



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 13 994 T2** 2006.12.07

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 402 541 B1**

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

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 13 994.5**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US02/19272**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 742 177.5**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2002/103710**

(86) PCT-Anmeldetag: **18.06.2002**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **27.12.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **31.03.2004**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **16.08.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **07.12.2006**

(30) Unionspriorität:
299371 P 19.06.2001 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE, TR**

(73) Patentinhaber:
**X-Ray Optical Systems, Inc., East Greenbush, New
York, US**

(72) Erfinder:
**CHEN, Zewu, Schenectady, NY 12303, US;
GIBSON, M., David, Voorheesville, NY 12186, US**

(74) Vertreter:
Andrae Flach Haug, 81541 München

(54) Bezeichnung: **WELLENLÄNGEN-DISPERSIVES RÖNTGENFLUORESCENZ-SYSTEM MIT FOKUSIERENDER AN-
REGUNGSOPTIK UND EINEM FOKUSIERENDEN MONOCHROMATOR ZUM AUFFANGEN**

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] Diese Anmeldung enthält Sachverhalte, die den Gegenstand der folgenden Patent- und Anmeldungen im gemeinsamen Eigentum betreffen:

"Use Of A Kumakhov Lens For X-Ray Lithography", von Muradin A. Kumakhov, US-Patentschrift Nr. 5 175 755, erteilt am 29. Dezember 1992;

"Device For Controlling Beams Of Particles, X-Ray and Gamma Quanta" von Muradin A. Kumakhov, US-Patentschrift Nr. 5 192 869, erteilt am 9. März 1993;

"Use Of A Kumakhov Lens In Analytic Instruments" von Muradin A. Kumakhov, US-Patentschrift Nr. 5 497 008, erteilt am 5. März 1996;

"High Intensity, Small Diameter X-Ray Beam, Capillary Optic System", von David M. Gibson, US-Patentschrift Nr. 5 570 408, erteilt am 29. Oktober 1996;

"Multiple-Channel, Total-Reflection Optic With Controllable Divergence", von Gibson et al., US-Patentschrift Nr. 5 604 353, erteilt am 18. Februar 1997;

"Multiple Channel Optic", von Qi-Fan Xiao, US-Patentschrift-Nr. 5 745 547, erteilt am 28. April 1998;

"Curved Optical Device and Method Of Fabrication" von Zewu Chen, US-Patentschrift Nr. 6 285 506, erteilt am 4. September 2001;

"Doubly Curved Optical Device With Graded Atomic Planes", von Zewu Chen, US-Patentschrift Nr. 6 317 483, erteilt am 13. November 2001;

"Total-Reflection X-Ray Fluorescence Apparatus and Method Using a Doubly-Curved Optic", von Zewu Chen, US-Serien Nr. 09/667 966, eingereicht am 22. September 2000; und

"X-Ray Tube and Method an Apparatus for Analyzing Fluid Streams Using X-Rays", von Radley et al., US-Serien Nr. 60/336 584, eingereicht am 4. Dezember 2001.

Gebiet der Erfindung

[0002] Das Gebiet der vorliegenden Erfindung betrifft Röntgenfluoreszenz-(XRF-)spektroskopiesysteme und insbesondere ein System und ein Verfahren, die fokussierende röntgenoptische Elemente zum Bilden eines fokussierten Anregungsstrahls auf Proben und Monochromatoren zum Sammeln sekundärer Röntgenstrahlen von der Probe umfassen.

Hintergrund der Erfindung

[0003] Röntgenfluoreszenz-(XRF-)spektroskopie ist weit verbreitet als ein sehr genaues Verfahren zum Bestimmen der atomaren Zusammensetzung eines Materials anerkannt, die durch das Bestrahlen einer Probe mit Röntgenstrahlen und Beobachten der sich ergebenden sekundären Röntgenstrahlen erreicht wird, die von der Probe ausgestrahlt werden.

[0004] Im allgemeinen bestehen XRF-Systeme aus einer Anregungsstrahlungsquelle (einer Röntgenröh-

re oder einem Radioisotop), einer Vorrichtung zum Detektieren sekundärer Röntgenstrahlen von der Probe und zum Bestimmen ihrer Energie oder Wellenlänge, und einer Anzeige des spektralen Ausgangs. Die Intensität der sekundären Röntgenstrahlen bei bestimmten Energien oder Wellenlängen ist mit der Elementkonzentration in der Probe korreliert. Computer-Software wird oft verwendet, um die Daten zu analysieren und die Konzentration zu bestimmen.

[0005] Das Verfahren beginnt mit dem Bestrahlen einer Probe unter Verwendung einer Röntgenstrahlungsquelle. Wenn Röntgenphotonen die Probe treffen, schlagen sie Elektronen aus der inneren Schale des Atoms heraus, wobei Löcher erzeugt werden, die die Atome destabilisieren. Die Atome stabilisieren sich, wenn Elektronen von der äußeren Schale in die inneren Schalen übergehen, und bei dem Vorgang charakteristische Röntgenphotonen abgeben, deren Energie der Unterschied zwischen den beiden Bindungsenergien der entsprechenden Schalen ist. Es gibt zwei herkömmliche Ansätze, das Röntgenspektrum zu bestimmen, das von der Probe emittiert wird. Der erste Ansatz ist energiedispersierende Spektrometrie (EDS), und der zweite ist wellenlängendispergierende Spektrometrie (WDS). Bei einem energiedispersierendem Spektrometriesystem wird ein energiedispersierender Detektor, wie z.B. ein Festkörperzähler oder ein Proportionalzähler, eingesetzt, um das Energiespektrum der von der Probe emittierten Photonen zu bestimmen. Bei einem Wellenlängenspektrometriesystem wird ein Kristall oder eine Mehrschichtstruktur eingesetzt, um eine spezifische Röntgenwellenlänge aus den Röntgenphotonen auszuwählen, die von der Probe emittiert werden.

[0006] Röntgenfluoreszenz unter Verwendung von EDS ist das am meisten eingesetzte Verfahren zur Analyse der Elementkonzentration. Dieses Verfahren hat einige Vorteile. Erstens kann der EDS-Detektor fast alle Elemente der Periodentabelle auf einmal detektieren. Zweitens ist das System kompakt, weil eine zusätzliche Optik im Vergleich zu wellenlängendispergierenden Röntgenfluoreszenzsystemen auf der Sammelseite nicht erforderlich ist. Drittens kann eine Niedrigenergie-Röntgenröhre verwendet werden, weil der EDS-Detektor einen großen festen Sammelwinkel und eine hohe Effizienz aufweist. Es gibt jedoch Nachteile für XRF/EDS-Systeme, einschließlich relativ schlechter Empfindlichkeit und schlechter Energieauflösung. Auch weil der EDS-Detektor alle Röntgenstrahlen von der Probe sieht, wird der Detektor leicht von dem Fluoreszenzsignal von den größeren Elementen und der starken Streuung des Primärstrahls gesättigt.

[0007] Röntgenfluoreszenz unter Verwendung von WDS hat aber auch verschiedene Vorteile, einschließlich höherer Energieauflösung und höherem Signal-zu-Untergrundverhältnis im Vergleich zu

WDS-Systemen. Somit ist der XRF/WDS-Ansatz ein starkes Werkzeug zum Verfolgen der Elementanalyse und von Anwendungen, die eine hohe Energieauflösung erfordern. Jedoch gibt es Nachteile für herkömmliche XRF/WDS-Systeme, einschließlich einer Anforderung für eine Hochenergie-Röntgenröhre aufgrund der Beschränkungen des WDS-Ansatzes, der zu einer niedrigen Effizienz und einem kleinen festen Sammelwinkel führt. Ein anderer Nachteil des herkömmlichen WDS-Systems besteht darin, dass der Kristall- oder die Mehrschichtstruktur auf der Sammelseite nur eine spezielle Röntgenwellenlänge auswählt, und ein Scannmechanismus oder ein Mehrkristallsystem wird für eine Mehrelementdetektion benötigt. Das hat den Vorteil, dass die Detektorsättigung vermieden werden kann, aber es führt zu einer komplizierten Ausrichtung. Daher sind XRF/WDS-Systeme typischerweise sperrig, komplex und im Vergleich zu XRF/EDS-Systemen teurer.

[0008] USP 5 982 847 für Nelson offenbart ein energiedispersierendes (EDS)-System, das nur polychromatische Optiken in sowohl den Detektions- als auch dem Sammelweg einsetzt. Keine Erwähnung von Beugungsoptiken in entweder dem Anregungs- oder Sammelweg wird gemacht.

[0009] Die WO 02/25258 von X-Ray Optical Systems, Inc. ist auch streng ein EDS-System. Obwohl monochromatische Anregung verwendet wird, wird keine Detektionsoptik offenbart oder durch dieses Dokument gelehrt – der Detektionsweg ist nicht auf spezielle Wellenlängen mit einer Detektionsoptik beschränkt. Daher trifft das Detektionssystem auf ein breiteres Band an Wellenlängen und bearbeitet dieses breite Band unter Verwendung herkömmlicher EDS-Techniken.

[0010] Die EP 0 339 137 von N.V. Philips offenbart ein WDS-System, wobei dieses Dokument jedoch, wie oben diskutiert, die konventionelle Technik des Beleuchtens eines sehr großen Probengebiets offenbart, wobei ein Loch/Schlitz **6** vorgesehen ist, um den Einfallswinkel auf die Optik **22** zu definieren, wodurch der feste Sammelwinkel erheblich beschränkt wird. Es gibt keine Offenbarung, Lehre oder ein Hinweis auf eine fokussierende Optik, die eine kleine Probenpunktgröße, und die damit verbundenen Vorteile der vorliegenden Erfindung, schafft. Die kleine Probenpunktgröße der vorliegenden Erfindung ist an der Stelle **6** "angeordnet", aber ohne Beschränken des festen Sammelwinkels der Detektionsoptik.

[0011] Chen, u.a. "Microprobe X-Ray Fluorescence with the Use of Point-Focusing Diffractors," Appl. Phys. Lett. 71(13) 1884-1886, Sept. 1997 ist ähnlich zu der oben diskutierten WO 02/25258. Obwohl monochromatische Anregung eingesetzt wird, wird keine Detektionsoptik offenbart oder durch dieses Dokument gelehrt – der Detektionsweg ist nicht auf spezi-

elle Wellenlängen mit einer Detektionsoptik eingeschränkt.

[0012] USP 5 406 609 für Arai et. al. ist auch ähnlich zu dem Schema der monochromatischen Anregung mit einer Standard-EDS-Detektion der WO 02/25258.

[0013] während die meisten XRF-Instrumente im großen und ganzen für die Analyse eines weiten Bereichs von Elementen ausgelegt sind, gibt es viele wichtige Anwendungen in der Industrieverfahrenssteuerung, die die Detektion des einzelnen Elements oder eine beschränkte Elementdetektion erfordern. Somit ist die vorliegende Erfindung darauf gerichtet, kompakte XRF/WDS-Systeme anzugeben, die eine extrem hohe Empfindlichkeit oder eine Hochgeschwindigkeitsanalyse für eine beschränkte Anzahl an Elementen schaffen.

Zusammenfassung der Erfindung

[0014] Nachteile der früheren Ansätze werden überwunden, und zusätzliche Vorteile werden durch die vorliegende Erfindung geschaffen, die gemäß einem Gesichtspunkt ein Röntgenfluoreszenz-(XRF-) Spektroskopie-System umfasst. Das XRF-System umfasst zumindest eine Röntgenstrahlungsquelle und zumindest eine Anregungsoptik, die zwischen der zumindest einen Röntgenstrahlungsquelle und der Probe angeordnet ist. Die zumindest eine Anregungsoptik sammelt Röntgenstrahlung von der zumindest einen Quelle und fokussiert die Röntgenstrahlung zu einem Brennpunkt auf der Probe, um zumindest einen Analyten in der Probe zum Fluoreszieren anzuregen. Das System umfasst ferner zumindest einen Röntgendetektor und zumindest eine Sammeloptik. Die zumindest eine Sammeloptik umfasst zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik, die zwischen der Probe und dem zumindest einem Röntgendetektor angeordnet ist, um Röntgenfluoreszenz von dem Brennpunkt auf der Probe zu sammeln und die Fluoreszenzröntgenstrahlung in Richtung des zumindest einen Röntgendetektors zu lenken.

[0015] Zahlreiche Verbesserungen an dem oben beschriebenen XRF-Spektroskopie-System werden auch beschrieben und hierin beansprucht. Zum Beispiel könnte die zumindest eine Röntgenstrahlungsquelle zumindest eine Elektronbeschussröntgenquelle umfassen. Die zumindest eine Anregungsoptik könnte zumindest eine fokussierende polychromatische Optik umfassen, zum Beispiel eine oder mehrere Polykapillaroptiken, und/oder könnte zumindest eine fokussierende monochromatische Optik umfassen. Die fokussierende monochromatische Optik(en) könnte(n) zumindest ein doppelt gekrümmtes Teil und/oder zumindest eine doppelt gekrümmte Mehrschichtoptik umfassen. Der Brennpunkt könnte eine Brennpunktgröße von weniger als 500 µm umfassen, und die Probe könnte ein Festkörper oder ein Fluid

sein. Überdies könnte die Probe ein Produkt auf Erdölbasis sein, wie z.B. Benzin, Diesel, Rohöl oder Schmieröl. Das zumindest eine anzuregende Analyt in der Probe könnte Schwefel und/oder Eisen umfassen. Außerdem kann die Röntgenstrahlung, die auf die Probe fokussiert wird, auf die Probe in einem Winkel kleiner als der Winkel externer Totalreflektion fallen, wie es für Totalreflektion-Röntgenfluoreszenz (TXRF) wünschenswert ist, oder die Röntgenstrahlung, die auf die Probe fokussiert wird, kann auf die Probe in einem Winkel größer als der Winkel der externen Totalreflektion fallen, wie es für normale Röntgenfluoreszenz wünschenswert ist.

[0016] Weitere Verbesserungen können die zumindest eine Sammeloptik umfassen, die Röntgenstrahlen des zumindest einen Analyts in Richtung des Detektors (der Detektoren) umfassen, um die Konzentration des zumindest einen Analyts in der Probe oder eine Dicke der Probe zu bestimmen. Ferner könnte die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik der zumindest einen Sammeloptik zumindest ein doppelt gekrümmtes Kristall umfassen. Das zumindest eine doppelt gekrümmte Kristall könnte eine Johann-Geometrie, eine Johannson-Geometrie, eine Teilannäherung an die Johannson-Geometrie aufweisen, oder könnte eine logarithmische Spiralkristalloptik umfassen. Noch weiter könnte die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik zumindest eine doppelt gekrümmte Mehrschichtoptik umfassen, die bei bestimmten Ausführungen eine doppelt gekrümmte abgestufte Optik oder eine doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmte Optik sein könnte. Noch weiter könnte die zumindest eine Sammeloptik relativ zu der Probe und dem zumindest einen Röntgendetektor fixiert sein. Der zumindest eine Röntgendetektor könnte ein oder mehrere Gasproportionalzähler, ein oder mehrere Szintillationszähler und/oder eine oder mehrere Festkörperzähler sein. Der eine oder die mehreren Festkörperzähler können zumindest einen PIN-Diodenfestkörperzähler umfassen.

[0017] Gemäß einem weiteren Gesichtspunkt wird ein Röntgenfluoreszenzspektroskopie-(XRF-) Verfahren offenbart. Dieses Verfahren umfasst: Bereitstellen zumindest einer Röntgenstrahlungsquelle; Bereitstellen zumindest einer Anregungsoptik, die zwischen der zumindest einen Röntgenstrahlungsquelle und einer zu analysierenden Probe angeordnet wird, um Röntgenstrahlung von der zumindest einen Quelle zu sammeln und die Röntgenstrahlung zu einem Brennpunkt auf der Probe zu fokussieren, um zumindest einen Analyten in der Probe zum Fluoreszieren anzuregen; Bereitstellen zumindest eines Röntgendetektors; und Anordnen der zumindest einen Sammeloptik, die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik umfasst, zwischen der Probe und dem zumindest einen Röntgendetektor, um Röntgenfluoreszenz aus dem Brennpunkt auf der

Probe zu sammeln und die Fluoreszenzröntgenstrahlen in Richtung des zumindest einen Röntgendetektors zu fokussieren.

[0018] Zusätzliche Merkmale und Vorteile werden durch die Technik der vorliegenden Erfindung realisiert. Weitere Ausführungen und Gesichtspunkte der Erfindung werden im Detail hierin beschrieben und werden als ein Teil der beanspruchten Erfindung betrachtet.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0019] Der Gegenstand, der als die Erfindung betrachtet wird, ist insbesondere in den Ansprüchen im Anschluss an die Beschreibung dargelegt und ausdrücklich beansprucht. Das Vorangehende und weitere Aufgaben, Merkmale und Vorteile der Erfindung werden aus der folgenden detaillierten Beschreibung klar, genommen im Zusammenhang mit den beigefügten Zeichnungen, wobei:

[0020] [Fig. 1](#) eine Ausführung eines XRF/WDS-Systems **100** gemäß einem Gesichtspunkt der Erfindung zeigt;

[0021] [Fig. 2](#) eine doppelt gekrümmte Kristalloptik zeigt, die eine Punkt-zu-Punkt-Fokussierung zur Verwendung in einem System gemäß der vorliegenden Erfindung schafft;

[0022] [Fig. 3A](#) eine Ausführung der Geometrie eines doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmten Kristalls oder einer Mehrschicht-Optik zur Verwendung in einem System gemäß der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0023] [Fig. 3B](#) eine Querschnittsansicht der Optik von [Fig. 3A](#) entlang der Linie B-B zeigt;

[0024] [Fig. 4](#) eine weitere Ausführung eines XRF/WDS-Systems **200** gemäß einem Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung zeigt; und

[0025] [Fig. 5](#) eine Polykapillaroptik zeigt, die eine Punkt-zu-Punkt-Fokussierung zur Verwendung in einem System gemäß eines Gesichtspunkts der vorliegenden Erfindung schafft.

Beste Art zum Ausführen der Erfindung

[0026] Allgemein gesprochen umfasst eine Ausführung eines kompakten XRF/WDS-Systems gemäß einem Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung eine Röntgenquelle, eine Anregungsrontgenoptik, die Röntgenstrahlen auf eine Probe von der Quelle fokussiert, zumindest einen Sammelmonochromator und einen Röntgenzähler. Die Anregungsrontgenoptik kann eine fokussierende Polykapillaroptik sein, die eine polychromatische Anregung schafft, oder eine

Punkt-fokussierende doppelt gekrümmte Kristalloptik, die eine monochromatische Anregung schafft. Der Sammelmonochromator (der eine doppelt gekrümmte Kristalloptik, eine doppelt gekrümmte Mehrschichtoptik oder eine andere doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik sein kann) wählt eine gewünschte charakteristische Wellenlänge eines Elements aus. Die Intensität der reflektierten Röntgenstrahlen wird von einem Detektor gemessen und mit der Konzentration dieses Elements in der Probe korreliert.

[0027] Ein Gesichtspunkt eines XRF/WDS-Systems gemäß der vorliegenden Erfindung besteht darin, dass die Anregungsoptik effizient einen großen Kegelwinkel von Röntgenstrahlen von einer Punkt-Röntgenquelle einfangen kann. Diese Optik ist eine fokussierende Optik, die einen sehr intensiven Anregungsstrahl auf die Probe erzeugen kann, selbst bei der Verwendung einer kompakten Niedrigenergie (z.B. < 1 kW und vorteilhafterweise < 100 W)-Röntgenquelle. Die Verwendung einer Niedrigenergie-Röntgenröhre macht dieses System viel kompakter und einfacher im Vergleich zu einem herkömmlichen XRF/WDS-System, das eine sperrige kW-Röntgenröhre einsetzt.

[0028] Ein weiterer Gesichtspunkt besteht darin, dass ein monochromatischer Anregungsstrahl erzeugt werden kann, wenn eine doppelt gekrümmte Kristalloptik als Anregungsoptik verwendet wird. Bei einer typischen Ausführung eines XRF/WDS-Systems wird ein polychromatischer Strahl verwendet, um die Probe anzuregen. Monochromatische Anregung ergibt ein viel höheres Signal-zu-Untergrund-Verhältnis als die polychromatische Anregung aufgrund der Eliminierung der Streubremsstrahlung von der Röntgenquelle auf die Probe. Das verbessert die Nachweisgrenze des Systems erheblich. Monochromatische Anregung vereinfacht auch die quantitative Analyse des XRF stark.

[0029] Noch ein weiterer Gesichtspunkt der Erfindung besteht darin, dass der Anregungsstrahl auf die Probe fokussiert wird, wegen der Fokussierfähigkeit der Anregungsoptik. Die Brennpunktgröße des Strahls auf der Probe kann in dem Bereich von 50 μ bis 500 μ liegen, was ungefähr zwei Größenordnungen kleiner als die Strahlgröße eines herkömmlichen Systems ist (die typischerweise ~ 10mm–30 mm beträgt). Neben dem Schaffen eines effizienten Sammelns erlaubt diese kleinere Strahlgröße eine räumliche Auflösung bei der Analyse.

[0030] Aufgrund des kleineren Probenanregungsgebiets kann eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik effizient als die Sammeloptik eingesetzt werden (bei einem anderen Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung). Doppelt gekrümmte monochromatische Optiken können größere feste Sammelwinkel von einem Punkt schaffen. (Bei einem herkömmlichen

XRF/WDS-System mit einer großen Anregungsstrahlgröße, ist ein flacher oder einfach gekrümmter Monochromator die Wahl, und der feste Sammelwinkel ist begrenzt.) Ein doppelt gekrümmter Monochromator verbessert das Signalniveau erheblich für das detektierte Element für eine bestimmte Geometrie und Intensität des Anregungsstrahls.

[0031] Ein weiterer Gesichtspunkt dieser Erfindung besteht darin, dass die Sammeloptik relativ zu der Probe und dem Detektor fixiert werden kann, wobei keine sich bewegenden Teile involviert sind. Das könnte sowohl Vorteile als auch Nachteile haben. Ein Vorteil würde sein, dass es die Analyse beschleunigt und die Zuverlässigkeit des Systems verbessert, während ein Nachteil daran besteht, dass mehrere Sammeloptiken notwendig sein können, zum Beispiel für eine Mehrelementanalyse.

[0032] Mit anderen Worten ist gemäß den Prinzipien der vorliegenden Erfindung ein XRF-WDS-System mit Röntgenfokussieroptik beschrieben, die eine polychromatische oder monochromatische Anregung einer Probe schafft. Sekundäre Röntgenstrahlen, die aus Röntgenfluoreszenz resultieren, werden von einem Monochromator gesammelt, der einen doppelt gekrümmten Diffraktor zum Weiterleiten zu einem Detektor umfasst, wie z.B. einem Proportionalzähler, einem Raumtemperatur-PIN-Detektor oder einem NaI-Detektor. Ein Beispiel eines XRF/WDS-Systems 100, das eine derartige Röntgenoptik verwendet, um monochromatische Anregung zu schaffen und Röntgenstrahlen von der Probe sammelt, ist im Detail unten mit Bezug auf [Fig. 1](#) beschrieben.

[0033] Das XRF/WDS-System 100 umfasst zum Beispiel eine Niedrigenergie-Röntgenquelle 110, eine monochromatische Fokussieroptik 120, eine Probe 130, einen Sammelmonochromator 140 und einen Detektor 150.

[0034] Die Niedrigenergie-Röntgenquelle 110 (z.B. < 1 kW und idealer < 100 W) ist eine Quelle von Röntgenstrahlung, wie zum Beispiel eine Röntgenröhre, eine abgedichtete Quelle radioaktiven Materials oder eine Röntgenstrahlungsquelle von Hochenergieelektronen, die auf ein Metallziel treffen und Röntgenstrahlung erzeugen. Ein Beispiel einer Niedrigenergie-Röntgenquelle 110 ist eine 50 W Röntgenröhre mit einem Zielmaterial, das Chrom, Kupfer, Wolfram oder Molybdän umfasst, und eine Elektronenstrahlgröße auf dem Zielmaterial in dem Bereich von ungefähr 50 μ m bis 300 μ m.

[0035] Die Probe 130 ist ein Material, das metrologischen Messungen zu unterziehen ist. Ein Beispiel einer Probe 130 kann eine Prozessströmung sein, wie zum Beispiel Dieselkraftstoff, an dem eine Messung der Konzentration von Schwefel gewünscht ist, oder Schmieröl, an dem eine Messung der Konzentration

von Verschleißmetall (Eisen) erwünscht ist. Wenn die Probe **130** eine Fluidströmung ist, kann ein Fenstermaterial (nicht gezeigt) vorgesehen werden, um die Transmission einer Röntgenanregungsstrahlung in und eine Röntgenfluoreszenz aus der Probe **130** zu ermöglichen.

[0036] Eine monochromatische Fokussieroptik **120**, die zwischen der Röntgenquelle **110** und der Probe **130** des XRF-Systems **100** angeordnet ist, dient dazu, nur Strahlung in einem kleinen Bereich von Energien zu der Probe **130** zu reflektieren oder zu übertragen, z.B. einen Bereich von Energien zwischen mehreren zehn oder hunderten Elektronen-Volt, im Gegensatz zu polychromatischen Optiken, die Strahlung mit Energiebandbreiten von tausenden Elektronen-Volt übertragen. Die Optik **120** fokussiert auch die Röntgenstrahlen in einen kleinen Brennpunkt auf der Probe **130**. Die Größe dieses Brennpunkts kann in dem Bereich von 50 µm bis 500 µm liegen.

[0037] Ein Beispiel einer Fokussieroptik **120** ist ein doppelt gekrümmtes Johann-Typ-Kristall. Ein Beispiel der Geometrie eines doppelt gekrümmten Johann-Typ-Kristalls ist in [Fig. 2](#) gezeigt. Bei dieser Geometrie sind die Beugungsebenen des Kristalls **160** parallel zu der Kristalloberfläche gezeigt. Die Kristalloberfläche, die eine toroide Form aufweist, hat die Johann-Geometrie in der Ebene des Brennkreises **170** und Axialsymmetrie entlang der Linie SI, wobei Punkt S der Ort der Röntgenquelle **110** ([Fig. 1](#)) und Punkt I der Brennpunkt ist. Die Kristalloberfläche hat einen Krümmungsradius von $2R$ in der Ebene des Brennkreises und einen Krümmungsradius von $2R\sin^2\theta_B$ in der Mittelebene senkrecht zu dem Segment SI, wobei R der Radius des Brennkreises und θ_B der Bragg-Winkel ist. Röntgenstrahlen, die von dem Punkt S divergieren und die Kristalloberfläche mit Einfallswinkeln in der Bewegungskurvenbreite des Kristalls treffen, werden effizient zu Punkt I reflektiert. Diese Art an doppelt gekrümmten Kristall schafft nicht nur eine Punktfokussierung, sondern auch eine Monochromatisierung von Strahl **180**, weil nur Röntgenphotonen mit der richtigen Wellenlänge reflektiert werden können.

[0038] Wie in [Fig. 1](#) gezeigt, ist die Röntgenoptik **140** ein weiteres, monochromatisierendes optisches Element des XRF-Systems **100** und ist zwischen der Probe **130** und dem Detektor **150** angeordnet. Diese Optik sammelt eine spezifische Wellenlänge von Röntgenstrahlen und lenkt die Röntgenstrahlen zu einem Röntgendetektor. Bei einem herkömmlichen XRF/WDS-System kann eine flache oder einfach gekrümmte Kristalloptik die Optik der Wahl sein. Bei der vorliegenden Erfindung ist der Sammelmonochromator ein doppelt gekrümmter Diffraktor (z.B. ein Kristall oder eine Mehrschichtoptik), die einen viel größeren festen Sammelwinkel von einem Punkt schaffen kann, als eine flache/einfach gekrümmte Optik.

[0039] Ein bestimmtes Beispiel einer monochromatischen Sammeloptik **140** ist eine doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmte Kristalloptik. Eine Ausführung dieser Geometrie ist in den [Fig. 3A](#) und [Fig. 3B](#) illustriert. Bei dieser Geometrie sind die Diffraktionsebenen der Kristalloptik parallel zu der Kristalloberfläche. Die Kristalloberfläche bei der dispersiven Ebene hat die Form einer logarithmischen Spirale und eine Rotationssymmetrie um die Achse ID, wobei Punkt I der Ursprung der logarithmischen Spirale und der Brennpunkt des Anregungsstrahls auf die Probe **130** ([Fig. 1](#)) ist, und Punkt D der Ort des Detektors **150** ([Fig. 1](#)) ist. Fluoreszenzröntgenstrahlen, die von dem Punkt I an der Probenoberfläche emittiert werden, haben einen konstanten Einfallswinkel auf diese logarithmische Spiralenoberfläche aufgrund der Eigenschaft der Spiralkurve. Dieser konstante Winkel wird ausgewählt, der Bragg-Winkel der charakteristischen Röntgenstrahlen des interessierenden Elements in der Probe **130** für die Beugungsebenen des Kristalls zu sein. Die von der doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmten Geometrie reflektierten Röntgenstrahlen werden nicht einen Punkt bilden, aber eine Brennfläche in der dispersiven Ebene. Die Röntgenstrahlen werden auf die Achse ID fokussiert, wie in [Fig. 3B](#) gezeigt, entlang der Richtung von ID.

[0040] Alternativ können Mehrschichtoptiken in dem System von [Fig. 1](#) als monochromatische Optik **120** und monochromatische Optik **140** eingesetzt werden. Der Detektor **150** kann ein einfacher Zähl-detektor sein, nämlich ein proportionaler Gaszähler, ein Szintillationszähler oder ein Raumtemperatur-PIN-Diodenfestkörperzähler.

[0041] Vorteilhafterweise ist das XRF/WDS-System **100** gut für eine Hochempfindlichkeits-Elementverfolgungsanalyse geeignet. Die Punkt-zu-Punkt fokussierende doppelt gekrümmte Kristalloptik schafft einen großen festen Sammelwinkel und bildet einen sehr intensiven fokussierenden monochromatischen Strahl auf die Probe, selbst bei der Verwendung einer Niedrigenergie-Röntgenröhre. Aufgrund der monochromatischen Anregung ist das Signal-zu-Untergrundverhältnis erheblich verbessert, und die Detektionsempfindlichkeit ist verbessert. Die Punktfokussierung des Anregungsstrahls auf die Probe ermöglicht die effiziente Verwendung einer doppelt gekrümmten Sammeloptik, um den festen Sammelwinkel der Röntgenfluoreszenzstrahlen zu verbessern. Das wird weiter die Empfindlichkeit des Systems verbessern.

[0042] Als eine spezielle Ausführung von dem XRF/WDS-System **100** von [Fig. 1](#) könnte das System eine Röntgenquelle **110** umfassen, die eine 50 W Röntgenröhre mit einem Quellenmaterial aus Chrom, Kupfer, Wolfram oder Molybdän, und einer Punktgröße auf dem Quellenmaterial umfasst, die ungefähr

100 µm bis 200 µm beträgt. Die Optik **120** kann ein doppelt gekrümmtes punktfokussierendes Kristall sein, das aus Silizium, Germanium oder anderen Kristallmaterialien hergestellt ist, und 100 mm bis 200 mm von der Röntgenquelle **110** entlang der optischen Achse angeordnet ist, die so definiert wird, wie sich die Strahlung zentral von der Röntgenquelle fortbewegt und zentral zu dem doppelt gekrümmten Kristall **120** auf das doppelt gekrümmte Kristall **120** auftrifft. Die Probe **130** kann Öl sein, zum Beispiel mit Spurenelementen, die Schwefel, Vanadium und Nickel umfassen können. Die Probe **130** kann 100 mm bis 200 mm von der monochromatischen Optik **120** angeordnet sein, gemessen entlang der optischen Achse. Die zweite monochromatische Optik **140** kann ein doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmtes Kristall sein, das aus Silicium, Germanium oder einem anderen Kristallmaterial hergestellt ist, und 100 mm bis 200 mm von der Probe **130**, gemessen entlang der optischen Achse angeordnet ist. Ein Detektor **150** kann ein proportionaler Gaszähler, ein Szintillationszähler, ein Raumtemperatur-PIN-Detektor oder ein NaI-Detektor sein und 100 mm bis 200 mm von der Probe, gemessen entlang der optischen Achse, angeordnet sein.

[0043] Durch Hinzufügen von einem oder mehreren Sammelmonochromatoren und Detektoren zu dem System **100** können zwei oder mehr Elemente detektiert werden, wobei jeder Sammelmonochromator mit einem Detektor für eine entsprechende Detektion eines einzelnen Elements gepaart ist.

[0044] **Fig. 4** zeigt eine alternative Ausführung eines XRF-Systems **200** gemäß einem Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung. Das System **200** umfasst eine Quelle **210**, eine polychromatische Fokussieroptik **220**, eine Probe **230**, eine doppelt gekrümmte monochromatische Optik **240** und einen Detektor **250**.

[0045] Die polychromatische Optik **220** ist ein optisches Element, das einen breiten Bereich von Photonenenergien überträgt, während die Photonen, die sie sammelt, zu einem kleinen Punkt auf der Probe **230** fokussiert werden. Ein Beispiel einer polychromatischen Optik, die gut geeignet ist, als Optik **220** zu funktionieren, ist eine Polykapillaroptik **300** (siehe **Fig. 5**), wie sie zum Beispiel von X-Ray Optical Systems aus Albany, New York, erhältlich ist. Eine Polykapillaroptik, die im Detail in vielen der oben aufgenommenen Patente beschrieben ist, ist ein Bündel dünner, hohler Röhren, die Photonen über Totalreflektion übertragen.

[0046] Aufgrund der polychromatischen Anregung wird das Signal-zu-Untergrundverhältnis schlechter als verglichen mit dem vom System **100** (**Fig. 1**) sein. Jedoch kann das System **200** (**Fig. 4**) verschiedene Vorteile bieten. Zum Beispiel kann mit dem System

200 ein kleinerer Brennpunkt aufgrund der besseren Fokussierfähigkeit einer Polykapillaroptik erreicht werden. Das kann eine bessere räumliche Auflösung für eine lokale Analyse ergeben. Zum Beispiel kann ein 20 µm bis 50 µm Brennpunkt unter Verwendung einer 50 W Röntgenröhre und einer Polykapillaroptik erreicht werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die polychromatische Anregung Röntgenphotonen mit einem breiten Energiebereich schafft, der nahezu all die Elemente in der periodischen Tabelle abdecken kann.

[0047] Bei einer bestimmten Ausführung kann das XRF/WDS-System **200** eine Röntgenquelle **210** umfassen, die eine 50 W Röntgenröhre sein kann, mit einem Quellenmaterial aus Chrom, Kupfer, Wolfram oder Molybdän und eine Punktgröße auf dem Zielmaterial, die ungefähr 100 µm bis 200 µm beträgt. Die polychromatische Optik **220** kann eine Polykapillaroptik sein, die 30 mm bis 50 mm von der Röntgenquelle **210** angeordnet ist. Die Probe **230** kann zum Beispiel Öl mit Elementen sein, die Schwefel, Vanadium und Nickel umfassen. Die Probe **230** könnte 100 mm bis 200 mm von der Polykapillaroptik **220** angeordnet sein. Der doppelt gekrümmte Monochromator **240** kann ein doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmtes Kristall sein, das aus Silizium, Germanium oder einem anderen Kristallmaterial hergestellt ist und 100 mm bis 200 mm von der Probe **230**, gemessen entlang der optischen Achse, angeordnet ist. Der Detektor **250** könnte ein proportionaler Gaszähler, ein Szintillationszähler, ein Raumtemperatur-PIN-Detektor oder ein NaI-Detektor sein, der 100 mm bis 200 mm von der monochromatischen Optik **240**, gemessen entlang der optischen Achse, angeordnet ist. Mehrere Sammelmonochromatoren mit entsprechenden Detektoren können auch für Mehr-Elementdetektion eingesetzt werden.

[0048] Obwohl bestimmte Ausführungen hier dargestellt und beschrieben wurden, ist es den Fachleuten in der relevanten Technik klar, dass verschiedene Modifikationen, Zusätze, Austausche und dergleichen ohne von der Erfindung, wie in den folgenden Ansprüchen definiert, abzuweichen, gemacht werden können.

Patentansprüche

1. Wellenlängendispergierendes Röntgenfluoreszenz-(XRF-) Spektroskopiesystem mit: zumindest einer Röntgenstrahlungsquelle (**110/210**), zumindest einem Röntgendetektor (**150/250**), und zumindest einer monochromatischen Sammeloptik (**140/240**), die zumindest eine doppelt gekrümmte zwischen einer Probe (**130/230**) und dem zumindest einem Röntgendetektor angeordnete Diffraktionsoptik zum Sammeln von Röntgenfluoreszenz von einem Brennpunkt auf der Probe und zum Lenken der Fluoreszenzröntgenstrahlung einer charakteristischen Energie eines

vorbestimmten Analyten in Richtung des zumindest einem Röntgendetektors aufweist; gekennzeichnet durch:

zumindest eine Anregungsoptik (**120/220**), die zwischen der zumindest einen Röntgenstrahlungsquelle und der Probe zum Sammeln von Röntgenstrahlung von der zumindest einen Quelle und zum Fokussieren der Röntgenstrahlung zu dem Brennpunkt auf der Probe angeordnet ist, um den Analyten in der Probe zum Fluoreszieren anzuregen.

2. XRF-Spektroskopiesystem von Anspruch 1, bei dem die zumindest eine Röntgenstrahlungsquelle (**110**) zumindest eine Elektronenbeschussröntgenquelle umfasst.

3. XRF-Spektroskopiesystem, bei dem die zumindest eine Anregungsoptik zumindest eine fokussierende polychromatische Optik (**220**) umfasst.

4. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 3, bei dem die zumindest eine fokussierende polychromatische Optik zumindest eine Polykapillaroptik umfasst.

5. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die zumindest eine Anregungsoptik zumindest eine fokussierende monochromatische Optik (**120**) umfasst.

6. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 5, bei dem die zumindest eine fokussierende monochromatische Optik zumindest ein doppelt gekrümmtes Kristall umfasst.

7. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 5, bei dem die zumindest eine fokussierende monochromatische Optik zumindest eine doppelt gekrümmte Mehrschichtoptik umfasst.

8. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem der Brennpunkt eine Brennpunktgröße von weniger als 500 μm aufweist.

9. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die auf die Probe fokussierte Röntgenstrahlung auf die Probe in einem Winkel kleiner als der Winkel externer Totalreflektion fällt.

10. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die auf die Probe fokussierte Röntgenstrahlung auf die Probe in einem Winkel größer als der Winkel externer Totalreflektion fällt.

11. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die Probe einen Festkörper umfasst.

12. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die Probe ein Fluid umfasst.

13. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 12, bei dem das Fluid ein Produkt auf Erdölbasis umfasst.

14. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 13, bei dem das Produkt auf Erdölbasis Benzin oder Diesel umfasst.

15. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 13, bei dem das Produkt auf Erdölbasis Rohöl umfasst.

16. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 11, bei dem das Produkt auf Erdölbasis Schmieröl umfasst.

17. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem der zumindest eine Analyt Schwefel umfasst.

18. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem der zumindest eine Analyt Eisen umfasst.

19. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die zumindest eine Sammeloptik (**140/240**) Röntgenstrahlen des Analyten in Richtung des zumindest einen Röntgendetektors zum Bestimmen der Konzentration des Analyten in der Probe oder einer Dicke der Probe lenkt.

20. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik zumindest ein doppelt gekrümmtes Kristall umfasst.

21. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 20, bei dem das zumindest eine doppelt gekrümmte Kristall zumindest ein doppelt gekrümmtes Kristall mit einer Johann-Geometrie umfasst.

22. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 20, bei dem das zumindest eine doppelt gekrümmte Kristall zumindest ein doppelt gekrümmtes Kristall umfasst, das eine Johannson-Geometrie oder eine Teilannäherung an eine Johannson-Geometrie aufweist.

23. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 20, bei dem das zumindest eine doppelt gekrümmte Kristall zumindest eine doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmte Kristalloptik aufweist.

24. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik zumindest eine doppelt gekrümmte Mehrschichtoptik umfasst.

25. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 24, bei dem die zumindest eine doppelt gekrümmte Mehrschichtoptik zumindest eine doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmte Optik um-

fasst.

26. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik zumindest eine doppelt gekrümmte abgestufte Diffraktionsoptik umfasst.

27. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die zumindest eine Sammeloptik (**140/240**) relativ zu der Probe fixiert ist und relativ zu dem zumindest einem Röntgendetektor fixiert ist.

28. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem der zumindest eine Röntgendetektor zumindest einen Gasproportionalzähler umfasst.

29. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem der zumindest eine Röntgendetektor zumindest einen Szintillationszähler umfasst.

30. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem der zumindest eine Röntgendetektor zumindest einen Festkörperzähler umfasst.

31. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 30, bei dem der zumindest eine Festkörperzähler zumindest einen PIN-Diodenfestkörperzähler umfasst.

32. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem der zumindest eine Röntgendetektor einen energieunempfindlichen Detektor umfasst.

33. XRF-Spektroskopiesystem nach Anspruch 1, bei dem die mindert eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik derart positioniert ist, dass ein Eingangsbrennpunkt davon an dem Brennpunkt auf der Probe einem Ausgangsbrennpunkt der zumindest einen Anregungsoptik entspricht.

34. Wellenlängendispergierendes Röntgenfluoreszenz-(XRF-) Spektroskopieverfahren mit:
Bereitstellen zumindest einer Röntgenstrahlungsquelle (**110/210**), Bereitstellen zumindest eines Röntgendetektors (**150/250**) und Anordnen zumindest einer monochromatischen Sammeloptik (**140/150**), die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik umfasst, zwischen einer Probe (**130/230**) und zumindest einem Röntgendetektor zum Sammeln von Röntgenfluoreszenz von einem Brennpunkt auf der Probe und zum Lenken der Fluoreszenzröntgenstrahlen einer charakteristischen Energie eines vorbestimmten Analyten in Richtung des zumindest einen Röntgendetektors, gekennzeichnet durch:
Bereitstellen zumindest einer Anregungsoptik (**120/220**), angeordnet zwischen der zumindest einen Röntgenquelle und der Probe, zum Sammeln von Röntgenstrahlung von der zumindest einen Quelle und zum Fokussieren der Röntgenstrahlung zu dem Brennpunkt auf der Probe, um den Analyten in der

Probe zum Fluoreszieren anzuregen.

35. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem die zumindest eine Röntgenstrahlungsquelle (**110**) zumindest eine Elektronenbeschussröntgenquelle umfasst.

36. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem die zumindest eine Anregungsoptik zumindest eine fokussierende polychromatische Optik (**220**) umfasst.

37. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 36, bei dem die zumindest eine fokussierende polychromatische Optik zumindest eine Polykapillaroptik umfasst.

38. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem die zumindest eine Anregungsoptik zumindest eine fokussierende monochromatische Optik (**120**) umfasst.

39. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 38, bei dem die zumindest eine fokussierende monochromatische Optik zumindest ein doppelt gekrümmtes Kristall umfasst.

40. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 38, bei dem die zumindest eine fokussierende monochromatische Optik zumindest eine doppelt gekrümmte Mehrschichtoptik umfasst.

41. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem der Brennpunkt eine Brennpunktgröße von weniger als 500 µm aufweist.

42. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem die Probe einen Festkörper umfasst.

43. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem die Probe ein Fluid umfasst.

44. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 43, bei dem das Fluid ein Produkt auf Erdölbasis umfasst.

45. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 44, bei dem das Produkt auf Erdölbasis Benzin oder Diesel umfasst.

46. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 45, bei dem der zumindest eine Analyt Schwefel umfasst.

47. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik zumindest ein doppelt gekrümmtes Kristall umfasst.

48. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch

47, bei dem das zumindest eine doppelt gekrümmte Kristall zumindest ein doppelt gekrümmtes Kristall mit Johann-Geometrie umfasst.

49. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 47, bei dem das zumindest eine doppelt gekrümmte Kristall zumindest ein doppelt gekrümmtes Kristall umfasst, das eine Johannson-Geometrie oder eine Teilannäherung an eine Johannson-Geometrie aufweist.

50. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 47, bei dem das zumindest eine doppelt gekrümmte Kristall zumindest eine doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmte Kristalloptik umfasst.

51. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik zumindest eine doppelt gekrümmte Mehrschichtoptik umfasst.

52. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 51, bei dem die zumindest eine doppelt gekrümmte Mehrschichtoptik zumindest eine doppelt in Form einer logarithmischen Spirale gekrümmte Optik umfasst.

53. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik zumindest eine doppelt gekrümmte abgestufte Diffraktionsoptik umfasst.

54. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem der zumindest eine Röntgendetektor zumindest einen Gasproportionalzähler umfasst.

55. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem der zumindest eine Röntgendetektor zumindest einen Szintillationszähler umfasst.

56. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem der zumindest eine Röntgendetektor einen energieunempfindlichen Detektor umfasst.

57. XRF-Spektroskopieverfahren nach Anspruch 34, bei dem die zumindest eine doppelt gekrümmte Diffraktionsoptik derart angeordnet ist, dass ein Eingangsbrennpunkt davon an einem Brennpunkt der Probe einem Ausgangsbrennpunkt auf der zumindest einen Anregungsoptik entspricht.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

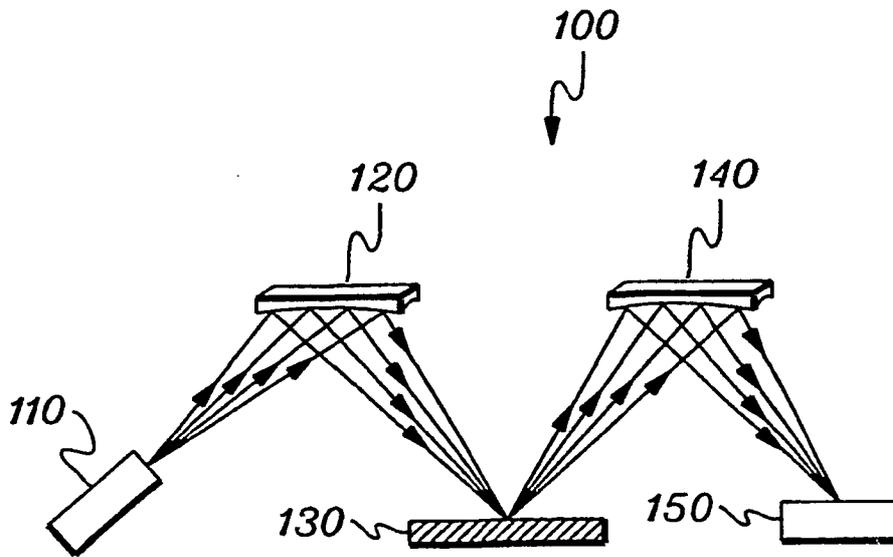


fig. 1

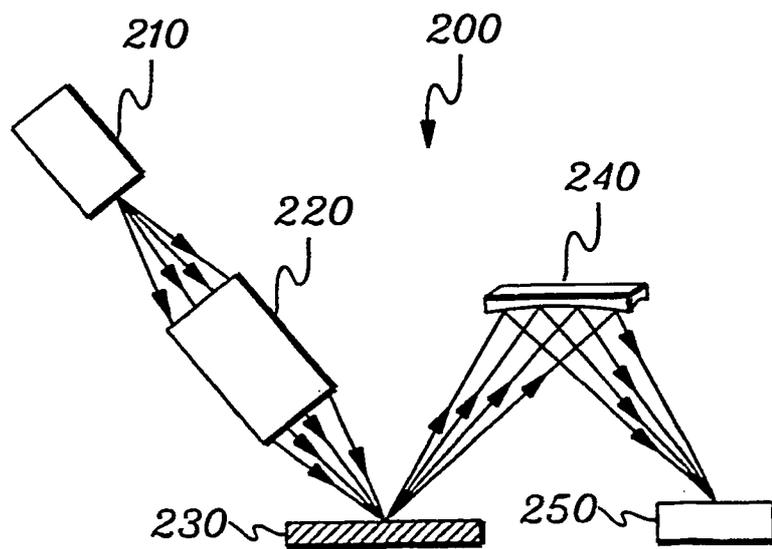


fig. 4

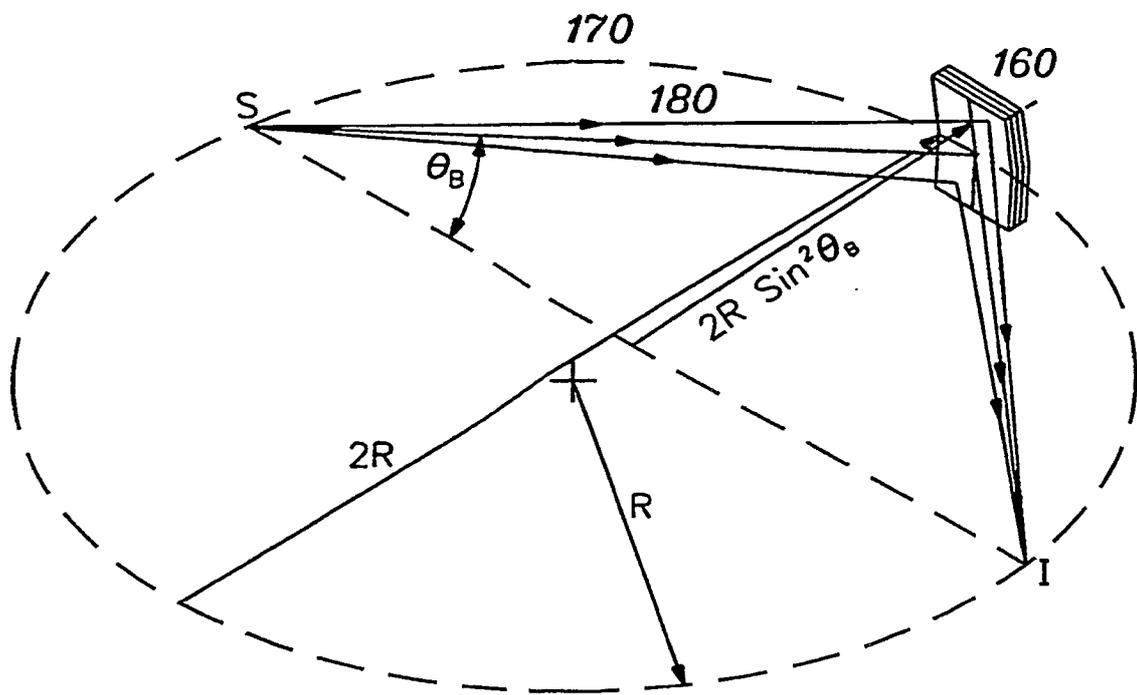


fig. 2

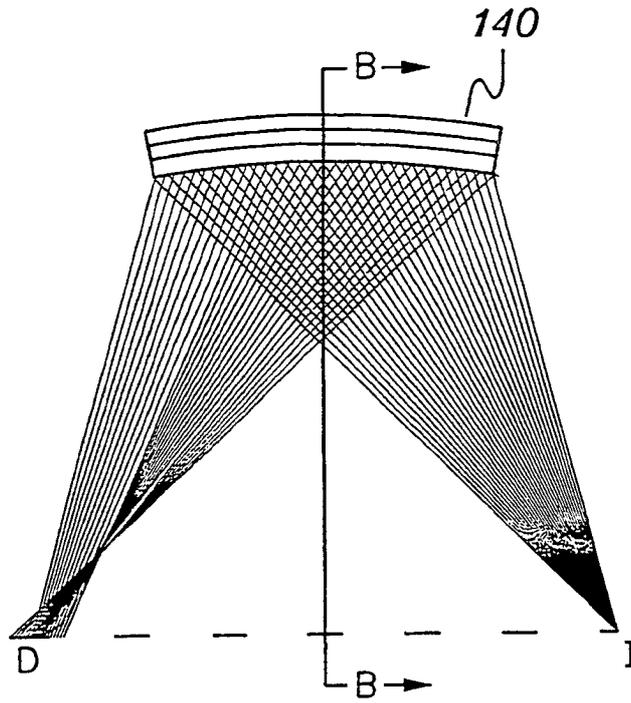
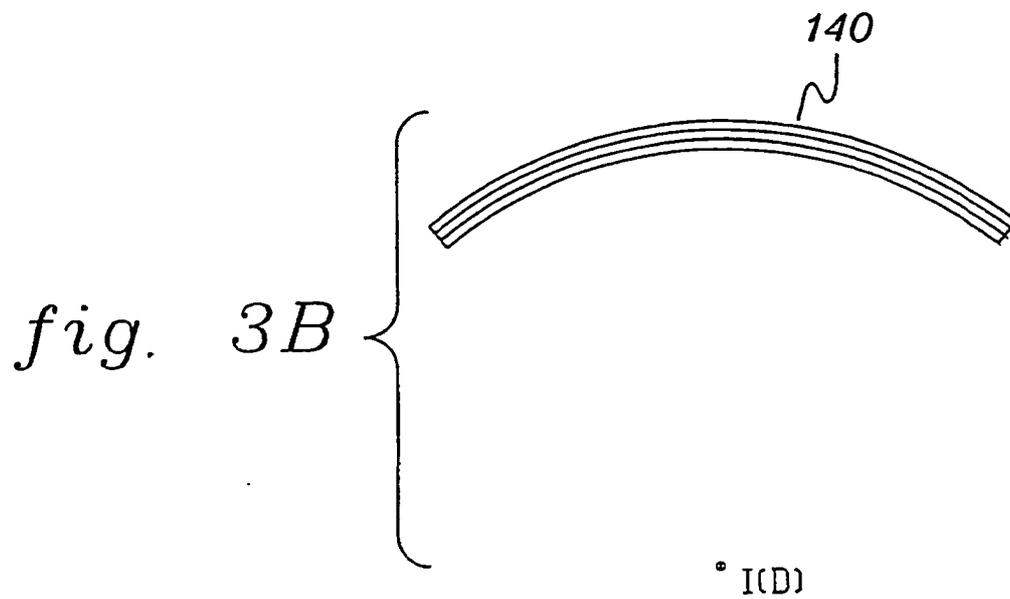


fig. 3A



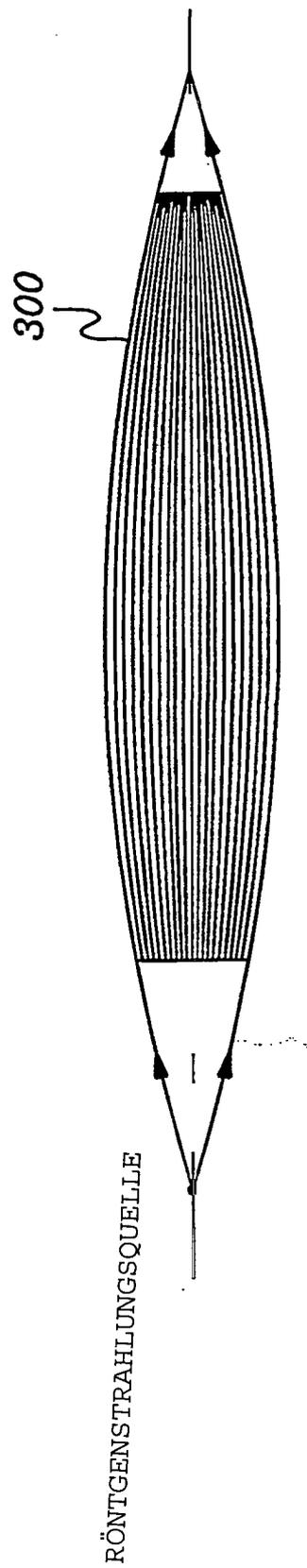


fig. 5