



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2005 014 794 A1** 2006.10.05

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 014 794.1**

(22) Anmeldetag: **31.03.2005**

(43) Offenlegungstag: **05.10.2006**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01L 21/66** (2006.01)  
**G01N 21/95** (2006.01)

(71) Anmelder:

**Advanced Micro Devices, Inc., Sunnyvale, Calif.,  
US**

(74) Vertreter:

**Grünecker, Kinkeldey, Stockmair &  
Schwanhäusser, 80538 München**

(72) Erfinder:

**Robillard, Quentin de, 01097 Dresden, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**US2005/00 56 784 A1**

**US2003/02 01 393 A1**

**US2002/01 99 164 A1**

**US2002/00 34 338 A1**

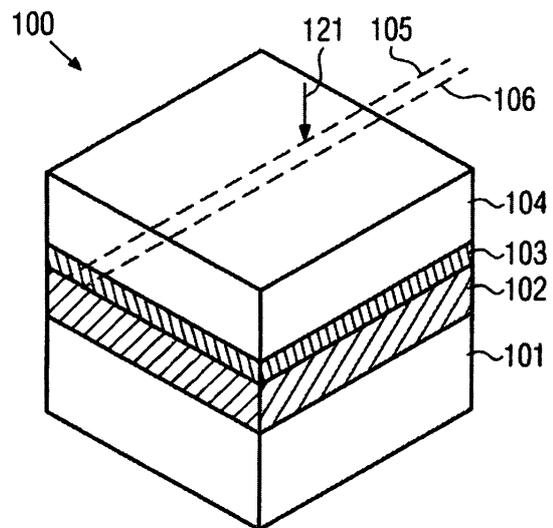
**US 64 48 555 B1**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Anlage und Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Anlage und ein Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe. Mehrere Abtastungen der Halbleiterprobe werden aufgezeichnet. Jede der Abtastungen umfasst eine räumlich aufgelöste Messung einer interessierenden Größe. Mindestens eine Kreuzkorrelation zwischen mindestens zwei der mehreren Abtastungen wird berechnet. Für jede der mehreren Abtastungen wird auf Grundlage der mindestens einen Kreuzkorrelation ein jeweiliger Verschiebungswert berechnet. Die Abtastungen werden miteinander überlagert. Bei der Überlagerung wird jede der Abtastungen um den jeweiligen Verschiebungswert verschoben. Die Verschiebungswerte können dafür ausgelegt sein, eine Drift der Halbleiterprobe, die auftritt, während die Abtastungen aufgezeichnet werden, zu kompensieren. Damit hilft die vorliegende Erfindung, Probleme, die durch die Drift verursacht werden, zu überwinden.



**Beschreibung**

## Gebiet der vorliegenden Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Ausbilden integrierter Schaltkreise und insbesondere auf die Prüfung von Halbleiterstrukturen.

## Beschreibung des Stands der Technik

**[0002]** Integrierte Schaltkreise umfassen eine große Anzahl einzelner Schaltkreiselemente, wie beispielsweise Transistoren, Kondensatoren und Widerstände, die auf einem Substrat ausgebildet sind. Diese Elemente werden intern durch elektrisch leitfähige Leitungen verbunden, um komplexe Schaltkreise, wie Speichervorrichtungen, Logikbausteine und Mikroprozessoren auszubilden. Die Leistung integrierter Schaltkreise kann verbessert werden, indem die Anzahl von Funktionseinheiten pro Schaltkreis erhöht wird, um ihren Funktionsumfang zu erweitern und/oder indem die Arbeitsgeschwindigkeit der einzelnen Schaltkreiselemente erhöht wird. Eine Verringerung der Strukturgrößen ermöglicht das Ausbilden einer größeren Anzahl von Schaltkreiselementen auf der selben Fläche, wodurch eine Erweiterung des Funktionsumfangs des Schaltkreises ermöglicht wird und außerdem Signalausbreitungszeiten verringert werden. Die Verringerung der Signalausbreitungszeiten ermöglicht eine Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit der Schaltkreiselemente. In modernen integrierten Schaltkreisen können Bemessungsvorschriften von ungefähr 90 nm oder weniger verwendet werden.

**[0003]** Das Ausbilden integrierter Schaltkreise umfasst ein Abscheiden einer großen Anzahl von Materialschichten auf einer Halbleiterstruktur. Die Materialschichten werden durch Fotolithografie und Ätzen bemustert, um die Schaltkreiselemente und deren Bestandteile auszubilden.

**[0004]** Da charakteristische Eigenschaften der Materialschichten die Leistung des integrierten Schaltkreises stark beeinflussen können, erfordert das Ausbilden integrierter Schaltkreise mit kleinen Strukturgrößen eine genaue und reproduzierbare Abscheidung von Materialschichten auf einem Halbleitersubstrat. Deshalb wird bei der Entwicklung von Prozessen für die Abscheidung von Materialschichten ein erheblicher Aufwand getrieben. Die Entwicklung solcher Prozesse erfordert Geräte und Verfahren für die Charakterisierung der abgedruckten Materialschichten.

**[0005]** Häufig wird zu diesem Zweck die Elektronenmikroskopie verwendet. Außer zur Aufnahme hochauflöser Bilder der Halbleiterstruktur kann die Elektronenmikroskopie auch zum Bestimmen einer chemischen Zusammensetzung der Halbleiterstruktur und der darauf ausgebildeten Materialschichten verwendet werden. Im Folgenden wird ein Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterstruktur nach dem Stand der Technik, das es ermöglicht, die chemische Zusammensetzung einer Materialschicht auf der Halbleiterstruktur zu bestimmen, mit Bezug auf die [Fig. 1a](#) und [Fig. 1b](#) beschrieben.

## Stand der Technik

**[0006]** **Fig. 1a** zeigt eine schematische Perspektivansicht eines Ausschnitts einer Halbleiterstruktur **100**. Die Halbleiterstruktur **100** umfasst ein Substrat **101**. Auf dem Substrat **101** sind eine erste Materialschicht **102**, eine zweite Materialschicht **103** und eine dritte Materialschicht **104** ausgebildet. Wie die Fachleute wissen, kann die Halbleiterstruktur **100** ausgebildet werden, indem eines aus einer Vielzahl von bekannten Abscheideverfahren, die eine chemische Dampfabscheidung, eine plasmaverstärkte chemische Dampfabscheidung und/oder eine physikalische Dampfabscheidung umfassen, durchgeführt wird.

**[0007]** Eine Halbleiterprobe **120** (**Fig. 1b**), die in Form einer Querschnittsprobe der Halbleiterstruktur **100** bereitgestellt wird, wird vorbereitet. Zu diesem Zweck wird die Halbleiterstruktur entlang Linien **105**, **106**, die im Wesentlichen parallel zueinander sein können, geschnitten. Eine Richtung der Schnitte, die durch einen Pfeil **121** angedeutet wird, ist zu der Oberfläche des Substrats **101** und der darauf ausgebildeten Materialschichten **102**, **103**, **104** im Wesentlichen senkrecht. Das Schneiden der Halbleiterstruktur **100** kann mit Hilfe den Fachleuten bekannter mechanischer Frästechniken durchgeführt werden. Nach dem Schneiden kann eine Dicke der Halbleiterprobe **120** mit Hilfe fortgeschrittener Verfahren des Ionenstrahlfräsens und mit Hilfe von Polier-techniken, die den Fachleuten ebenfalls bekannt sind, verringert werden.

**[0008]** **Fig. 1b** zeigt eine schematische Perspektivansicht eines Elektronenmikroskops **130**. Das Elektronenmikroskop **130** umfasst eine Elektronenquelle **107**, eine Elektronenoptik **109**, einen Detektor **110** und einen Probenhalter **121**. Diese Bauteile sind in einer Vakuumkammer (nicht gezeigt) bereitgestellt. Die Halbleiterpro-

be **120** ist an dem Probenhalter **121** befestigt.

**[0009]** Die Elektronenoptik **109** ist dafür ausgelegt, einen Elektronenstrahl **108**, der von der Elektronenquelle **107** bereitgestellt wird, auf die Halbleiterprobe **120** zu fokussieren. Der Detektor **110** ist dafür ausgelegt, eine interessierende Größe, beispielsweise einen Energieverlust von Elektronen aus dem Elektronenstrahl **108**, die von der Halbleiterprobe **120** gestreut werden, oder eine Wellenlänge von Röntgenstrahlen, die von der Halbleiterprobe **120** infolge der Bestrahlung mit Elektronen erzeugt werden, zu messen. Die Messung der interessierenden Größe kann mit Hilfe den Fachleuten bekannter Verfahren durchgeführt werden.

**[0010]** Die Halbleiterprobe **120** wird mit dem Elektronenstrahl **108** abgetastet. Zu diesem Zweck werden der Elektronenstrahl **108** und die Halbleiterprobe **120** relativ zueinander bewegt. Dies kann dadurch geschehen, dass die Halbleiterprobe **120** mechanisch bewegt wird, oder indem der Elektronenstrahl **108** abgelenkt wird. Wie die Fachleute wissen, kann der Elektronenstrahl **108** durch Anlegen eines elektrischen Felds oder eines Magnetfeldes, das auf die Elektronen im Elektronenstrahl **108** eine Kraft ausübt, abgelenkt werden.

**[0011]** Bei dem Abtastprozess kann der Elektronenstrahl **108** auf mehrere Punkte **112** gerichtet werden, die entlang einer Linie **111**, die über die Halbleiterprobe **111** verläuft, liegen. Die Linie **111** kann über Teile des Substrats **111** und der Materialschichten **102**, **103**, **104**, die an einer Schnittfläche der Halbleiterprobe **120** frei liegen, verlaufen. Jedesmal wenn der Elektronenstrahl **108** auf einen der mehreren Punkte **112** auftrifft, wird der Detektor **110** dazu verwendet, die interessierende Größe zu messen. Beispielsweise kann an jedem der Punkte **112** ein Röntgenspektrum oder ein Elektronenenergieverlustspektrum aufgezeichnet werden.

**[0012]** Die interessierende Eigenschaft kann anschließend untersucht werden, um charakteristische Eigenschaften der Halbleiterprobe **120** zu bestimmen. In Beispielen von Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterstruktur nach dem Stand der Technik können aus den ausgezeichneten Röntgenspektren und/oder den aufgezeichneten Elektronenenergieverlustspektren Informationen über eine chemische Zusammensetzung der Halbleiterprobe **120** abgeleitet werden. Dadurch kann man eine Verteilung chemischer Elemente entlang der Linie **111** erhalten, die dann beispielsweise dazu verwendet werden kann, eine Homogenität der Materialschichten **102**, **103**, **104** und/oder eine Schärfe von Grenzflächen zwischen den Materialschichten **102**, **103**, **104** zu untersuchen.

**[0013]** Neben der Bewegung der Halbleiterprobe **120** und des Elektronenstrahls **108** relativ zueinander, die beim Abtasten der Halbleiterprobe **120** ausgeführt wird, kann eine zusätzliche Relativbewegung der Halbleiterprobe **120** und des Elektronenstrahls **108**, die als "Drift" bezeichnet wird, auftreten, wie in **Fig. 1b** schematisch durch einen Pfeil **113** angedeutet. Die Drift kann durch mechanische Verschiebungen im Elektronenmikroskop **130** verursacht werden, die beispielsweise durch eine thermische Ausdehnung von dessen Bauteilen oder durch eine Relaxation von elastischen Spannungen in Bauteilen des Elektronenmikroskops **130** verursacht werden können. Eine weitere Ursache der Drift können Änderungen statischer elektromagnetischer Felder im Elektronenmikroskop **130** oder dessen Umgebung sein. Solche elektromagnetischen Felder können einen Einfluss auf Bahnen von Elektronen im Elektronenstrahl **108** haben.

**[0014]** Die Drift kann das Abtasten der Halbleiterprobe **120** störend beeinflussen. Dadurch können fehlerhafte Ergebnisse des Abtastprozesses entstehen. Insbesondere kann eine Drift der Halbleiterprobe **120** in der Abtastrichtung fehlerhafte Messungen von Dicken der Materialschichten **102**, **103**, **104** verursachen. Während eine Drift der Halbleiterprobe in der Abtastrichtung zu große Messwerte von Schichtdicken zur Folge haben kann, kann eine Drift der Halbleiterprobe in einer Richtung, die der Abtastrichtung entgegengesetzt ist, zu kleine Messwerte von Schichtdicken zur Folge haben. Um solche Fehler zu vermeiden, wurde vorgeschlagen, die Drift durch eine mechanische Bewegung der Halbleiterprobe **120** zu korrigieren. Zu diesem Zweck können Geschwindigkeit und Richtung der Drift bestimmt werden und anschließend kann der Probenhalter **120** in die entgegengesetzte Richtung bewegt werden.

**[0015]** Ein Nachteil des obigen Verfahrens zur Kompensation der Drift ist, dass die Genauigkeit der mechanischen Driftkorrektur begrenzt ist. Außerdem wird die mechanische Driftkorrektur üblicherweise schrittweise nach einer Messung der interessierenden Eigenschaft an mehreren Punkten, beispielsweise nach einer Messung an ungefähr 30 Punkten, durchgeführt. Dabei kann eine Drift, die während der Messung an den mehreren Punkten auftritt, nicht berücksichtigt werden. Somit erhält man lediglich eine teilweise Korrektur der Drift. Folglich kann eine mechanische Driftkorrektur für genaue Messungen unzureichend sein, insbesondere im Fall einer relativ großen Driftrate.

## Aufgabenstellung

**[0016]** Im Hinblick auf die oben erwähnten Nachteile besteht ein Bedarf nach einem Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterstruktur, das eine genauere Korrektur der Drift ermöglicht.

## Zusammenfassung der Erfindung

**[0017]** Gemäß einer veranschaulichenden Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst ein Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe ein Aufzeichnen mehrerer Abtastungen der Halbleiterprobe. Jede der Abtastungen umfasst eine räumlich aufgelöste Messung einer interessierenden Größe. Mindestens eine Kreuzkorrelation zwischen mindestens zwei der mehreren Abtastungen wird berechnet. Für jede der mehreren Abtastungen wird auf Grundlage der mindestens einen Kreuzkorrelation ein jeweiliger Verschiebungswert berechnet. Die Abtastungen werden überlagert. Bei der Überlagerung wird jede der Abtastungen um den jeweiligen Verschiebungswert verschoben.

**[0018]** Gemäß einer weiteren veranschaulichenden Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst ein Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe ein Aufzeichnen mehrerer Abtastungen der Halbleiterprobe. Das Aufzeichnen von jeder der Abtastungen umfasst ein Abtasten der Halbleiterstruktur mit einem Elektronenstrahl und eine Messung einer Antwort der Halbleiterstruktur auf den Elektronenstrahl. Mindestens eine Kreuzkorrelation zwischen mindestens zwei der mehreren Abtastungen wird berechnet. Für jede der mehreren Abtastungen wird auf Grundlage der mindestens einen Kreuzkorrelation ein jeweiliger Verschiebungswert bestimmt. Die Abtastungen werden addiert. Bei der Addition wird jede der Abtastungen um den jeweiligen Verschiebungswert verschoben.

**[0019]** Gemäß noch einer weiteren veranschaulichenden Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst eine Anlage zum Prüfen einer Halbleiterprobe ein Elektronenmikroskop, das dafür ausgelegt ist, mehrere Abtastungen der Halbleiterprobe aufzuzeichnen.

**[0020]** Jede der Abtastungen umfasst eine räumlich aufgelöste Messung einer interessierenden Größe. Ein Analysator ist dafür ausgelegt, mindestens eine Kreuzkorrelation zwischen mindestens zwei der mehreren Abtastungen zu berechnen und für jede der mehreren Abtastungen auf Grundlage der mindestens einen Kreuzkorrelation einen jeweiligen Verschiebungswert zu bestimmen. Ein Überlagerer ist dafür ausgelegt, die Abtastungen zu überlagern. Bei der Überlagerung wird jede der Abtastungen um den jeweiligen Verschiebungswert verschoben.

## Ausführungsbeispiel

## Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0021]** Weitere Vorteile, Aufgaben und Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung sind in den beigefügten Patentansprüchen definiert und werden anhand der folgenden ausführlichen Beschreibung deutlicher, wenn diese mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen verwendet wird. Es zeigen:

**[0022]** [Fig. 1a](#) eine schematische Perspektivansicht eines Ausschnitts aus einer Halbleiterstruktur mit mehreren Materialschichten nach dem Stand der Technik;

**[0023]** [Fig. 1b](#) eine schematische Perspektivansicht eines Elektronenmikroskops nach dem Stand der Technik, das für eine Untersuchung von Halbleiterstrukturen ausgelegt ist;

**[0024]** [Fig. 2](#) eine schematische Perspektivansicht einer Anlage zum Prüfen einer Halbleiterprobe gemäß einer veranschaulichenden Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

**[0025]** [Fig. 3](#) ein schematisches Diagramm, das ein Punktraster einer zweidimensionalen Abtastung einer Halbleiterprobe veranschaulicht, die bei einem Verfahren gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung durchgeführt wird; und

**[0026]** [Fig. 4](#) ein schematisches Diagramm, das Abtastungen einer Halbleiterprobe, die bei einem Verfahren gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung durchgeführt werden, veranschaulicht.

**[0027]** Obwohl die vorliegende Erfindung in Bezug auf die in der folgenden ausführlichen Beschreibung und den Zeichnungen veranschaulichten Ausführungsformen beschrieben wird, sollte verstanden werden, dass die folgende ausführliche Beschreibung und die Zeichnungen nicht beabsichtigen, die vorliegende Erfindung auf die speziellen veranschaulichenden Ausführungsformen, die offenbart werden, einzuschränken, sondern dass vielmehr die beschriebenen veranschaulichenden Ausführungsformen lediglich Beispiele für die verschiedenen Aspekte der vorliegenden Erfindung, deren Umfang durch die beigefügten Patentansprüche definiert werden, geben.

**[0028]** Die vorliegende Erfindung richtet sich allgemein auf Verfahren und Vorrichtungen zum Prüfen einer Halbleiterstruktur, bei denen eine Drift korrigiert wird, indem mehrere Abtastungen einer Halbleiterstruktur mit einer relativ kurzen Erfassungszeit pro Messpunkt aufgezeichnet werden und anschließend die Abtastungen überlagert werden. Bei der Überlagerung wird jede der Abtastungen um einen Verschiebungswert, der dafür ausgelegt ist, die Drift auszugleichen, verschoben.

**[0029]** Die Erfassungszeit kann so ausgelegt sein, dass Einflüsse der Drift auf die Qualität der einzelnen Abtastungen im Wesentlichen vernachlässigt werden können. Anschließend wird die Verschiebung durch eine Untersuchung der mehreren Abtastungen bestimmt. Zu diesem Zweck kann mindestens eine Kreuzkorrelation zwischen mindestens zwei der mehreren Abtastungen berechnet werden und jeweilige Verschiebungswerte, die für eine Korrektur der Drift ausgelegt sind, können aus der mindestens einen Kreuzkorrelation bestimmt werden. Bei der Überlagerung, die eine Addition der Abtastungen umfassen kann, wird jede der Abtastungen um den jeweiligen Verschiebungswert verschoben. Dadurch können Messungen einer interessierenden Größe, die im Wesentlichen an derselben Stelle auf der Halbleiterprobe gemacht wurden, miteinander überlagert werden.

**[0030]** Weitere Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden nun mit Bezug auf die [Fig. 2](#), [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) beschrieben.

**[0031]** [Fig. 2](#) zeigt eine schematische Perspektivansicht einer Anlage **200** zum Prüfen einer Halbleiterprobe **207** gemäß der vorliegenden Erfindung.

**[0032]** Die Anlage **200** umfasst ein Elektronenmikroskop **201**. Ähnlich wie das oben mit Bezug auf [Fig. 1b](#) beschriebene Elektronenmikroskop **130** umfasst das Elektronenmikroskop **201** eine Elektronenquelle **203**. Eine Elektronenoptik **205** ist dafür ausgelegt, einen Elektronenstrahl **204**, der von der Elektronenquelle **203** emittiert wird, auf die Halbleiterprobe **207** zu fokussieren. Die Halbleiterprobe **207** kann eine Querschnittsprobe einer Halbleiterstruktur ähnlich der in [Fig. 1a](#) gezeigten Halbleiterstruktur **100** umfassen. Insbesondere kann die Halbleiterprobe **207** Teile eines Substrats **208**, auf dem eine erste Materialschicht **209**, eine zweite Materialschicht **210** und eine dritte Materialschicht **211** ausgebildet sind, umfassen. Die Halbleiterprobe **207** kann in einem Probenhalter **206**, der dafür ausgelegt ist, die Halbleiterprobe **207** in einem Fokus der Elektronenoptik **205** zu halten, bereitgestellt werden.

**[0033]** Das Elektronenmikroskop **201** umfasst ferner einen Detektor **218**. In manchen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann der Detektor **218** ein Röntgenspektrometer eines den Fachleuten bekannten Typs umfassen. Das Röntgenspektrometer kann dafür ausgelegt sein, ein Spektrum von Röntgenstrahlen, die von der Halbleiterprobe **207** infolge einer Bestrahlung mit den Elektronen in dem Elektronenstrahl **207** emittiert werden, zu messen. In anderen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann der Detektor **218** einen energieauflösenden Röntgendetektor eines den Fachleuten bekannten Typs, der dafür ausgelegt ist, selektiv eine Intensität von Röntgenstrahlen mit einer Wellenlänge in einem vorbestimmten Wellenlängenbereich zu messen, umfassen.

**[0034]** In weiteren Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann der Detektor **218** einen energieauflösenden Elektronendetektor eines den Fachleuten bekannten Typs umfassen. Der energieauflösende Elektronendetektor kann dafür ausgelegt sein, eine Energieverteilung von Elektronen des Elektronenstrahls **204**, die an der Halbleiterstruktur **207** gestreut wurden und/oder Sekundärelektronen, die von der Halbleiterstruktur **207** infolge der Bestrahlung mit den Elektronen des Elektronenstrahls **207** emittiert wurden, zu messen. In anderen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann der energieauflösende Elektronendetektor dafür ausgelegt sein, selektiv eine Intensität von Elektronen mit einer Energie in einem vorbestimmten Energiebereich zu messen.

[0035] Der Detektor **218** und die Elektronenquelle **203** müssen nicht, wie in [Fig. 2](#) gezeigt, auf der selben Seite der Halbleiterprobe **207** angeordnet sein. In anderen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann der Detektor **218** auf einer Seite der Halbleiterprobe **207**, die der Elektronenquelle **203** und der Elektronenoptik **205** gegenüberliegt, angeordnet sein.

[0036] Zusätzlich zu dem Elektronenmikroskop **201** kann die Anlage **200** zum Prüfen einer Halbleiterprobe einen Analysator **202** und eine Steuereinheit **223** umfassen. Der Analysator **202** kann einen Korrelationsrechner **219**, einen Verschiebungswertrechner **220**, einen Verschieber **221** und einen Überlagerer **222** aufweisen. Die Steuereinheit **223** kann dafür ausgelegt sein, den Analysator **202** und das Elektronenmikroskop **201** zu steuern. In manchen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung können der Analysator **202** und die Steuereinheit **223** in Form eines den Fachleuten bekannten Digitalrechners bereitgestellt werden.

[0037] Im Folgenden wird ein Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe gemäß der vorliegenden Erfindung, das in manchen Ausführungsformen mit Hilfe der Anlage **200** durchgeführt werden kann, beschrieben. Das Verfahren umfasst ein Bereitstellen der Halbleiterprobe **207** und ein Einsetzen der Halbleiterprobe **207** in den Probenhalter **206**.

[0038] In manchen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung umfasst die Halbleiterprobe **207** eine Querschnittsprobe einer Halbleiterstruktur ähnlich der in [Fig. 1a](#) gezeigten Halbleiterstruktur **100**. Die Halbleiterprobe **207** kann bereitgestellt werden, indem die Halbleiterstruktur entlang paralleler Linien ähnlich den in [Fig. 1a](#) gezeigten Linien **105**, **106** geschnitten wird, beispielsweise mit Hilfe des den Fachleuten bekannten mechanischen Fräsens. Eine Richtung der Schnitte kann im Wesentlichen senkrecht zu einer in der Halbleiterprobe vorhandenen Materialschicht sein. Nach dem Schneiden kann eine Dicke der Halbleiterprobe **207** verringert werden, beispielsweise mit Hilfe fortgeschrittener Verfahren des Ionenstrahlfräsens und Polierens. Typischerweise kann die Halbleiterprobe eine Dicke im Bereich von ungefähr 30 nm bis ungefähr 120 nm haben.

[0039] Anschließend wird die Elektronenquelle **203** eingeschaltet, so dass sie den Elektronenstrahl **204** bereitstellt. Der Elektronenstrahl **204** wird auf einen Punkt **230** auf der Oberfläche der Halbleiterprobe **207** fokussiert. Die Elektronen im Elektronenstrahl **204** treffen auf einen Teil der Halbleiterprobe **207** in der Nähe des Punkts **230** auf und wechselwirken mit der Halbleiterprobe **207**.

[0040] Wegen der Wechselwirkung zwischen den Elektronen und der Halbleiterprobe **207** kann ein Teil der Elektronen gestreut werden. Zusätzlich kann Energie von den Elektronen in dem Elektronenstrahl **204** auf Elektronen in der Halbleiterprobe **207** übertragen werden. Dadurch können Elektronen aus gebundenen Zuständen in der Halbleiterprobe **207** entfernt werden und die Halbleiterprobe **207** verlassen. Die gebundenen Zustände können anschließend durch andere Elektronen wiederbesetzt werden. Energie, die beim Wiederbesetzen der gebundenen Zustände frei wird, kann in Form von Röntgenstrahlen emittiert werden. Da der Elektronenstrahl **204** auf den Punkt **230** fokussiert ist, finden Wechselwirkungen zwischen den Elektronen des Elektronenstrahls **204** und der Halbleiterprobe **207** im Wesentlichen nur an dem Punkt **230** statt.

[0041] Sowohl die Energieverteilung der gestreuten Elektronen und der Sekundärelektronen als auch das Spektrum der Röntgenstrahlen kann Informationen bezüglich einer interessierenden Größe enthalten. Die Energieverteilung der gestreuten Elektronen und der Sekundärelektronen kann Peaks bei bestimmten Elektronenenergien aufweisen. Eine Höhe solcher Peaks kann für eine Konzentration eines bestimmten chemischen Elements und/oder das Vorhandensein einer bestimmten Art chemischer Bindungen am Punkt **230** repräsentativ sein. Entsprechend kann das Röntgenspektrum Peaks bei bestimmten Wellenlängen, die für die Anwesenheit bestimmter chemischer Elemente in der Halbleiterstruktur **207** sind charakteristisch, aufweisen.

[0042] Die interessierende Größe kann durch Untersuchungen der gestreuten Elektronen, der Sekundärelektronen und/oder der in der Halbleiterprobe **207** erzeugten Röntgenstrahlen bestimmt werden.

[0043] In manchen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann die interessierende Größe eine Anzahl von Elektronen, die vom Punkt **230** empfangen wurden und eine Energie in einem vorbestimmten Bereich haben, umfassen. In Ausführungsformen, in denen der Detektor **218** dafür ausgelegt ist, eine Energieverteilung der gestreuten Elektronen und/oder der Sekundärelektronen zu messen, kann die Anzahl der Elektronen, die eine Energie in dem vorbestimmten Bereich haben, bestimmt werden, indem die gemessene Energieverteilung über den vorbestimmten Energiebereich integriert wird. In anderen Ausführungsformen, in denen der Detektor **218** dafür ausgelegt ist, selektiv eine Intensität von Elektronen mit einer Energie in dem vorbestimmten Bereich zu messen, ist eine solche Integration nicht nötig.

**[0044]** In weiteren Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann die interessierende Größe eine Anzahl von Röntgenphotonen, die von dem Punkt **230** empfangen werden und eine Wellenlänge in einem bestimmten Bereich haben, umfassen. In Ausführungsformen, in denen der Detektor **218** ein Röntgenspektrometer umfasst, kann die interessierende Größe bestimmt werden, indem ein gemessenes Röntgenspektrum über den interessierenden Wellenlängenbereich integriert wird. In anderen Ausführungsformen, in denen der Detektor **218** einen energieauflösenden Röntgendetektor umfasst, der dafür ausgelegt ist, selektiv eine Intensität von Röntgenstrahlen mit einer Wellenlänge in dem vorbestimmten Wellenlängenbereich zu messen, ist eine solche Integration nicht nötig.

**[0045]** In einer speziellen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann die interessierende Größe eine Menge gestreuter Elektronen mit einer Energie in einem Bereich von ungefähr 1,5 keV weniger als der Energie der Elektronen im Elektronenstrahl **204** bis ungefähr 300 keV weniger als der Energie der Elektronen im Elektronenstrahl **204** umfassen. Die Elektronen im Elektronenstrahl **204** können eine Energie von ungefähr 120 keV, von ungefähr 200 keV oder ungefähr 300 keV haben. In einer anderen Ausführungsform kann die interessierende Größe eine Intensität von Röntgenstrahlen mit einer Energie von ungefähr 300 keV oder weniger umfassen. Beispiele für Energiebereiche von Elektronen und Wellenlängen von Röntgenstrahlen, die für eine Konzentration bestimmter chemischer Elemente und/oder ein Auftreten bestimmter Arten chemischer Bindungen repräsentativ sind, sind den Fachleuten bekannt.

**[0046]** Die Halbleiterprobe **207** wird mit dem Elektronenstrahl **204** abgetastet. Das Abtasten der Halbleiterprobe **207** kann von der Steuereinheit **223** gesteuert werden.

**[0047]** Bei dem Abtastprozess wird der Punkt **230**, an dem der Elektronenstrahl **204** auf die Halbleiterprobe **207** auftrifft, über die Halbleiterprobe **207** bewegt.

**[0048]** Zu diesem Zweck können der Elektronenstrahl und die Halbleiterprobe **207** relativ zueinander bewegt werden. In manchen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung wird die Relativbewegung des Elektronenstrahls **204** und der Halbleiterprobe **207** dadurch bewirkt, dass der Elektronenstrahl **204** mit Hilfe eines elektrischen oder magnetischen Feldes, das in manchen Ausführungsformen mit Hilfe der Elektronenoptik **205** erzeugt werden kann, abgelenkt wird. In anderen Ausführungsformen kann die Relativbewegung des Elektronenstrahls **204** und der Halbleiterprobe **207** dadurch erreicht werden, dass die Halbleiterprobe mechanisch verschoben wird. Wie die Fachleute wissen, kann eine mechanische Bewegung der Halbleiterprobe **207** bewirkt werden, indem eine elektrische Spannung an piezoelektrische Kristalle (nicht gezeigt), die im Probenhalter **206** bereitgestellt sind angelegt wird, wobei die Halbleiterprobe **207** mit den piezoelektrischen Kristallen verbunden ist.

**[0049]** In manchen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung wird eine eindimensionale Abtastung der Halbleiterprobe **207** durchgeführt. In solchen Ausführungsformen wird der Punkt **230** entlang einer Linie **212** bewegt, die im Wesentlichen senkrecht zu einer oder mehreren Materialsichten **209**, **210**, **211**, die in der Halbleiterprobe **207** ausgebildet sind, sein kann. Während des Abtastprozesses kann die interessierende Größe an mehreren Punkten, die entlang der Linie **212** angeordnet sind, gemessen werden. Dadurch erhält man eine räumlich aufgelöste Messung der interessierenden Größe, die eindimensionale Daten enthält. Eine Auflösung der räumlich aufgelösten Messung wird durch einen Abstand zwischen den Punkten bestimmt.

**[0050]** In anderen Ausführungsformen kann eine zweidimensionale Abtastung durchgeführt werden. [Fig. 3](#) zeigt ein schematisches Diagramm, das ein Raster **303** von Punkten veranschaulicht. Eine erste Koordinatenachse **301** und eine zweite Koordinatenachse **302** repräsentieren Positionen auf der Oberfläche der Halbleiterprobe **207**. Ein erster Index  $i$  nummeriert Spalten der Punkte **303**, die entlang der ersten Koordinatenachse **301** angeordnet sind. Ein zweiter Index  $j$  nummeriert Zeilen der Punkte **303**, die entlang der zweiten Koordinatenachse **302** angeordnet sind. Jeder der Punkte **303** kann durch ein Wertepaar der Indizes  $i, j$  gekennzeichnet werden. Beispielsweise ist ein Punkt **304** durch die Indizes  $i = j = 3$  gekennzeichnet.

**[0051]** Während der Abtastung, wird der Punkt **230**, an dem der Elektronenstrahl **204** auf die Halbleiterprobe **207** auftrifft, nacheinander zu den Punkten des Rasters **303** bewegt. In manchen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung können die Punkte des Rasters **303** zeilenweise abgetastet werden. Zu diesem Zweck wird der Punkt **230** zuerst nacheinander zu der Zeile von Punkten des Rasters **303** mit dem Index  $j = 0$  bewegt. Anschließend wird der Punkt **230** nacheinander auf Zeilen von Punkten mit zunehmendem Index  $j$  gerichtet.

**[0052]** An jedem Punkt der Abtastung kann die interessierende Größe gemessen werden. Dadurch kann man eine räumliche aufgelöste Messung der interessierenden Größe, die zweidimensionale Daten umfasst, erhal-

ten.

**[0053]** In einer speziellen Ausführungsform, in der die interessierende Größe eine Menge von Elektronen in einem bestimmten Energiebereich umfasst, kann der Abtastprozess eine Dauer von ungefähr 200 Sekunden oder weniger, von ungefähr 100 Sekunden oder weniger oder von ungefähr 50 Sekunden oder weniger haben. In einer anderen Ausführungsform, in der die interessierende Größe eine Intensität von Röntgenstrahlen mit einer Wellenlänge in einem bestimmten Wellenlängenbereich umfasst, kann der Abtastprozess eine Dauer von ungefähr 200 Minuten oder weniger, von ungefähr 100 Minuten oder weniger oder von ungefähr 50 Minuten oder weniger haben.

**[0054]** Ähnlich wie in dem oben mit Bezug auf die [Fig. 1a](#) und [Fig. 1b](#) beschriebenen Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterstruktur nach dem Stand der Technik kann bei dem Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe gemäß der vorliegenden Erfindung eine Drift auftreten, wie in [Fig. 2](#) schematisch durch einen Pfeil **217** angedeutet. In manchen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann eine Geschwindigkeit des Abtastprozesses so ausgelegt sein, dass eine relative Verschiebung des Elektronenstrahls **204** und der Halbleiterprobe **207**, die durch die Drift verursacht wird, im Vergleich zur Auflösung der räumlich aufgelösten Messung bei typischen Driftraten vernachlässigt werden kann.

**[0055]** Mehrere Abtastungen der Halbleiterprobe **207** ähnlich dem oben beschriebenen Abtastprozess werden durchgeführt. Bei jeder Abtastung erhält man eine räumlich aufgelöste Messung der interessierenden Größe. Wegen der Drift sind die einzelnen Abtastungen relativ zueinander verschoben.

**[0056]** Im Fall einer eindimensionalen Abtastung, bei der die interessierende Größe an mehreren Punkten, die entlang einer Linie angeordnet sind, gemessen wird, kann die Drift eine Komponente quer zu der Linie haben. Wenn die erste der mehreren Abtastungen entlang der Linie **212** durchgeführt wird, werden aus diesem Grund andere der mehreren Abtastungen entlang der Linien **213**, **214**, **215**, **216**, die zu der Linie **212** im Wesentlichen parallel sind, durchgeführt. Zusätzlich kann die Drift eine Komponente parallel zur Richtung der Abtastungen haben.

**[0057]** Wenn die Abtastungen in einer Richtung, die zumindest zu einer der Materialschichten **209**, **210**, **211** der Halbleiterstruktur **207** im Wesentlichen senkrecht ist, durchgeführt werden, kann die interessierende Größe wegen der unterschiedlichen Zusammensetzung der Materialschichten **209**, **210**, **211** relativ große Schwankungen in der Richtung der Abtastungen aufweisen. In der Richtung quer zu den Abtastungen können die Schwankungen der interessierenden Größe jedoch deutlich geringer sein. Deshalb kann die Querkomponente der Drift einen relativ kleinen Einfluss auf die bei den einzelnen Abtastungen gemessene interessierende Größe haben.

**[0058]** [Fig. 4](#) zeigt ein schematisches Diagramm **400**, das eindimensionale Abtastungen einer Halbleiterprobe, die in Anwesenheit einer Drift aufgenommen wurden, veranschaulicht. Das Diagramm umfasst eine erste Koordinatenachse **401** und eine zweite Koordinatenachse **402**. Die erste Koordinatenachse **401** repräsentiert einen Abstand von einem ersten Punkt jeder der Abtastungen, an dem die räumlich aufgelöste Messung begonnen wurde. Die zweite Koordinatenachse **402** repräsentiert Werte der interessierenden Größe, die bei jeder der Abtastungen gemessen wurden.

**[0059]** Eine erste Kurve **403** veranschaulicht Werte der interessierenden Größe, die bei einer ersten Abtastung gemessen wurde. Die erste Messkurve **403** kann mehrere Peaks **404**, **405**, **406** umfassen, die Positionen auf der Halbleiterprobe **207**, an denen die interessierende Größe relativ große Werte annimmt, repräsentieren. Eine zweite Kurve **407** veranschaulicht Werte der interessierenden Größe, die bei einer zweiten Abtastung gemessen wurden. Ähnlich wie die erste Kurve **403** umfasst die zweite Kurve **407** Peaks **408**, **409**, **410**. Wegen der Komponente der Drift in Richtung der ersten Abtastung und der zweiten Abtastung sind die Peaks **408**, **409**, **410** relativ zu den Peaks **404**, **405**, **406** um einen Abstand  $d$  verschoben.

**[0060]** Entsprechend sind in Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen mehrere zweidimensionale Abtastungen der Halbleiterprobe **207** durchgeführt werden, charakteristische Strukturen der interessierenden Größe auf der Oberfläche der Halbleiterprobe **207** in den einzelnen Abtastungen relativ zueinander verschoben. Die Verschiebung der charakteristischen Strukturen kann sowohl eine Komponente in Richtung der ersten Koordinatenachse **301** als auch eine Komponente in Richtung der zweiten Koordinatenachse **302** haben ([Fig. 3](#)).

**[0061]** Mindestens eine Kreuzkorrelation zwischen mindestens zwei der mehreren Abtastungen wird berech-

net. Dies kann mit Hilfe des Korrelationsrechners **219** des Analysators **202** geschehen.

**[0062]** In Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen die Abtastungen eindimensionale Daten umfassen, wird bei jeder Abtastung die interessierende Größe an mehreren Punkten, die entlang einer Linie angeordnet sind, gemessen. Im Folgenden bezeichnet  $f_i$  den Wert der interessierenden Größe, der an einem  $i$ -ten der mehreren Punkte der ersten Abtastung gemessen wurde, während  $g_j$  den Wert der interessierenden Größe, der an einem  $j$ -ten der mehreren Punkte der zweiten Abtastung gemessen wurde, bezeichnet. Die Indizes  $i, j$  nummerieren die Punkte der jeweiligen Abtastungen.  $i = 0$  bezeichnet einen ersten Punkt der ersten Abtastung und  $i = n - 1$  bezeichnet einen letzten Punkt der ersten Abtastung, wobei  $n$  die Anzahl der Punkte bei jeder der Abtastungen ist. Entsprechend bezeichnet  $j = 0$  einen ersten Punkt der zweiten Abtastung und  $j = n - 1$  bezeichnet einen letzten Punkt der zweiten Abtastung. Für Werte der Indizes  $i, j$  kleiner als Null oder größer als  $n - 1$  können  $f_i$  und  $g_j$  gleich Null gesetzt werden.

**[0063]** Die Kreuzkorrelation zwischen der ersten Abtastung und einer zweiten Abtastung kann anschließend gemäß

$$c_j = \sum_{k=0}^{n-1} f_k g_{j+k} \quad (1)$$

berechnet werden, wobei der Index  $j$  sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann. Die Kreuzkorrelation entspricht einer Summe von Produkten der Werte der interessierenden Größe, die bei der ersten und bei der zweiten Abtastung gemessen wurden, wobei die zweite Abtastung um einen Abstand, der von dem Index  $j$  bestimmt wird, verschoben ist. Positive Werte des Index  $j$  entsprechen einer Verschiebung der zweiten Abtastung in der Richtung vom ersten Punkt der zweiten Abtastung zum letzten Punkt der zweiten Abtastung, während negative Werte des Index  $j$  einer Verschiebung der zweiten Abtastung in die entgegengesetzte Richtung entsprechen.  $j = 0$  entspricht überhaupt keiner Verschiebung der ersten Abtastung.

**[0064]** In anderen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen die Abtastungen zweidimensionale Daten umfassen, kann die Kreuzkorrelation zwischen einer ersten der mehreren Abtastungen und einer zweiten der mehreren Abtastungen gemäß

$$c_{i,j} = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n-1} f_{k,l} g_{k+i,l+j} \quad (2)$$

berechnet werden, wobei  $f_{k,l}$  einen Wert der interessierenden Größe, der bei der ersten Abtastung an einem Punkt des Rasters mit einem ersten Index  $k$  und einem zweiten Index  $l$  gemessen wurde, bezeichnet und  $g_{k+i,l+j}$  einen Wert der interessierenden Größe, der bei der zweiten Abtastung an einem Punkt des Rasters mit einem ersten Index  $k + i$  und einem zweiten Index  $l + j$  gemessen wurde, bezeichnet. Für Werte von  $k + i$  und  $l + j$  kleiner als Null oder größer als  $n - 1$  kann  $g_{k+i,l+j}$  gleich Null gesetzt werden. Das Indexpaar  $(i, j)$  charakterisiert eine Verschiebung der zweiten Abtastung.

**[0065]** Wie die Fachleute wissen, kann die Kreuzkorrelation mit Hilfe einer schnellen Fouriertransformation effektiv berechnet werden. Alternativ kann die Kreuzkorrelation direkt berechnet werden, indem die Summation nach Gleichung (1) bzw. Gleichung (2) durchgeführt wird.

**[0066]** Die Kreuzkorrelation zwischen der ersten Abtastung und der zweiten Abtastung nimmt große Werte an, wenn die zweite Abtastung so verschoben wird, dass große Werte der interessierenden Größe, die bei der ersten Abtastung gemessen wurden, mit großen Werten der interessierenden Größe, die bei der zweiten Abtastung gemessen wurden, zusammenfallen. Wenn beispielsweise die Werte der interessierenden Größe, die bei einer eindimensionalen Abtastung gemessen wurden, durch die Kurven **403**, **407** gegeben sind, nimmt die Kreuzkorrelation bei einem Wert des Index  $j$  ein Maximum an, der einer Verschiebung der ersten Abtastung um den Abstand  $d$  in die der ersten Koordinatenachse **401** entgegengesetzten Richtung entspricht, so dass die Peaks **404**, **408**, die Peaks **409**, **405** und die Peaks **406**, **410** zusammenfallen. Entsprechend nimmt die Kreuzkorrelation zwischen zwei zweidimensionalen Abtastungen große Werte an, wenn die zweite Abtastung um solche Strecken in Richtung der ersten Koordinatenachse **301** bzw. der zweiten Koordinatenachse **302** verschoben wird, dass charakteristische Strukturen der interessierenden Größe in der ersten Abtastung und der zweiten Abtastung zusammenfallen.

**[0067]** Für jede der mehreren Abtastungen wird auf Grundlage der mindestens einen Kreuzkorrelation ein jeweiliger Verschiebungswert berechnet.

**[0068]** In Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen eindimensionale Abtastungen durchgeführt werden, können Kreuzkorrelationen zwischen einer ersten der mehreren Abtastungen und jeder anderen der mehreren Abtastungen berechnet werden. Anschließend wird mit Hilfe den Fachleuten bekannter numerischer Verfahren für jede Kreuzkorrelation ein Wert des Index  $j$ , der die jeweilige Kreuzkorrelation maximiert, berechnet. Anschließend erhält die erste Abtastung einen Verschiebungswert Null. Jede der anderen Abtastungen erhält einen Verschiebungswert  $j_k$ , der dem Wert des Index  $j$  entspricht, der die Korrelation zwischen der ersten Abtastung und der jeweiligen Abtastung maximiert.

**[0069]** In anderen Ausführungsformen, in denen eindimensionale Abtastungen durchgeführt werden, wird eine Kreuzkorrelation zwischen der ersten der mehreren Abtastungen und der letzten der mehreren Abtastungen berechnet. Anschließend wird ein Wert  $j_{\max}$  des Index  $j$ , der die Kreuzkorrelation maximiert, mit Hilfe den Fachleuten bekannter numerischer Verfahren berechnet. Daraufhin erhält die erste Abtastung einen Verschiebungswert Null und die letzte Abtastung erhält einen Verschiebungswert  $j_{\max}$ . Um Verschiebungswerte für die anderen Abtastungen zu bestimmen, kann eine Interpolation zwischen dem Verschiebungswert Null und dem Verschiebungswert  $j_{\max}$  durchgeführt werden. Die Interpolation kann eine lineare Interpolation sein, bei der der Verschiebungswert für eine  $k$ -te der Abtastungen gemäß

$$j_k = \text{round}\left(\frac{j_{\max}(k-1)}{N-1}\right) \quad (3)$$

bestimmt werden kann, wobei  $N$  die Anzahl der durchgeführten Abtastungen ist und  $\text{round}(x)$  einen gerundeten Wert einer Zahl  $x$  bezeichnet.

**[0070]** Eine lineare Interpolation zwischen den Verschiebungswerten für die erste Abtastung und die letzte Abtastung ist besonders vorteilhaft, wenn die Drift im Wesentlichen eine lineare Bewegung der Halbleiterprobe **207** und des Elektronenstrahls **207** relativ zueinander mit konstanter Geschwindigkeit ist. In diesem Fall nimmt die durch die Drift verursachte Verschiebung zwischen der ersten Abtastung und einer anderen Abtastung linear mit der Zeit, die zwischen der Aufzeichnung der ersten Abtastung und der der anderen Abtastung vergangen ist, zu. Der Wert  $j_{\max}$  des Index  $j$  ist für die Driftgeschwindigkeit repräsentativ. Je größer die Driftgeschwindigkeit, desto größer ist  $j_{\max}$ .

**[0071]** In Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen zweidimensionale Abtastungen durchgeführt werden, kann ein jeweiliger Verschiebungswert, der ein Paar Indizes  $(i_k, j_k)$  umfasst, bestimmt werden, indem Kreuzkorrelationen zwischen einer ersten der mehreren Abtastungen und jeder anderen der mehreren Abtastungen berechnet werden. Die erste Abtastung erhält einen Verschiebungswert  $(0, 0)$ . Jede der anderen Abtastungen erhält einen Verschiebungswert, der einem Paar  $(i_k, j_k)$  von Werten entspricht, das die Kreuzkorrelation zwischen der jeweiligen Abtastung und der ersten Abtastung maximiert.

**[0072]** In anderen Ausführungsformen, in denen zweidimensionale Abtastungen durchgeführt werden, kann die Kreuzkorrelation zwischen der ersten der mehreren Abtastungen und der letzten der mehreren Abtastungen berechnet werden. Anschließend wird ein Paar  $(i_{\max}, j_{\max})$  von Indizes, das die Kreuzkorrelation maximiert, bestimmt, was mit Hilfe den Fachleuten bekannter numerischer Verfahren geschehen kann. Die erste Abtastung erhält den Verschiebungswert  $(0, 0)$  und die letzte Abtastung erhält den Verschiebungswert  $(i_{\max}, j_{\max})$ . Verschiebungswerte  $(i_k, j_k)$  für die anderen Abtastungen können mit Hilfe einer Interpolation gemäß den folgenden mathematischen Ausdrücken bestimmt werden, wobei  $N$  die Anzahl der durchgeführten Abtastungen bezeichnet und der Index  $k$  die einzelnen Abtastungen nummeriert.

$$i_k = \text{round}\left(\frac{i_{\max}(k-1)}{N-1}\right) \quad (4)$$

$$j_k = \text{round}\left(\frac{j_{\max}(k-1)}{N-1}\right) \quad (5)$$

**[0073]** Die Abtastungen werden überlagert. Bei der Überlagerung wird jede der Abtastungen um den jeweiligen Verschiebungswert  $j_k$  verschoben. Die Überlagerung und die Verschiebung der Abtastungen können mit Hilfe des Überlagerers **222** bzw. des Verschiebers **221** des Analysators **202** durchgeführt werden.

**[0074]** In Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen eindimensionale Abtastungen durchge-

führt werden, kann die Verschiebung einer Abtastung durchgeführt werden, indem der Wert  $f_i$  der interessierenden Größe, der an dem  $i$ -ten Punkt der Abtastung gemessen wurde, mit dem Wert  $f_{i+j_k}$  der interessierenden Größe, der an dem  $(i + j_k)$ -ten Punkt der Abtastung gemessen wurde, ersetzt wird. Die Abtastung wird für jeden Punkt der Abtastung durchgeführt. Für Werte von  $i + j_k$  kleiner als Null oder größer als  $n - 1$  kann der Wert  $f_{i,j}$  mit dem Wert Null ersetzt werden.

**[0075]** In Ausführungsformen, in denen zweidimensionale Abtastungen durchgeführt werden, kann die Verschiebung einer Abtastung durchgeführt werden, in dem der Wert  $f_{i,k}$  der interessierenden Größe, der an einem Punkt der Abtastung, der durch ein Indexpaar  $(i, j)$  charakterisiert wird, gemessen wurde, mit dem Wert  $f_{i+i_k, j+j_k}$  der interessierenden Größe ersetzt wird, der an einem Punkt der Abtastung, der durch ein Indexpaar  $(i + i_k, j + j_k)$  charakterisiert wird, gemessen wurde. Die Ersetzung wird für jeden Punkt der Abtastung durchgeführt. Für Werte von  $i + i_k$  oder  $j + j_k$  kleiner als Null oder größer als  $n - 1$  kann der Wert  $f_{i,j}$  mit dem Wert Null ersetzt werden.

**[0076]** Die Überlagerung der Abtastungen kann eine Addition von Messwerten der interessierenden Größe, die in den verschobenen Abtastungen enthalten sind, umfassen. In anderen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann die Überlagerung der Abtastungen eine Berechnung eines Mittelwerts von gemessenen Werten der interessierenden Größe, die in den einzelnen Abtastungen enthalten sind, umfassen. Die Überlagerung der Abtastungen kann Rauscheffekte, die durch die relativ kurze Erfassungszeit der einzelnen Abtastungen verursacht werden, reduzieren. Durch die Verschiebung von jeder der Abtastungen um den jeweiligen Verschiebungswert kann die Verschiebung der Halbleiterprobe **207** relativ zum Elektronenstrahl **204**, die durch die Drift verursacht wird, im Wesentlichen ausgeglichen werden, ohne dass es erforderlich wäre, eine Driftkorrektur durchzuführen, während die Halbleiterprobe **207** abgetastet wird.

**[0077]** Ein Verfahren zur Prüfung einer Halbleiterprobe gemäß der vorliegenden Erfindung kann zusätzlich eine Bestimmung von mindestens einer Komponente der Driftgeschwindigkeit der Halbleiterprobe **207** umfassen.

**[0078]** In Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen die Abtastungen eindimensionale Daten umfassen, kann eine Komponente der Driftgeschwindigkeit aus einem Wert  $j_{\max}$  des Index  $j$ , der die in Gleichung (1) definierte Kreuzkorrelation  $c_j$  zwischen einer ersten Abtastung und einer zweiten Abtastung maximiert, gemäß der folgenden Gleichung berechnet werden,

$$v = \frac{j_{\max} s}{t} \quad (6)$$

wobei  $s$  einen Abstand zwischen den einzelnen Punkten der Abtastungen bezeichnet und  $t$  eine Zeit ist, die zwischen der ersten Abtastung und der zweiten Abtastung verstrichen ist.

**[0079]** In Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen die Abtastungen zweidimensionale Daten umfassen, können eine erste Komponente  $v_1$  der Drift in Richtung der ersten Koordinatenachse **301** und eine zweite Komponente  $v_2$  der Drift in Richtung der zweiten Koordinatenachse **302** aus Werten  $i_{\max}, j_{\max}$  der Indizes  $i, j$ , die die in Gleichung (2) definierte Kreuzkorrelation  $c_{i,j}$  zwischen der ersten Abtastung und der zweiten Abtastung maximieren, berechnet werden,

$$v_1 = \frac{i_{\max} s}{t} \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{j_{\max} s}{t} \quad (8)$$

wobei  $s$  einen Abstand zwischen den Punkten der Abtastungen bezeichnet und  $t$  eine Zeit ist, die zwischen der ersten Abtastung und der zweiten Abtastung verstrichen ist.

**[0080]** Die Driftgeschwindigkeit kann verwendet werden, um Abstände, die aus den Abtastungen gemessen wurden, zu korrigieren. Die Korrektur der gemessenen Abstände kann eine Skalierung der gemessenen Abstände mit einem Faktor, der auf der bestimmten Driftgeschwindigkeit beruht, umfassen.

**[0081]** In Ausführungsformen, in denen die Abtastungen eindimensionale Daten umfassen, kann ein korrigier-

ter Abstand  $d_{\text{corr}}$ , der beispielsweise eine Dicke von einer der Materialschichten **209**, **210**, **211** umfassen kann, gemäß folgender Gleichung aus einem gemessenen Abstand  $d_{\text{measured}}$  berechnet werden.

$$d_{\text{corr}} = d_{\text{measured}} \left( 1 - \frac{\tau v}{s} \right) \quad (9)$$

**[0082]** Hier bezeichnet  $\tau$  das Zeitintervall zwischen aufeinanderfolgenden Messungen der interessierenden Größe bei der Abtastung.

**[0083]** In Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen zweidimensionale Abtastungen durchgeführt werden und die Punkte des Rasters **303** wie oben mit Bezug auf [Fig. 3](#) beschrieben zeilenweise abgetastet werden, können Abstände, die aus den Abtastungen in der Richtung der ersten Koordinatenachse **301** gemessen wurden, gemäß Gleichung (9) skaliert werden, wobei für den Wert  $v$  der Driftgeschwindigkeit die erste Komponente  $v_1$  der Driftgeschwindigkeit eingesetzt wird. Abstände, die aus den Abtastungen in der Richtung der zweiten Koordinatenachse **302** gemessen wurden, können gemäß der folgenden Gleichung skaliert werden,

$$d_{\text{corr}} = d_{\text{measured}} \left( 1 - \frac{n \tau v_2}{s} \right) \quad (10)$$

wobei  $n$  die Anzahl von Punkten pro Zeile bezeichnet.

**[0084]** In anderen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden die einzelnen Abtastungen einer Transformation unterzogen, die dafür ausgelegt ist, Verzerrungen der Abtastungen, die durch die Drift verursacht wurden, auszugleichen. In Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, in denen die Abtastungen eindimensionale Daten umfassen, kann die Transformation einer Skalierung der Abtastungen um einen Faktor  $(1 - \tau v/s)$  umfassen. Wenn die Drift in der Richtung der Abtastung verläuft, umfasst die Skalierung eine Stauung der Abtastung. Umgekehrt kann eine Drift in die entgegengesetzte Richtung durch eine Dehnung der Abtastungen berücksichtigt werden.

**[0085]** In Ausführungsformen, in denen die Abtastungen zweidimensionale Daten umfassen, können die Abtastungen einer affinen Transformation, die eine Skalierung der Zeilen um einen Faktor  $(1 - \tau v_1/s)$  und eine Skalierung der Spalten um einen Faktor  $(1 - n \tau v_2/s)$  umfasst, unterzogen werden.

**[0086]** In weiteren Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung können die überlagerten Abtastungen nach der Überlagerung der Abtastungen einer Transformation unterzogen werden, die dafür ausgelegt ist, die Drift zu korrigieren.

**[0087]** Die vorliegende Erfindung ist nicht auf Ausführungsformen beschränkt, bei denen keine mechanische Driftkorrektur durchgeführt wird. In anderen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann eine mechanische Driftkorrektur durchgeführt werden, während die mehreren Abtastungen aufgezeichnet werden. Vorteilhafterweise ermöglicht dies längere Erfassungszeiten bei den einzelnen Abtastungen, was dabei helfen kann, Ungenauigkeiten der Verschiebungswerte, die durch Rauschen in den einzelnen Abtastungen verursacht werden, zu verringern.

**[0088]** Weitere Abwandlungen und Varianten der vorliegenden Erfindung werden den Fachleuten anhand dieser Beschreibung offensichtlich. Dementsprechend ist diese Beschreibung als lediglich veranschaulichend auszulegen und dient dem Zweck, den Fachleuten die allgemeine Art, die vorliegende Erfindung auszuführen, zu lehren. Es sollte verstanden werden, dass die hier gezeigten und beschriebenen Formen der Erfindung als die gegenwärtig bevorzugten Ausführungsformen angesehen werden sollen.

### Patentansprüche

#### 1. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe mit:

Aufzeichnen mehrerer Abtastungen der Halbleiterprobe, wobei jede der Abtastungen eine räumlich aufgelöste Messung einer interessierenden Größe umfasst;  
Berechnen mindestens einer Kreuzkorrelation zwischen mindestens zwei der mehreren Abtastungen;  
Bestimmen eines jeweiligen Verschiebungswerts für jede der mehreren Abtastungen auf Grundlage der mindestens einer Kreuzkorrelation; und  
Überlagern der Abtastungen, wobei jede der Abtastungen bei der Überlagerung um den jeweiligen Verschie-

bungswert verschoben wird.

2. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 1, wobei das Aufzeichnen der Abtastungen ein Richten eines Elektronenstrahls auf die Halbleiterprobe umfasst.

3. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 2, wobei das Aufzeichnen der Abtastungen ein Bewegen des Elektronenstrahls und der Halbleiterprobe relativ zueinander umfasst.

4. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 1, wobei die Messung der interessierenden Größe ein Bestimmen von mindestens einem von einem Elektronenenergieverlustspektrum und einem Röntgenspektrum umfasst.

5. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 1, zusätzlich mit Bereitstellen der Halbleiterprobe, wobei das Bereitstellen der Halbleiterprobe ein Anfertigen einer Querschnittsprobe einer Halbleiterstruktur umfasst.

6. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 5, wobei das Anfertigen der Querschnittsprobe ein Schneiden der Halbleiterstruktur im Wesentlichen senkrecht zu einer Materialschicht, die in der Halbleiterstruktur bereitgestellt ist, umfasst.

7. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 1, mit Berechnen von Kreuzkorrelationen zwischen einer der mehreren Abtastungen und jeder anderen der mehreren Abtastungen.

8. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 1, bei dem das Bestimmen des jeweiligen Verschiebungswerts ein Bestimmen eines Maximums der mindestens einen Kreuzkorrelation umfasst.

9. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 1, bei dem das Bestimmen des jeweiligen Verschiebungswerts ein Bestimmen einer Größe, die für eine Driftgeschwindigkeit der Halbleiterprobe repräsentativ ist, umfasst.

10. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 1, bei dem die Überlagerung der Abtastungen mindestens eines von einer Addition, einer Berechnung eines Mittelwerts und einer Berechnung eines Medians von Messwerten der interessierenden Größe umfasst.

11. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe mit:  
Aufzeichnen mehrerer Abtastungen der Halbleiterprobe, wobei das Aufzeichnen von jeder der Abtastungen ein Abtasten der Halbleiterstruktur mit einem Elektronenstrahl und ein Messen einer Antwort der Halbleiterstruktur auf den Elektronenstrahl umfasst;  
Berechnen mindestens einer Kreuzkorrelation zwischen mindestens zwei der mehreren Abtastungen;  
Bestimmen eines jeweiligen Verschiebungswerts für jede der mehreren Abtastungen auf Grundlage der mindestens einen Kreuzkorrelation; und  
Addieren der Abtastungen, wobei jede der Abtastungen bei der Addition um den jeweiligen Verschiebungswert verschoben wird.

12. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 11, bei dem die Antwort der Halbleiterstruktur mindestens eines von einem Elektronenenergieverlustspektrum und einem Röntgenspektrum umfasst.

13. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 11, zusätzlich mit Bereitstellen der Halbleiterprobe, wobei das Bereitstellen der Halbleiterprobe ein Anfertigen einer Querschnittsprobe der Halbleiterstruktur umfasst.

14. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 13, bei dem das Anfertigen der Querschnittsprobe ein Schneiden der Halbleiterstruktur im Wesentlichen senkrecht zu einer Dickenrichtung einer Materialschicht, die in der Halbleiterstruktur bereitgestellt ist, umfasst.

15. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 11, mit Berechnen von Kreuzkorrelationen zwischen mindestens einer der mehreren Abtastungen und jeder anderen der mehreren Abtastungen.

16. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 11, bei dem das Bestimmen des jeweiligen Verschiebungswerts ein Bestimmen eines Maximums der mindestens einen Kreuzkorrelation umfasst.

17. Verfahren zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 11, bei dem die Bestimmung des jeweiligen Verschiebungswerts ein Bestimmen einer Größe, die für eine Driftgeschwindigkeit der Halbleiterprobe repräsentativ ist, umfasst.

18. Anlage zum Prüfen einer Halbleiterprobe mit:  
einem Elektronenmikroskop, das dafür ausgelegt ist, mehrere Abtastungen der Halbleiterprobe aufzuzeichnen, wobei jede der Abtastungen eine räumlich aufgelöste Messung einer interessierenden Größe umfasst;  
einem Analysator, der dafür ausgelegt ist, mindestens eine Kreuzkorrelation zwischen mindestens zwei der mehreren Abtastungen zu berechnen und für jede der mehreren Abtastungen auf Grundlage der mindestens einen Kreuzkorrelation einen jeweiligen Verschiebungswert zu bestimmen; und  
einem Überlagerer, der dafür ausgelegt ist, die Abtastungen zu überlagern, wobei jede der Abtastungen bei der Überlagerung um den jeweiligen Verschiebungswert verschoben wird.

19. Anlage zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 18, in der das Elektronenmikroskop mindestens eines von einem energieauflösenden Elektronendetektor und einem Röntgenspektrometer umfasst.

20. Anordnung zum Prüfen einer Halbleiterprobe nach Anspruch 18, in der der Analysator dafür ausgelegt ist, Kreuzkorrelationen zwischen mindestens einer der mehreren Abtastungen und jeder anderen der mehreren Abtastungen zu berechnen.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

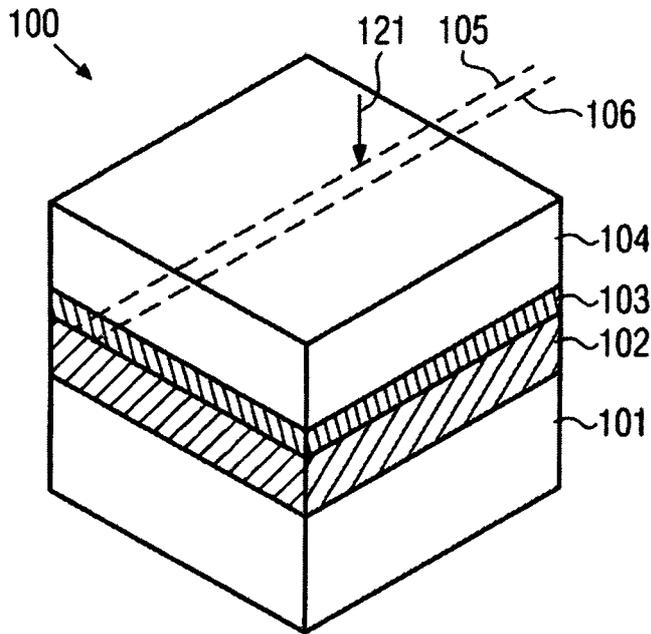


FIG. 1a  
(Stand der Technik)

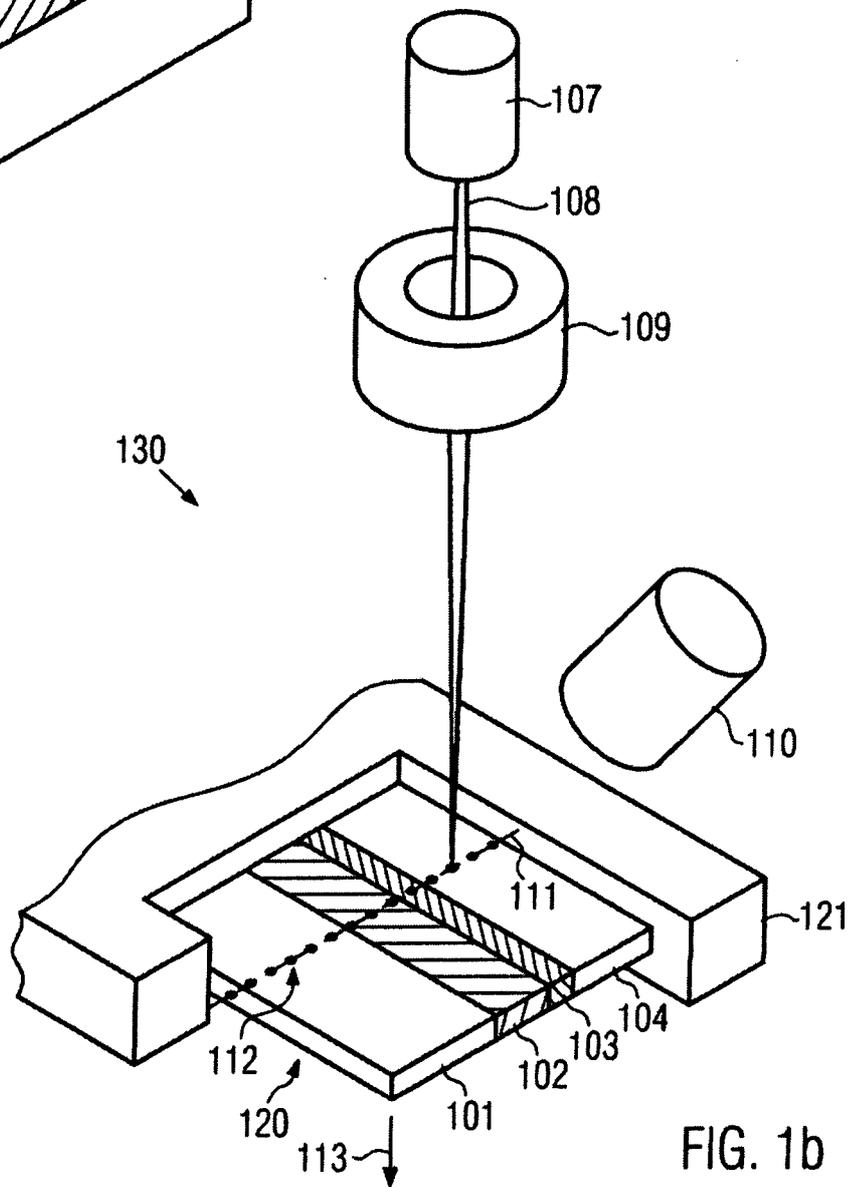


FIG. 1b  
(Stand der Technik)

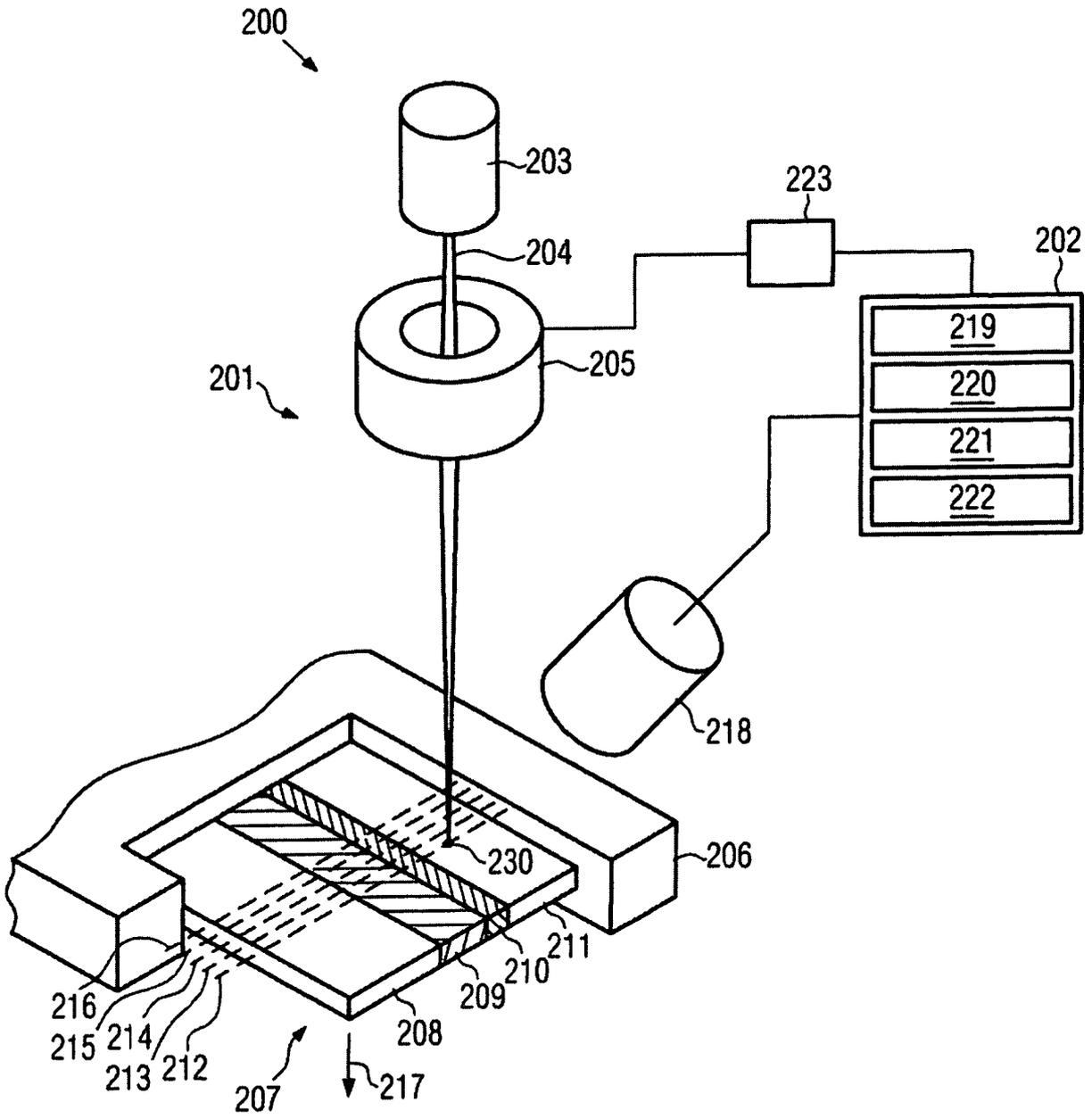


FIG. 2

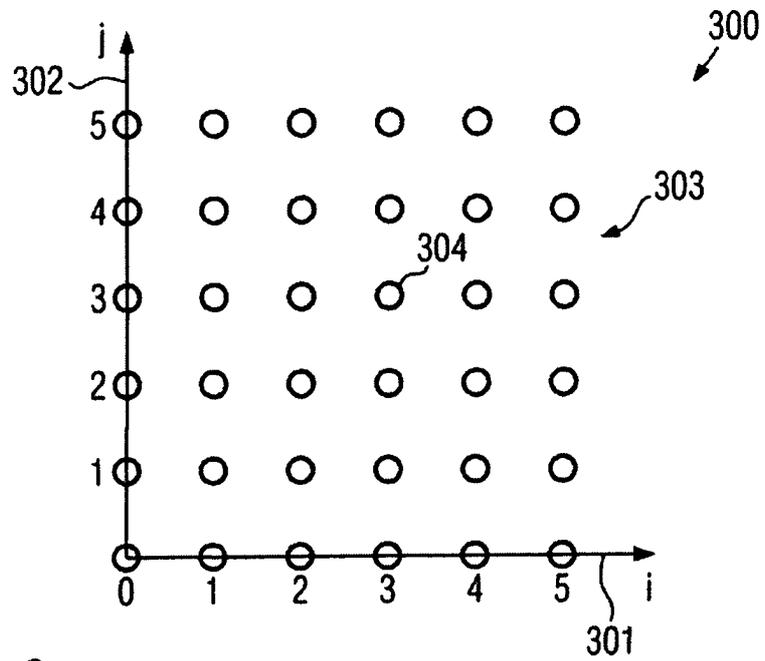


FIG. 3

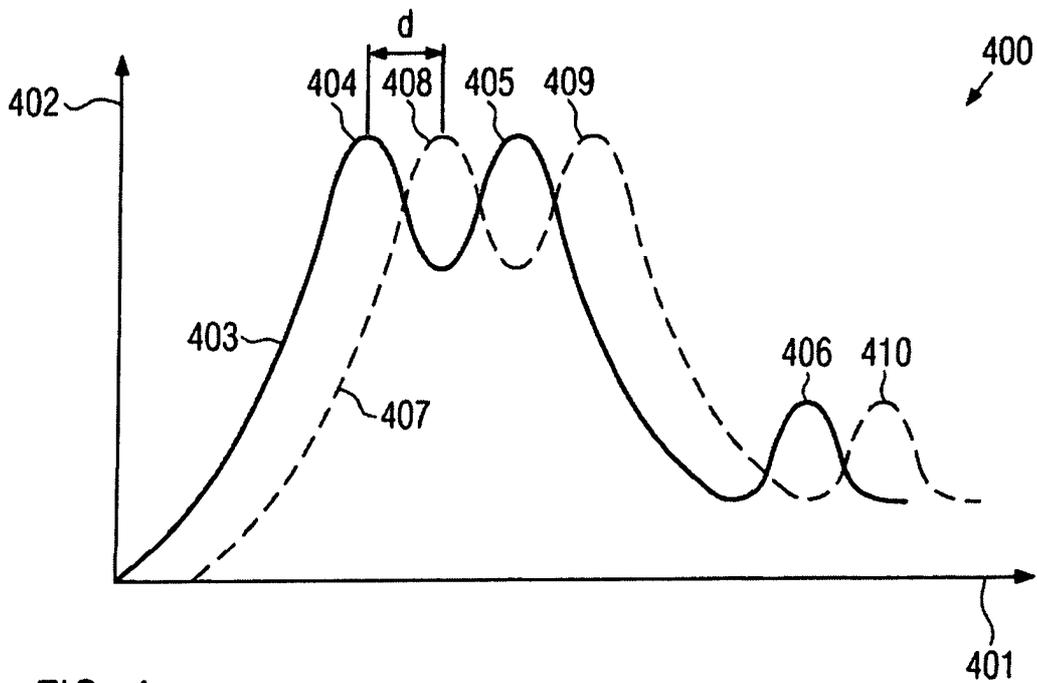


FIG. 4