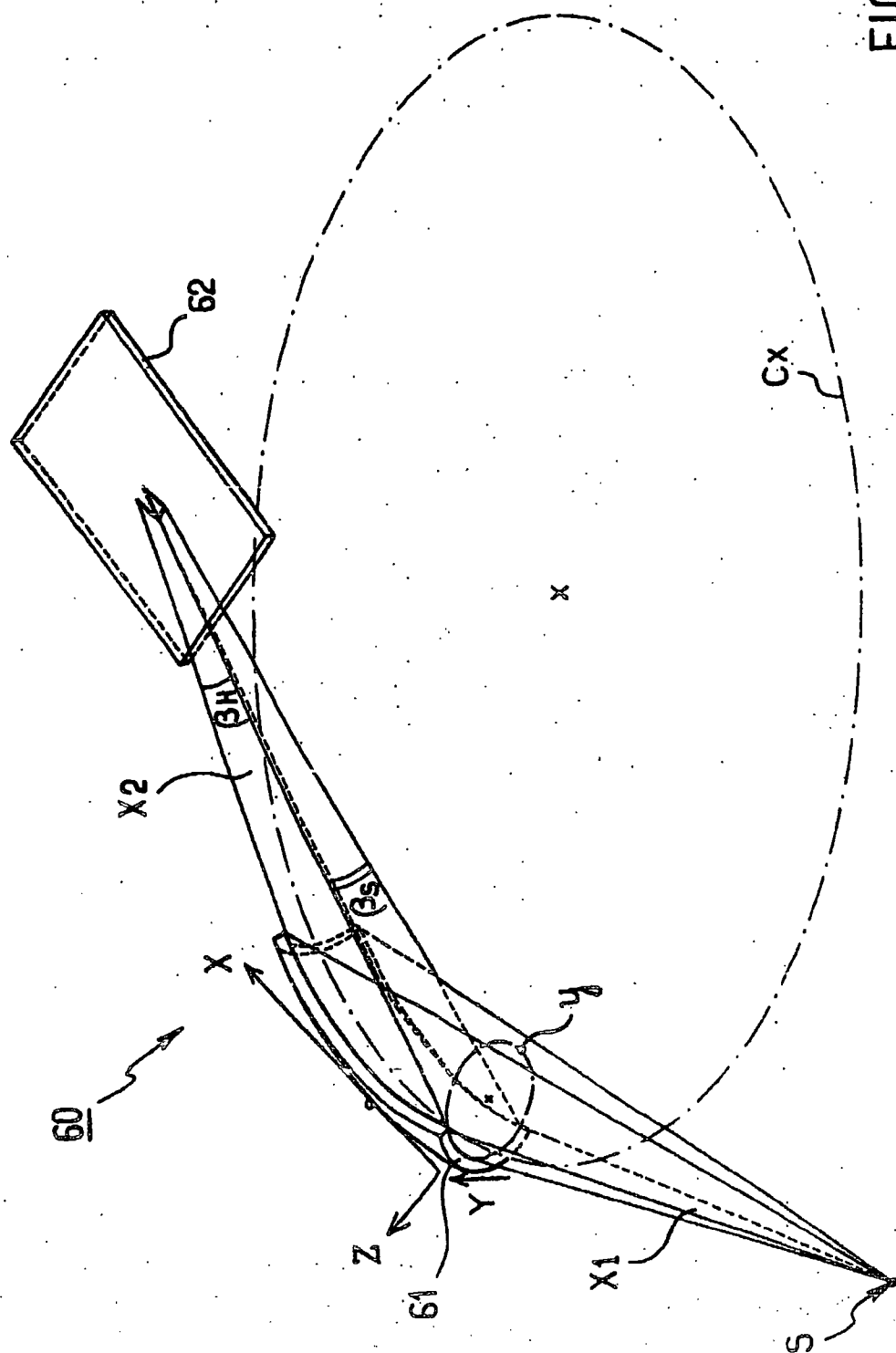


FIG. 4

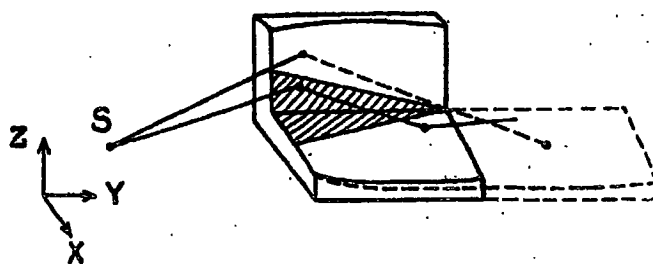


FIG. 5a

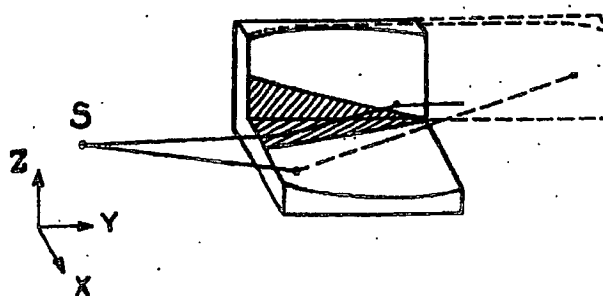


FIG. 6a