(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) EP 1 647 840 A2

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
19.04.2006 Patentblatt 2006/16

(51) Int Cl.:
G01T 1/00 (2006.01) *G01T 3/00* (2006.01)
G01T 7/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **05020864.4**

(22) Anmeldetag: **24.09.2005**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA HR MK YU

(30) Priorität: **16.10.2004 DE 102004050543**

(71) Anmelder: **Bruker AXS GmbH**
76187 Karlsruhe (DE)

(72) Erfinder:
- **Gerndt, Ekkehard, Dr.**
76227 Karlsruhe (DE)
- **Grybos, Pawel, Dr.**
30-199 Rzaska (PL)
- **Brügemann, Lutz, Dr.**
76448 Durmersheim (DE)
- **Eisenhower, Rachel, Dr.**
76227 Karlsruhe (DE)
- **Kasten, Arne, Prof. Dr.**
76139 Karlsruhe (DE)

(74) Vertreter: **Kohler Schmid Möbus**
Patentanwälte
Ruppmannstrasse 27
70565 Stuttgart (DE)

(54) **Röntgen- oder neutronenoptisches Analysegerät mit variabel ausgeleuchtetem Streifendetektor**

(57) Ein röntgen- oder neutronenoptisches Analysegerät mit Mitteln zum Richten von Strahlung aus einer Quelle (1) auf eine Probe (2) mit einem Detektor (7) mit n im wesentlichen identischen, in einer ersten Richtung x parallel nebeneinander angeordneten, in einer zweiten Richtung y streifenförmigen Detektorelementen (D_i); wobei i = 1, ...n, zum eindimensional ortsabhängigen Detektieren von der Probe (2) reflektierter, gestreuter oder gebeugter auf den Detektor (7) einfallender Strahlung und mit einer Nachweiselektronik zum Verarbeiten der Detektorsignale der n Detektorelemente (D_i), wobei die Nachweiselektronik maximal eine bestimmte Strahlungsintensität pro Detektorelement (D_i) zuverlässig verarbeiten kann ohne zu übersteuern, ist dadurch gekennzeichnet, dass vor dem Detektor (7) ein optisches Element angeordnet ist, das entsprechend einer vorgebbaren, nicht-konstanten Durchlassfunktion f(x) jeweils einen Teil der auf die Flächen der n Detektorelemente (D_i) einfallenden Strahlung abdeckt oder abschwächt und/oder dass das optische Element eine entlang der Streifenrichtung y verschiebbare Blende (6) umfasst. Das erfindungsgemäße Analysegerät erlaubt eine künstliche Vergrößerung des dynamischen Bereichs des Detektors (7).

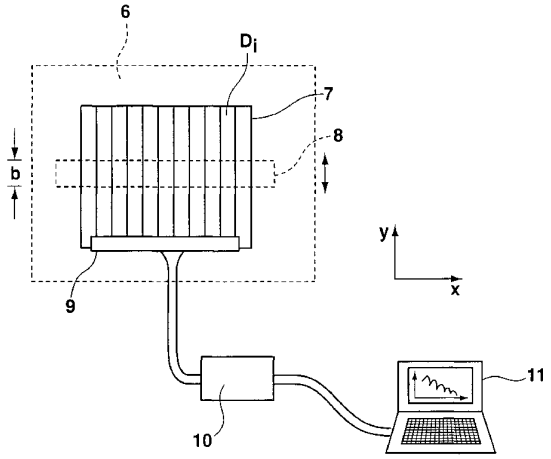

Fig. 2

EP 1 647 840 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Röntgen- oder neutronenoptisches Analysegerät mit Mitteln zum Richten von Strahlung aus einer Quelle auf eine Probe mit einem Detektor mit n im wesentlichen identischen, in einer ersten Richtung x parallel nebeneinander angeordneten, in einer zweiten Richtung y streifenförmigen Detektorelementen D_i; wobei i = 1, ...n, zum eindimensional ortsabhängigen Detektieren von der Probe reflektierter, gestreuter oder gebeugter auf den Detektor einfallender Strahlung und mit einer Nachweiselektronik zum Verarbeiten der Detektorsignale der n Detektorelemente D_i wobei die Nachweiselektronik maximal eine bestimmte Strahlungsintensität pro Detektorelement D_i zuverlässig verarbeiten kann ohne zu übersteuern.

[0002] Ein derartiges Röntgenanalysegerät ist bereits aus US 2002/0053641 bekannt.

[0003] Streuung, Beugung und Reflektion von Röntgen- und Neutronenstrahlung sind wichtige Methoden der Struktur-Aufklärung. Durch die Beugung von Röntgen- oder Neutronenstrahlung kann beispielsweise auf die Symmetrieeigenschaften des streuenden (in der Regel kristallinen) Materials geschlossen werden.

[0004] Zur Detektion des Winkels, unter dem die Strahlung die Probe verlässt bezüglich des einfallenden Strahlenbündels, ist der aus US 2002/0053641 bekannte Detektor mit einem Array aus nebeneinander liegenden, streifenförmigen Detektorelementen ausgestattet. Dies erlaubt eine eindimensional ortsaufgelöste Aufnahme von gebeugter oder gestreuter Röntgenstrahlung. Der Ort eines Detektorelements ist dabei ein Maß für die Winkelablenkung, mit der die Strahlung die Probe verlässt. Durch die Aufnahme einer ortsaufgelöste Intensitätsverteilung (Diffraktogramm) mit einer derartigen Vorrichtung können daher Informationen über die Gitterstruktur der Probe erhalten werden. Speziell bei Messungen, die unter streifendem Einfall von Röntgenstrahlung durchgeführt werden, beispielsweise bei XRR-Messungen (x-ray reflection), nimmt die Intensität innerhalb des aufgenommenen Röntgendiffraktogramms exponentiell mit dem Ort ab, so dass sich der Intensitätsbereich des gesamten Diffraktogramms über mehrere Zehnerpotenzen erstreckt. Da die verschiedenen Detektorelemente dementsprechend unterschiedlich stark beleuchtet werden, werden für die Aufnahme von Röntgendiffraktogrammen Detektoren mit einem sehr hohen dynamischen Bereich (mehrere Zehnerpotenzen) benötigt. Bei sehr hohen Zählraten erreichen handelsübliche Detektoren jedoch ihre Sättigung, so dass aus diesen Bereichen keine nützlichen Informationen gezogen werden können. Der effektiv nutzbare Bereich solcher bekannten Detektoren ist daher begrenzt.

[0005] Um Strahlung in definierten Bereichen der Detektorelemente auszublenden, ist es im Rahmen von Röntgentransmissionsmessungen aus der Medizin bekannt, eine Blende vor einem eindimensionalen Detektor anzuordnen. Es wird hier essentiell nur ein Schattenbild gemessen. Eine derartige Anordnung wird beispielsweise beschrieben von A. Cabal et al. "Feasibility of silicon strip detectors and low noise multichannel readout system for medical digital radiography." 6th Mexican Symposium on Medical Physics, Mexico, Mexico City, March 2002, American Institute of Physics Conference Proceedings, no 630, 2002, pp. 202-207, USA

[0006] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein röntgen- oder neutronenoptisches Analysegerät zur Detektion von reflektierter, gestreuter oder gebeugter Strahlung vorzuschlagen, mit dem eine Übersteuerung der Detektorelemente weitgehend vermieden oder zumindest verringert wird.

[0007] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass vor dem Detektor ein optisches Element angeordnet ist, das entsprechend einer vorgebbaren, nicht konstanten Durchlassfunktion f(x) jeweils einen Teil der auf die Flächen der n Detektorelemente (Di) einfallenden Strahlung abdeckt oder abschwächt und/oder dass das optische Element eine entlang der Streifenrichtung y verschiebbare Blende umfasst.

[0008] Durch ein optisches Element mit einer nichtkonstanten Durchlassfunktion f(x) kann die Lichtdurchlässigkeit im Bereich bestimmter Detektorelemente gegenüber anderen Detektorelementen reduziert werden, so dass eine Sättigung einzelner Detektorelemente vermieden werden kann. In ähnlicher Weise kann eine in y-Richtung verschiebbare Blende Strahlung aus bestimmten Bereichen innerhalb eines Detektorelements ausblenden. Die detektierte Strahlung resultiert dann lediglich aus einem Bereich Δy der jeweiligen Detektorelemente, so dass auch auf diese Weise eine Übersteuerung der Detektorelemente vermieden werden kann.

[0009] Das erfindungsgemäße Analysegerät findet beispielsweise Anwendung beim mindestens eindimensional in x-Richtung ortsabhängigen Detektieren von auf einen Detektor eines Analysegeräts einfallender Strahlung, deren Intensität als Funktion von x einen Verlauf hat, dessen Einhüllende, d.h. die Verbindung der Intensitätsmaxima, aus einer Vormessung oder andere Weise grob bekannt ist. Für eine Messung wird ein optisches Element mit einer Durchlassfunktion f(x) und gegebenenfalls ein Graufilter mit einer Abschwächung k ausgewählt, derart, dass für jedes Detektorelement die Strahlung soweit abgeblendet/abgeschwächt wird, dass die Einhüllende des Intensitätsverlaufs I(x) die Nachweiselektronik nicht übersteuert und dass die Durchlassfunktion f(x) integriert jeweils über die n Detektorelemente D_i und gegebenenfalls die Abschwächung k bei der Bestimmung eines wahren Intensitätsverlaufs der Strahlung I(x) berücksichtigt wird.

[0010] Um den wahren Intensitätsverlaufs der Strahlung I(x) exakt zu bestimmen, erweist es sich als günstig, Abweichungen von der Linearität der Kennlinien der Detektorelemente zu berücksichtigen.

[0011] Besonders vorteilhaft ist es, wenn die, den n Detektorelemente D_i zugeordneten Intensitäten nach individuell unterschiedlichen Kennlinien berechnet wer-

den.

[0012] Bei dem erfindungsgemäßen Analysegerät weist die von der Probe auf den Detektor einfallende Strahlung eine Intensitätsverteilung I(x) auf, die über mindestens eine Größenordnung, vorzugsweise mehrere Größenordnungen, variiert, Insbesondere handelt es sich um ein Diffraktogramm der Probe. Die Vorteile der Erfindung kommen hier besonders gut zur Geltung, da der dynamische Bereich konventioneller Detektoren für Diffraktogramme, bei denen die Intensitätsverteilung I(x) über mehrere Größenordnungen variiert, oft nicht ausreicht.

[0013] Bei einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Analysegeräts nimmt die Durchlassfunktion f(x) in x-Richtung bis zu einem Maximalwert f_{max} monoton zu, wobei insbesondere $f_{max} = 1$ gilt. Auf diese Weise wird an dafür geeigneten Stellen des Detektors die volle Strahlungsintensität detektiert.

[0014] Die Durchlassfunktion f(x) ist vorzugsweise so gewählt ist, dass sie im Wesentlichen der Inversen der Einhüllenden einer zu erwartenden Intensitätsverteilung, insbesondere eines Diffraktogramms I(x), folgt. Die Strahlungsdurchlässigkeit wird somit für Bereiche, in denen wenig Strahlungsintensität erwartet wird hoch und für Bereiche, in denen hohe Strahlungsintensitäten erwartet werden, entsprechend niedrig gewählt werden, so dass eine möglichst hohe Ausbeute an detektierter Strahlung erreicht werden kann, ohne dass der Detektor in die Sättigung geht.

[0015] Es ist auch eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Analysegeräts denkbar, bei der zusätzlich ein Graufilter vorgesehen ist, welches die Gesamtintensität der auf den Detektor fallenden Strahlung integral um einen Faktor k abschwächt.

[0016] Eine weitere Ausführungsform sieht vor, dass das optische Element in Teilen für die Strahlung transparent und in anderen Teilen undurchlässig ist. Ein solches optisches Element kann beispielsweise in Form einer Blende, insbesondere eines Spalts, vorliegen. Hierdurch können einzelne Detektorelement oder Teile einzelner Detektorelemente vollständig ausgeblendet werden.

[0017] Eine bevorzugte Ausführungsform des Analysegeräts umfasst ein Keilfilter in x-Richtung als optisches Element. Somit kann auf einfache Weise ein monotoner Anstieg der Strahlungsdurchlässigkeit des optischen Elements realisiert werden.

[0018] Bei einer besonders vorteilhaften Ausführungsform des Analysegeräts umfasst das optische Element einen Spalt in x-Richtung, der in y-Richtung verschiebbar ist. Das optische Element kann somit nach einer Messung mindestens einmal in y-Richtung verschoben und die Messung wiederholt und akkumuliert werden. Auf diese Weise kann auch der gesamte Detektorbereich abgescannt und die Gesamtintensität ermittelt werden, ohne den dynamischen Bereich des Detektors zu verlassen.

[0019] Nach einer Messung wird das optische Element beispielsweise mindestens (j-1)-mal (j > 1) in y-Richtung verschoben, die Messung (j-1)-mal wiederholt. Somit wird ein zweidimensionaler Intensitätsverlauf der Strahlung I(x,y) mit n Messwerten in x-Richtung und j Messwerten in y-Richtung gewonnen.

[0020] Eine vorteilhafte Anwendung dieses Analysegeräts besteht des Weiteren im eindimensional ortsabhängigen Detektieren in y-Richtung von auf einen Detektor einfallender Strahlung mittels des erfindungsgemäßen Analysegeräts, deren Intensität als Funktion von x und y einen Verlauf hat, dessen Einhüllende, d.h. die Verbindung der Intensitätsmaxima, aus einer Vormessung oder andere Weise grob bekannt ist. Dabei wird für eine Messung eine Blende mit einer Spaltbreite und gegebenenfalls ein Graufilter mit einer Abschwächung k ausgewählt, derart, dass für jedes Detektorelement die Strahlung soweit abgeblendet/abgeschwächt wird, dass die Einhüllende des Intensitätsverlaufs I(x,y) die Nachweiselektronik nicht übersteuert und dass bei oder nach der Messung die Intensitäten der n Detektorelemente D_i akkumuliert werden, die Blende mindestens einmal in y-Richtung verschoben und die Messung und Akkumulation wiederholt wird.

[0021] Eine besonders bevorzugte Ausführungsform umfasst einen Spalt, der eine Breite aufweist, die klein ist gegen den Abstand benachbarter Detektorelemente (D_i), insbesondere kleiner als der halbe Abstand. Es wird hierdurch ermöglicht, lediglich einen Teil der auf ein Detektorelement auftreffenden Strahlung zu detektieren und somit die Ortsauflösung zu erhöhen.

[0022] Eine spezielle Ausführungsform der Erfindung sieht vor, dass das optische Element zwei separat verschiebbare Schneiden aufweist. Je nach Anwendung kann auf diese Weise ein Spalt mit variierendem Abstand realisiert werden

[0023] Bei einer weiten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Analysegeräts weist das optische Element im Bereich zumindest einiger der n Detektorelemente (D_i) unterschiedlich viele und/oder große über die Detektorfläche verteilte transparente Bereiche auf. Für spezielle Anwendungen interessante Bereiche können somit gezielt ausgewählt und gleichzeitig nicht interessierende Bereiche ausgeblendet werden.

[0024] Besonders vorteilhaft ist es, wenn das Analysegerät mehrere gegeneinander austauschbare und/oder miteinander kombinierbare optische Elemente aufweist. Das Analysegerät kann dann für verschiedene Anwendungen verwendet werden.

[0025] Für besonders empfindliche Messungen erweist es sich als vorteilhaft, wenn der Detektor und die Nachweiselektronik den Einfall einzelner Strahlungsquanten auf die Detektorelemente (D_i) registriert und zählt. Dies kann beispielsweise mittels eines Einzelphotonendetektors realisiert werden.

[0026] Der Vorteil der Erfindung kommt besonders gut zur Geltung, wenn der Winkel zwischen der auf die Probe einfallenden und der von der Probe ausgehenden Strahlung zwischen 165° und 180° liegt, da bei Messungen

mit derartigen Winkelverhältnissen, die auch als "grazing incidence" - Messungen bezeichnet werden, in kleinen Winkelbereichen sehr hohe Intensitätsschwankungen auftreten.

[0027] Insbesondere für GISAXS (grazing incidence small angle x-ray scatting) ist es vorteilhaft, wenn der Detektor um eine Achse senkrecht zur Detektoroberfläche drehbar ist. Die Detektorstrecke kann dadurch eine Kreisfläche senkrecht zur Streurichtung überfahren, die einen Durchmesser von wenigstens der Länge der Detektorstrecke aufweist. Bei Wahl des Drehpunkts an einem Ende der Detektorstrecke ist sogar ein Durchmesser der Kreisfläche von einer doppelten Detektorstrekkenlänge möglich. Der eindimensionale, drehbar gelagerte Detektor wird somit zu einem virtuellen zweidimensionalen Detektor. Bei Verwendung einer Blende, deren Öffnung kleiner als die Granularität des Detektors ist kann darüber hinaus die Ortsauflösung in beliebiger Richtung verbessert werden.

[0028] Das erfindungsgemäße Analysegerät kann darüber hinaus auch als Punktdetektor (0-D Detektor) Verwendung finden, indem die von der Nachweiselektronik detektierten Strahlungsintensitäten der einzelnen Detektorelemente aufaddiert werden. Bekannte schnelle 0-D Detektoren (bis 10^8 cps (counts per second)) weisen eine relativ kleine sensitive Fläche (ca. 3 mm x 5 mm) auf. Mit dem erfindungsgemäßen Analysegerät kann dagegen ein 0-D Detektor realisiert werden, der eine hohe Zählrate von bis zu 2 x 10^8 cps und gleichzeitig eine sensitive Fläche von bis zu 15mm x 15 mm aufweist, was bei Siliziumdriftkammern beispielsweise nur mit hohem technischen und finanziellen Aufwand realisierbar ist.

[0029] Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die weiter aufgeführten Merkmale je für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

Es zeigen:

[0030]

Fig. 1a eine schematische Darstellung einer Seitenansicht eines erfindungsgemäßen Analysegeräts;

Fig. 1b eine schematische Darstellung einer Draufsicht eines erfindungsgemäßen Analysegeräts aus Fig. 1a;

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines experimentellen Aufbaus des Detektors und der Auswerteelektronik, und

Fig. 3 eine beispielhafte Darstellung eines vor den Detektorelementen angeordneten Spalts.

[0031] **Fig. 1a** und **Fig. 1b** zeigen eine Seitenansicht beziehungsweise eine Draufsicht eines erfindungsgemäßen Analysegeräts. Eine Quelle **1** emittiert Strahlung, die auf eine Probe **2** gerichtet ist. Die Quelle **1** kann dabei ein Teil des Analysegeräts sein, z.B. eine konventionelle Röntgenquelle, es kann sich dabei aber auch um eine extern installierte Quelle, wie z.B. ein Synchrotron handeln. Vor der Röntgenquelle 1 befindet sich eine Primäroptik **3.** Diese kann Kristalle, Spiegel oder andere Komponenten enthalten, welche die Röntgenstrahlung monochromatisieren. Monochromatische Strahlung wird beispielsweise bei Messverfahren wie XRR (x-ray reflection), GID(grazing incidence defraction), GISAXS (grazing incidence small angle x-ray scatterin) häufig, aber nicht unbedingt immer, verwendet, und kann auch verschiedene enge Bandbreiten haben. Des Weiteren kann die Primäroptik 3 Monochromatorspiegel/-kristalle und einem Schlitzsystem umfassen. Nach Durchlaufen der Primäroptik 3 trifft die Strahlung auf die Probe 2 und wird dort reflektiert, gestreut oder gebeugt. Die von der Probe 2 ausgehende Strahlung durchläuft eine optische Vorrichtung **4** und trifft auf ein oder mehrere optische Elemente, bei der in Fig. 1 gezeigten Ausführungsform auf ein Filter **5** und einen in y-Richtung bewegliche Spalt **6,** bevor die Strahlung in einem Detektor **7,** welcher als Streifendetektor ausgebildet ist, detektiert wird.

[0032] Für Messungen in der Bragg-Brentano Geometrie muss die in Fig. 1 dargestellte Anordnung derart abgeändert werden, dass sich der Fokus F der Quelle 1 und die Blende 6 vor dem Detektor 7 auf einem Kreis, dem Fokussierkreis, befinden. Für Anwendungen in Parallelgeomtrie, die für viele Messmethoden verwendet wird, ist dies jedoch nicht erwünscht. Um eine Übersteuerung des Detektors 7 aufgrund zu hoher Strahlungsintensität zu vermeiden, wird in ausgewählten Bereichen, vorzugsweise in Bereichen, in denen eine hohe Strahlungsintensität erwartet wird, die Strahlung durch die optischen Elemente ausgeblendet oder abgeschwächt. Mit der Kenntnis des Abschwächungsfaktors der verwendeten optischen Elemente kann so auf die wirkliche Strahlungsintensität geschlossen werden, ohne denn Detektor 7 zu übersteuern.

[0033] Eine Ausblendung der Strahlung in bestimmten Breichen kann durch eine Anordnung realisiert werden wie sie in **Fig. 2** dargestellt ist. Fig. 2 zeigt einen Detektor 7 mit n im Wesentlichen identischen, in einer ersten Richtung x parallel nebeneinander angeordneten, in einer zweiten Richtung y streifenförmigen Detektorelementen $\mathbf{D_i}$. Vor dem Detektor ist ein optisches Element (gestrichelt) in Form einer entlang der Streifenrichtung y verschiebbaren Blende 6 mit einer Spaltöffnung **8** und Spaltbreite **b** angeordnet. Durch die verschiebbare Blende 6 kann ein Bereich Δy der

[0034] Breite b der Detektorelemente D_i ausgewählt werden, in dem die einfallende Strahlung detektiert wird.

Die auf die Detektorelemente D_i treffende Strahlung erzeugt Elektronen-Loch-Paare. Die Elektronen werden in einer Ausleseeinrichtung **9** gesammelt und einer Auswerteeinrichtung **10** zugeführt. Nach Auswertung kann die detektierte Strahlungsintensität in Form eines Diffraktogramms auf einem Computerdisplay **11** angezeigt werden. Die außerhalb der Spaltöffnung 8 auftreffende Strahlung wird dabei ausgeblendet. Durch geeignetes Verschieben der Blende 6 kann sukzessive die gesamte Fläche eines jeden Detektorelements D_i "abgescannt" und durch Summation der für ein Detektorelement D_i gemessenen Werte die Gesamtintensität der auf das Detektorelement D_i auftreffenden Strahlung ermittelt werden. Ein Übersteuern des Detektors aufgrund von zu hoher Strahlungsintensität wird hierdurch vermieden. Durch das Aufspalten der Messung in viele Messschritte kann die effektiv erreichbare Zählrate bis zu mehreren Größenordnungen erweitert werden.

[0035] Da die in den beschriebenen Einzelmessungen ermittelten Werte, je nach Stellung der Blende, einem bestimmten Bereich in y-Richtung zugeordnet sind und somit auch in y-Richtung ortsaufgelöste Informationen enthalten, kann durch geeignetes Verschieben der Blende 6 ein zweidimensionales, zusätzlich in y-Richtung aufgelöstes, Diffraktogramm erstellt werden. Das erfindungsgemäße Analysegerät ermöglicht auf diese Weise die Aufnahme von 2-D Diffraktogrammen mittels eines 1-D Detektors 7.

[0036] Dies ist besonders vorteilhaft bei der Überprüfung, ob eine Pulverprobe unerwartet Texturen aufweist. Hierbei wird der Detektor als OED (1-D ortsempfindlicher Detektor, *engl.* PSD) verwendet, während der Überprüfung aber ein 2-D Bild aufgenommen. Mit diesem wird die Struktur der Debyeringe gemessen und entsprechende Rückschlüsse gezogen, die unter Umständen die Messparameter für die folgenden Untersuchungen der Probe beeinflussen. Der Vorteil der Erfindung liegt darin, dass durch einfache Mittel eine nur gelegentlich durchzuführende 2-D Messung möglich ist. Ein aufwendigerer Detektor (Sensor) für die zweite Dimension und die dazu benötigte Elektronik werden eingespart.

[0037] Ein weiteres Anwendungsgebiet des erfindungsgemäßen Analysegeräts sind Topographiemessungen mit Röntgenstrahlen. Diese werden genutzt um Kristalldefekte, z.B. in der Halbleiterindustrie, zu finden. Auch hierfür ist eine 2-D-Auslesung erforderlich, die mit der Erfindung mit einem geringen technischen Aufwand geleistet werden kann. Für das gelegentliche Messen ist die Erfindung gut geeignet, zumal der Messaufbau mit einem XRR-, GID-, GISAXS- Aufbau gut kombiniert werden kann, was im Interesse des Nutzers sein kann.

[0038] Wählt man eine Blende mit einer Spaltbreite b, die kleiner ist als die Granularität des Detektors 7, so kann die Ortsauflösung des mit dieser Anordnung aufgenommenen Diagramms gegenüber der Auflösung des Detektors 7 alleine verbessert werden.

[0039] **Fig. 3** zeigt einen Ausschnitt eines Streifendetektors 7, vor dem eine Blende 6 und ein Filter 5 angeordnet sind. Die Blende 6 begrenzt den Einfallsbereich der von der Probe 2 ausgehenden Strahlung in y-Richtung, wie bereits im Zusammenhang mit Fig. 2 beschrieben. Die im Bereich der Spaltöffnung 8 der Blende 6 freiliegenden Bereiche der Detektorelemente D_i sind zusätzlich mit einem Filter 5 bedeckt, wobei das Filter 5 eine nicht-konstanten Durchlassfunktion f(x) in x-Richtung aufweist, und somit die einfallende Strahlung in zusätzlichen Bereichen innerhalb der Spaltöffnung 8 der Blende 6 ausgeblendet oder abgeschwächt wird. Bei dem Filter 5 kann es sich beispielsweise um ein Keilfilter handeln, bei dem sich die Durchlassfunktion kontinuierlich ändert. Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Durchlassfunktion f(x) so gewählt ist, dass sie im Wesentlichen der Inversen der Einhüllenden einer zu erwartenden Intensitätsverteilung I(x) folgt. Es sind jedoch auch andere Filteranordnungen denkbar.

[0040] Bei der in Fig. 3 gezeigten Ausführungsform des Filters 5 ist die Durchlassfunktion weder in x- noch in y- Richtung konstant ($f(x) \neq const.$, $f(y) \neq const$). Die nicht konstante Durchlassfunktion in y-Richtung kann, ähnlich wie bei der Blende 6, bewirken, dass jeweils nur ein Teil der einzelnen Detektorelemente D_i der einfallenden Strahlung ausgesetzt ist oder aber die Strahlung in bestimmten Bereichen abgeschwächt wird.

[0041] Die Haupteinsatzbereiche des erfindungsgemäßen Analysegeräts, bei denen die Vorteile der Erfindung besonders gut zur Geltung kommen, sind insbesondere, aber nicht ausschließlich, Röntgenreflektometriemessungen (XRR - X-Ray Reflection), Röntgendiffraktometriemessung unter streifendem Einfall (GID - Grazing Incidence Diffraction) und Kleinwinkelröntgenstreuung unter streifendem Einfall (GISAXS - Grazing Incidence Small Angle X-Ray Scattering).

[0042] Die drei genannten Methoden werden häufig in Kombination miteinander zur Untersuchung von Oberflächenstruktur auf Nanoskala von Materialproben, typischerweise bei so genannten "dünne Filmen" angewendet. Hierbei versteht man unter "Oberfläche" die obersten Materialschichten durchaus bis zu einer Tiefe von 2μm oder mehr. Bei der XRR werden Eigenschaften rechtwinklig zur Oberfläche untersucht, wie Schichtdicke, Materialzusammensetzung und Rauhigkeit. Bei GID wird die laterale Struktur, bei GISAXS mesoskopische Materialeigenschaften parallel und rechtwinklig zur makroskopischen Oberfläche gemessen. Die Hauptanwendung dieser Methoden sind bei der Erforschung neuer Materialien in der Nanotechnologie und der Halbleiterindustrie.

[0043] Bei den genannten Messmethoden ist der Röntgenstrahleinfallwinkel α_i, d.h. der Winkel zwischen einfallenden Röntgenstrahlen und Gitterebene der Probe 2, nahe am und unter dem kritischen Winkel α_c, dem Winkel der totalen externen Reflektion von Röntgenstrahlen. Die Größe von α_c hängt von Röntgenwellenlänge und von den Materialeigenschaften ab. Ein typischer Wert von α_c liegt zwischen 0,2° und 0,6° für übliche Materialien bei Kupfer K_α -Röntgenstrahlung. Bei den

Messungen ist es erforderlich, dass der Einfallswinkel sehr genau eingehalten wird ($\Delta\alpha_i/\alpha_c$ <0,05). Ferner muss die Intensität der von der Probe 2 ausgehenden Strahlung als Funktion des Ausfallswinkels in der Streuebene (XRR, GISAXS) und als Funktion des axialen Ausfallswinkels (GID, GISAXS) sehr genau bestimmt werden. Bei dieser Messung mit sehr hoher Winkelgranularität (z.B. 0.005°) müssen außerdem Intensitäten von sehr hoher Schwankungsbreite (dynamischer Bereich bis 10^8 bei abgeschmolzenen Röntgenröhren) und von sehr hohem Werten (bis ~ 10^8 cps bei abgeschmolzenen Röntgenröhren) gemessen werden. Das erfindungsgemäße Analysegerät erweitert künstlich den nicht ausreichenden dynamischen Bereich der Messapparatur, verändert das Untergrundrauschen (niedrigste messbare Zählrate) nicht und macht dadurch direkte Messungen möglich (z.B. XRR).

[0044] Im Fall von GISAXS kann die erforderliche Winkelauflösung in axialer Winkelrichtung zwar durch den Stand der Technik geleistet werden (z.B. Streifendetektorstreifenabstand 50 μm mit digitaler Auslese), in der Streuebene wird aber eine deutlich höhere Winkelauflösung (um einen Faktor 2 bis 3 höher) benötigt. Dies wird durch das erfindungsgemäße Analysegerät ermöglicht. Zwar verfügen CCD Detektoren von sich aus über eine höhere Granularität als Streifendetektoren, aber sie haben auch ein wesentlich höheres Grundrauschen. Da CCD Detektoren integrieren, sind sie keine Detektoren, die einzelne Photonen nachweisen. Für GISAXS Messungen wird diese Detektoreigenschaft aber benötigt.

[0045] Einzelphotonennachweis ist auch bei einfacher Kteinwinketstreuungsmessung (SAXS) in Transmission, indem ein 2-D Bild durch das Verschieben eine Blende quer stehend zu aber entlang der Streifen gemessen wird, notwendig. Bei Transmissions-SAXS-Messungen sind Signalintensitäten typisch sehr schwach. Hier profitiert der erfindungsgemäße Aufbau von der Möglichkeit eines Einzelphotonennachweises. Darüber hinaus kann es auch bei dieser Methode vorteilhaft-sein, 2-D Aufnahmen anzufertigen.

[0046] Das erfindungsgemäße Analysegerät erlaubt das Aufnehmen sowohl von 1-D als auch von 2-D Diffraktogrammen mittels eines konventionellen 1-D Streifendetektors 7 und ermöglicht neben einem Einzelphotonennachweis eine künstliche Vergrößerung des dynamischen Bereichs des Detektors 7. Gleichzeitig bietet das erfindungsgemäße Analysegerät die Möglichkeit, die Ortsauflösung über die Granularität der Detektorelemente hinaus zu vergrößern.

Bezugszeichenliste

[0047]

b	Spaltbreite
D_i	Detektorelementen
1	Quelle
2	Probe
3	Primäroptik
4	optische Vorrichtung
5	Filter
6	Blende
7	Detektor
8	Spaltöffnung
9	Ausleseeinrichtung
10	Auswerteeinrichtung
11	Computerdisplay

Patentansprüche

1. Röntgen- oder neutronenoptisches Analysegerät mit Mitteln zum Richten von Strahlung aus einer Quelle (1) auf eine Probe (2) mit einem Detektor (7) mit n im wesentlichen identischen, in einer ersten Richtung x parallel nebeneinander angeordneten, in einer zweiten Richtung y streifenförmigen Detektorelementen (D_i); wobei i = 1, ...n, zum eindimensional ortsabhängigen Detektieren von der Probe (2) reflektierter, gestreuter oder gebeugter auf den Detektor (7) einfallender Strahlung und mit einer Nachweiselektronik zum Verarbeiten der Detektorsignale der n Detektorelemente (D_i), wobei die Nachweiselektronik maximal eine bestimmte Strahlungsintensität pro Detektorelement (D_i) zuverlässig verarbeiten kann ohne zu übersteuern,
dadurch gekennzeichnet, dass
vor dem Detektor (7) ein optisches Element angeordnet ist, das entsprechend einer vorgebbaren, nicht-konstanten Durchlassfunktion f(x) jeweils einen Teil der auf die Flächen der n Detektorelemente (D_i) einfallenden Strahlung abdeckt oder abschwächt und/oder dass das optische Element eine entlang der Streifenrichtung y verschiebbare Blende (6) umfasst.

2. Analysegerät nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die von der Probe (2) auf den Detektor (7) einfallende Strahlung eine Intensitätsverteilung I(x) aufweist, die über mindestens eine Größenordnung, vorzugsweise mehrere Größenordnungen, variiert, insbesondere dass es sich um ein Diffraktogramm der Probe (2) handelt.

3. Analysegerät nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Durchlassfunktion f(x) in x-Richtung bis zu einem Maximalwert f_{max} monoton zunimmt, wobei insbesondere f_{max} = 1 gilt.

4. Analysegerät nach einem der Ansprüche 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die, Durchlassfunktion f(x) so gewählt ist, dass sie im Wesentlichen der Inversen der Einhüllenden einer zu erwartenden Intänsitätsverteilung, insbesondere eines Diffraktogramms, I(x) folgt.

5. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zusätzlich ein Graufilter vorgesehen ist, das die Gesamtintensität der auf den Detektor (7) fallenden Strahlung integral um einen Faktor k abschwächt.

6. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das optische Element in Teilen für die Strahlung transparent und in anderen Teilen undurchlässig ist.

7. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das optische Element ein Keilfilter in x-Richtung umfasst.

8. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das optische Element einen Spalt (6) in x-Richtung umfasst, der in y-Richtung verschiebbar ist.

9. Analysegerät nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Spalt (6) eine Breite (b) aufweist, die klein ist gegen den Abstand benachbarter Detektorelemente (D_i), insbesondere kleiner als der halbe Abstand..

10. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das optische Element zwei separat verschiebbare Schneiden aufweist.

11. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das optische Element im Bereich zumindest einiger der n Detektorelemente (D_i) unterschiedlich viele und/oder große über die Detektorfläche verteilte transparente Bereiche aufweist.

12. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** es mehrere gegeneinander austauschbare und/oder miteinander kombinierbare optische Elemente aufweist.

13. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Detektor (7) und die Nachweiselektronik den Einfall einzelner Strahlungsquanten auf die Detektorelemente (D_i) registriert und zählt.

14. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Winkel zwischen der auf die Probe (2) einfallenden und der von der Probe (2) ausgehenden Strahlung zwischen 165° und 180° liegt.

15. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Detektor (7) um eine Achse senkrecht zur Detektoroberfläche drehbar ist.

16. Analysegerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Analysegerät als Punktdetektor (0-D Detektor) Verwendung findet, indem die von der Nachweiselektronik detektierten Strahlungsintensitäten der einzelnen Detektorelemente aufaddiert werden.

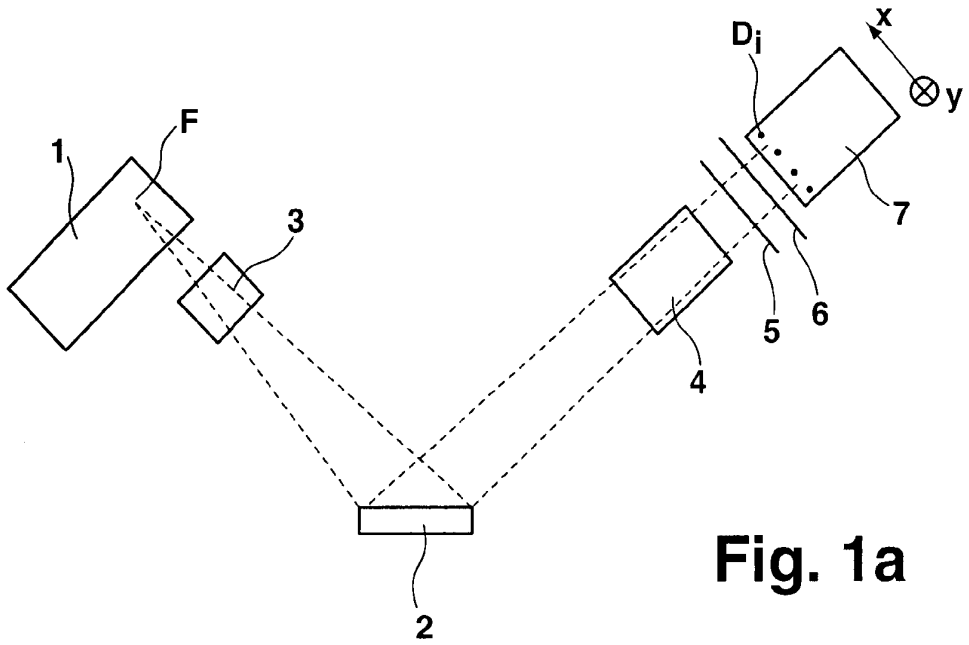

Fig. 1a

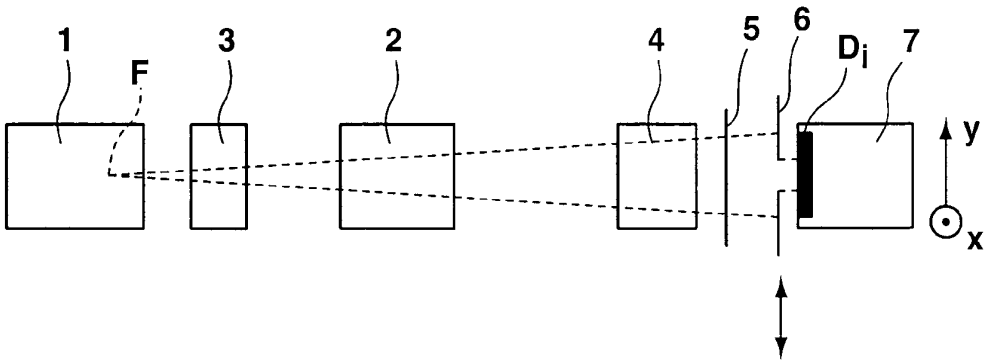

Fig. 1b

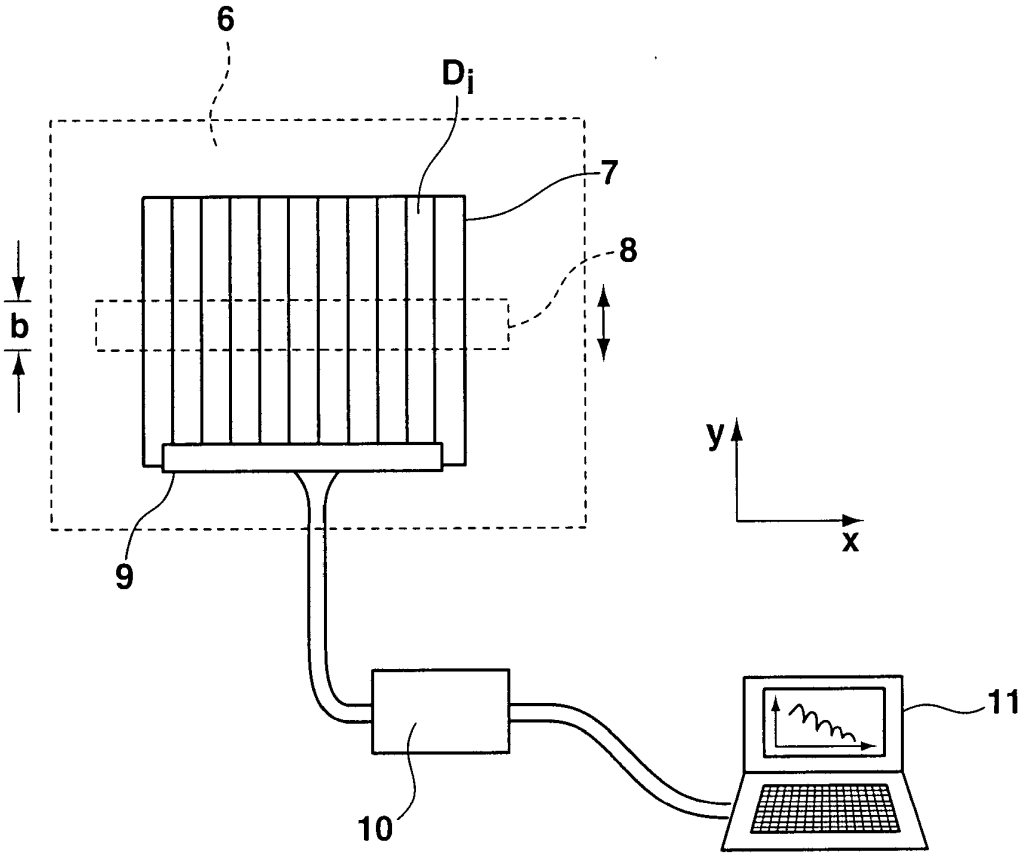

Fig. 2

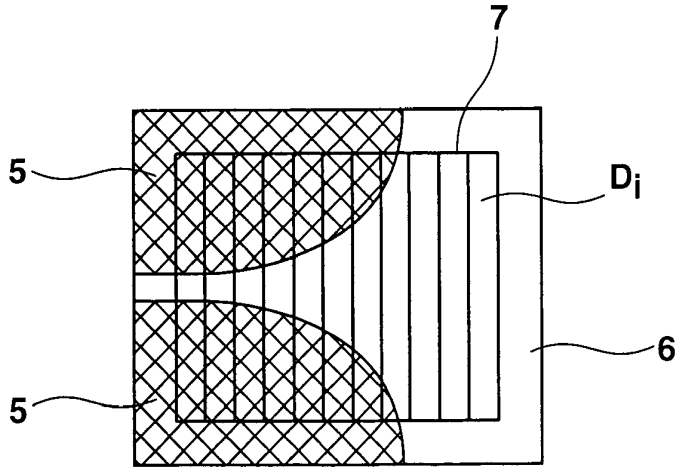

Fig. 3