(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 11 2018 005 533 B9** 2026.10.29

(12) # Berichtigung der Patentschrift

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2018 005 533.7**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2018/052507**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2019/067375**
(86) PCT-Anmeldetag: **25.09.2018**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **04.04.2019**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung in deutscher Übersetzung: **20.08.2020**
(45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: **03.09.2026**
(15) Korrekturinformation:
Beschreibung Gleichung (10) und Gleichung (17) Formel
(48) Veröffentlichungstag der Berichtigung: **29.10.2026**

(51) Int Cl.: ***H10P 74/00*** (2026.01)
G01D 21/02 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
62/564,119 **27.09.2017** **US**
16/138,813 **21.09.2018** **US**

(73) Patentinhaber:
KLA Corporation (n .d. Ges. d. Staates Delaware), Milpitas, CA, US

(74) Vertreter:
Reichert & Lindner Partnerschaft Patentanwälte, 93049 Regensburg, DE

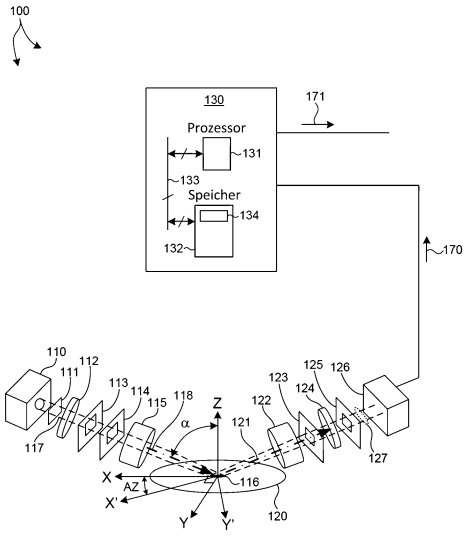
(72) Erfinder:
Atkins, Phillip R., San Jose, CA, US; Dai, Qi, San Jose, CA, US; Lee, Lie-Quan Rich, Fremont, CA, US

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	**9 470 639**	**B1**
US	**2016 / 0 282 282**	**A1**

(54) Bezeichnung: **DETEKTION UND MESSUNG DER DIMENSIONEN ASYMMETRISCHER STRUKTUREN**

(57) Hauptanspruch: Metrologiesystem (100), umfassend:
eine Beleuchtungsquelle (110), die konfiguriert ist, um eine Menge an optischer Breitbandstrahlung (117) zu erzeugen;
ein oder mehrere optische Elemente, die die Menge an optischer Breitbandstrahlung (117) von der Beleuchtungsquelle (110) zu einem Messpunkt (116) auf einer Oberfläche eines Halbleiterwafers (120) unter jedem von zwei oder mehr Azimutwinkeln (AZ) lenken;
ein Spektrometer (126), das konfiguriert ist, um eine Menge an Messlicht als Reaktion auf das Beleuchten des Halbleiterwafers (120) unter jedem der zwei oder mehr Azimutwinkel (AZ) von dem Halbleiterwafer (120) zu detektieren, und eine gemessene Spektralantwort einer interessierenden Struktur auf die Beleuchtung zu bestimmen, basierend auf jeder erfassten Menge an Messlicht, wobei jede gemessene Spektralantwort Spektren enthält, die mit mehreren Elementen einer Müller-Matrix assoziiert sind;
und ein Computersystem (130), das konfiguriert ist zum:
Schätzen von Werten eines oder mehrerer kritischer Dimensionsparameter, die die interessierende Struktur charakterisieren, basierend auf einer Anpassung einer modellierten Spektralantwort an die gemessenen Spektralantworten, die den zwei oder mehr Azimutwinkeln (AZ) zugeordnet sind;
Wählen eines oder mehrerer Teilbereiche von Wellenlängen mindestens eines Spektrums eines oder mehrerer nicht-diagonaler Elemente der Müller-Matrix, die mit jeder gemessenen Spektralantwort assoziiert sind;
Integrieren des mindestens einen Spektrums des einen oder der mehreren ...



Die oben angegebenen bibliografischen Daten entsprechen dem aktuellen Stand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Berichtigung.

Beschreibung

QUERVERWEIS AUF VERWANDTE ANMELDUNG

[0001] Die vorliegende Patentanmeldung beansprucht die Priorität unter 35 U.S.C. §119 aus der vorläufigen US-Patentanmeldung mit der Seriennummer 62 / 564,119 mit dem Titel „Detection And Measurement of Dimensions of Asymmetrie Structures“, eingereicht am 27. September 2017, sowie der US-Patentanmeldung 16 / 138,813, eingereicht am 21. September 2018, veröffentlicht als US 2019 / 0 094 711 A1.

TECHNISCHES GEBIET

[0002] Die beschriebenen Ausführungsformen betreffen Metrologiesysteme und -verfahren und insbesondere Verfahren und Systeme zur verbesserten Messung von Halbleiterstrukturen.

HINTERGRUNDINFORMATION

[0003] Halbleiterbauelemente, wie Logik- und Speicherbauelemente, werden typischerweise durch eine Sequenz von Verarbeitungsschritten hergestellt, die auf eine Probe angewendet werden. Die verschiedenen Merkmale und mehreren Strukturebenen der Halbleiterbauelemente werden durch diese Verarbeitungsschritte gebildet.

[0004] Beispielsweise ist Lithographie einer von mehreren Halbleiterfertigungsprozessen, der das Erzeugen eines Musters auf einem Halbleiterwafer umfasst. Zusätzliche Beispiele für Halbleiterfertigungsprozesse umfassen, ohne aber darauf beschränkt zu sein, chemisch-mechanisches Polieren, Ätzen, Abscheiden und Ionenimplantation. Auf einem einzelnen Halbleiterwafer können mehrere Halbleiterbauelemente hergestellt und dann in einzelne Halbleiterbauelemente getrennt werden.

[0005] Metrologieprozesse werden bei verschiedenen Schritten während eines Halbleiterfertigungsprozesses verwendet, um Defekte auf Wafern zu erkennen um eine höhere Ausbeute zu fördern. Optische Metrologie-Techniken bieten das Potenzial für einen hohen Durchsatz ohne das Risiko einer Probenzerstörung. Eine Reihe von auf optischer Metrologie basierenden Techniken, einschließlich Scatterometrie- und Reflektometrie-Implementierungen und zugehöriger Analysealgorithmen, werden üblicherweise verwendet, um kritische Dimensionen, Schichtdicken, Zusammensetzung, Overlay und andere Parameter von Strukturen im Nanomaßstab zu charakterisieren.

[0006] Viele optische Metrologiesysteme messen physikalische Eigenschaften einer Probe indirekt. In den meisten Fällen können die gemessenen optischen Signale nicht verwendet werden, um die interessierenden physikalischen Eigenschaften direkt zu bestimmen.

[0007] Traditionell besteht der Messprozess aus der Formulierung eines Metrologiemodells, das versucht, die gemessenen optischen Signale auf der Basis eines Modells der Interaktion des Messziels mit dem jeweiligen Messsystem vorherzusagen. Das Messmodell beinhaltet eine Parametrisierung der Struktur hinsichtlich der interessierenden physikalischen Eigenschaften des Messziels (z.B. Schichtdicken, kritische Abmessungen, Brechungsindizes, Gitterabstand, etc.). Darüber hinaus beinhaltet das Messmodell eine Parametrisierung des Messwerkzeugs selbst (z.B. Wellenlängen, Einfallswinkel, Polarisationswinkel, etc.). Beispielsweise sind Maschinenparameter Parameter, die zur Charakterisierung des Messwerkzeugs selbst dienen. Beispielhafte Maschinenparameter sind Einfallswinkel (AOI), Analysatorwinkel (A_0), Polarisatorwinkel (P_0), Beleuchtungswellenlänge, numerische Apertur (NA), etc. Probenparameter sind Parameter, die zur Charakterisierung der geometrischen Eigenschaften und Materialeigenschaften der Probe dienen. Für eine Dünnschichtprobe sind beispielhafte Probenparameter der Brechungsindex, der Tensor der dielektrischen Funktion, nominale Schichtdicke aller Schichten, Schichtfolge, etc.

[0008] Für Messzwecke werden die Maschinenparameter als bekannte, feste Parameter und die Probenparameter oder eine Teilmenge von Probenparametern als unbekannte, freie Parameter behandelt. Die freien Parameter werden durch einen Anpassungsprozess (z.B. Regression, Bibliotheksabgleich usw.) ermittelt, der die beste Anpassung zwischen den theoretisch vorhergesagten, aus dem Messmodell abgeleiteten Spektraldaten und den gemessenen Spektraldaten herstellt. Die unbekannten Probenparameter werden variiert und die modellierten Spektren werden iterativ berechnet und mit den gemessenen Spektraldaten verglichen, bis ein Satz von Probenparameterwerten ermittelt ist, der eine enge Übereinstimmung zwischen den modellierten und gemessenen Spektren ergibt.

[0009] Dieser traditionelle modellbasierte Messansatz wurde für die Schätzung von Parametern, die asymmetrische Strukturmerkmale und symmetrische Strukturmerkmale beschreiben, angewandt. In einigen Beispielen wird die Schätzung von Parametern, die asymmetrische Strukturmerkmale beschreiben, durch die stärkere Gewichtung des Abgleichs von modellierten und gemessenen Spektren, die mit spezifischen nichtdiagonalen Müller-Elementen assoziiert sind, verbessert. Dieser Ansatz wird im US Patent US 8 525 993 B2 von Rabello et al. näher beschrieben.

[0010] Leider sind in vielen Fällen einige interessierende Parameter, insbesondere Parameter, die asymmetrische Strukturmerkmale beschreiben, nur schwach mit der gemessenen Spektralantwort korreliert. In diesen Fällen führen Änderungen der Parameter, die ein asymmetrisches Strukturmerkmal beschreiben, nicht zu signifikanten Änderungen der resultierenden Spektren. Dies erhöht die Unsicherheit der regressierten Werte dieser Parameter sowohl durch Messrauschen als auch durch Fehler im Messmodell.

[0011] Darüber hinaus beinhalten spektrale Anpassungsmethoden typischerweise die Erzielung der besten Anpassung für mehrere Modellparameter. Mehrere Modellparameter werden variiert, während man nach dem Parametersatz sucht, der die beste Übereinstimmung zwischen den simulierten Spektren und den gemessenen Spektren liefert. Dadurch wird die Dimension des Suchraums für die beste Anpassung vergrößert und oft werden Parameter, die schwach mit der gemessenen Spektralantwort korreliert sind, abgeschwächt, insbesondere Parameter, die asymmetrische Strukturmerkmale beschreiben.

[0012] Des Weiteren basieren modellgestützte Messungen der interessierenden Parameter häufig auf der Messung der interessierenden Struktur von einer einzigen Einfallsebene aus. Liegt das asymmetrische Merkmal entlang der Einfallsebene, können die resultierenden spektralen Signale (z.B. ein oder mehrere nicht-diagonale Müller-Signale) unempfindlich gegen die Asymmetrie sein.

[0013] Infolgedessen ist es oft nicht möglich, Parameter, die asymmetrische Strukturmerkmale beschreiben, zuverlässig zu bestimmen, indem modellierte Spektren mit gemessenen Spektren unter Verwendung traditioneller Techniken abgeglichen werden.

[0014] Die US 9 470 639 B1 offenbart Vorrichtungen und Verfahren für spektroskopische Breitbandmetrologie an periodischen Strukturen. Dabei wird ein Messmodell verwendet, das von einer Reihe von Systemparametern abhängt. Es wird eine Teilmenge der verfügbaren Werte der Reihe von Systemparametern ausgewählt, so dass Anomalien bei der Messung der periodischen Strukturen reduziert werden können. Basierend auf der ausgewählten Teilmenge wird ein Messrezept erstellt.

[0015] Die US 2016 / 0 282 282 A1 beschreibt ein Lithografiesystem zur Herstellung periodischer Strukturen, wobei ein EUV-Lichtstrahl auf ein Substrat fokussiert wird. Vom Substrat reflektierte Strahlung wird spektralzerlegt, es wird auch ein Referenzspektrum erfasst; weitere Spektren können darüber hinaus erfasst werden. Aus den erfassten Spektren werden Eigenschaften der Struktur berechnet, etwa kritische Dimension und Overlay.

[0016] Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die fortschreitende Verkleinerung und die zunehmende Tiefe der Strukturmerkmale schwierige Anforderungen an optische Metrologiesysteme stellen. Optische Metrologiesysteme müssen hohe Präzisions- und Genauigkeitsanforderungen für immer komplexere Ziele bei hohem Durchsatz erfüllen, um kosteneffizient zu bleiben. Viele interessierende Strukturmerkmale weisen eine Asymmetrie auf. Insbesondere bei der Herstellung von fortschrittlichen Speicherstrukturen gibt es tiefe Löcher, die häufig eine Asymmetrie aufweisen. In diesem Zusammenhang hat sich die zuverlässige Messung von asymmetrischen Strukturmerkmalen als wichtiger Faktor für die Effektivität optischer Metrologiesysteme herausgestellt. Daher sind verbesserte Metrologiesysteme und -verfahren zur Überwindung der mit der Messung asymmetrischer Strukturmerkmale verbundenen Einschränkungen erwünscht.

ÜBERSICHT

[0017] Hier werden Verfahren und Systeme zur Durchführung spektroskopischer Messungen von asymmetrischen Merkmalen von Halbleiterstrukturen vorgestellt. Die gemessenen Spektren werden verarbeitet, um die Messung von symmetriebrechenden Defekten, die bei der Herstellung von fortschrittlichen Halbleiterstrukturen entstehen, zu betonen.

[0018] In einem Aspekt wird ein Wert eines oder mehrerer geometrischer Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur beschreiben, auf der Grundlage von Werten eines oder mehrerer kriti-

scher Dimensionsparameter, die durch spektrale Anpassung zuverlässig geschätzt werden, und einer oder mehrerer Spektralantwort-Metriken bestimmt. Spektralantwort-Metriken sind skalare Werte, die aus Spektren abgeleitet werden, die mit einem oder mehreren nicht-diagonalen Müller-Matrixelementen assoziiert sind. Im Allgemeinen hängen die Spektralantwort-Metriken von dem asymmetrischen Merkmal und anderen kritischen Dimensionen ab, die durch spektrale Anpassung zuverlässig bestimmt werden.

[0019] In einigen Ausführungsformen setzt ein trainiertes lineares Modell einen Asymmetrieparameter in Beziehung zu einer oder mehreren Spektralantwort-Metriken und einer oder mehreren kritischen Dimensionen, die zuverlässig durch spektrale Anpassung bestimmt werden. Ein Schätzwert des Asymmetrieparameters wird durch Regression des trainierten Modells bestimmt.

[0020] In einigen Ausführungsformen bildet ein trainiertes Neuronales-Netz-Modell die gemessenen Spektralantwort-Metriken und kritischen Dimensionsparameter auf den Wert des Asymmetrieparameters ab.

[0021] In einigen Ausführungsformen wird eine Kombination von Modellen, wie z.B. ein trainiertes lineares Modell und ein trainiertes Neuronales-Netz-Modell, verwendet, um den Wert eines oder mehrerer Asymmetrieparameter zu schätzen.

[0022] In einem weiteren Aspekt werden spektrale Messungen einer interessierenden Struktur bei zwei oder mehr unterschiedlichen Azimutwinkeln durchgeführt. Die resultierenden Messungen werden zur Schätzung eines oder mehrerer geometrischer Parameter verwendet, die ein asymmetrisches Merkmal der Struktur charakterisieren. In einer bevorzugten Ausführung werden Spektralmessungen bei zwei zueinander orthogonalen Azimutwinkeln durchgeführt. Die Kombination von mehreren orthogonalen Messungen ermöglicht eine präzise Schätzung geometrischer Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur und die Achse, entlang der das asymmetrische Merkmal liegt, charakterisieren.

[0023] In einem weiteren Aspekt werden Spektralantwort-Metriken durch Integration gemessener Spektren bestimmt, die mit einem oder mehreren nicht-diagonalen Elementen der Müller-Matrix assoziiert sind. Eine Spektralantwort-Metrik ist ein skalares Maß für die Spektralantwort aufgrund von Asymmetrie. Die Integration über die gemessenen Spektren reduziert das Rauschen und erhöht die Signalstärke, die mit dem Müller-Matrixelement oder einer Kombination von Müller-Matrixelementen assoziiert ist.

[0024] In einem weiteren Aspekt werden ein oder mehrere Teilbereiche von Wellenlängen ausgewählt, die mit einem oder mehreren nicht-diagonalen Elementen der Müller-Matrix assoziiert sind. Darüber hinaus werden die Spektralantwort-Metriken durch Integration der Spektren, die mit dem einen oder den mehreren nicht-diagonalen Elementen der Müller-Matrix assoziiert sind, über die ausgewählten Teilbereiche der Wellenlängen bestimmt. In einigen Beispielen erhöht die Bestimmung einer Spektralantwort-Metrik auf der Grundlage ausgewählter Teile des verfügbaren gemessenen Spektrums die Empfindlichkeit der Spektralantwort-Metrik auf den/die Parameter, der/die das Asymmetriemerkmal beschreibt/beschreiben. Dies wird erreicht, indem Wellenlängen mit der größten Empfindlichkeit für das asymmetrische Merkmal hervorgehoben werden und die Auswirkungen von Zufallsrauschen durch Integration verringert werden.

[0025] In einem weiteren Aspekt werden verschiedene Spektralantwort-Metriken unterschiedlich gewichtet, z.B. durch Skalierung jeder Spektralantwort-Metrik mit einer anderen Konstante. Auf diese Weise werden Spektralantwort-Metriken, die empfindlicher auf bestimmte Asymmetrieparameter sind, stärker gewichtet als Spektralantwort-Metriken, die weniger empfindlich auf die bestimmten Asymmetrieparameter reagieren.

[0026] In einem weiteren Aspekt werden die hier beschriebenen Messergebnisse als aktives Feedback an ein Fertigungswerkzeug (z.B. Lithographiewerkzeug, Ätzwerkzeug, Abscheidewerkzeug, etc.) bereitgestellt.

[0027] Das Vorstehende ist eine Übersicht und enthält daher notwendigerweise Vereinfachungen, Verallgemeinerungen und Auslassungen von Details; folglich werden Fachleute erkennen, dass die Übersicht nur veranschaulichend ist und in keiner Weise einschränkend wirkt. Andere Aspekte, erfinderische Merkmale und Vorteile der hier beschriebenen Vorrichtungen und/oder Verfahren werden in der hierin enthaltenen, nicht einschränkenden, detaillierten Beschreibung deutlich.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Fig. 1 zeigt ein Metrologiesystem 100 zur Durchführung spektroskopischer Messungen von asymmetrischen Strukturmerkmalen in einer Ausführungsform.

Fig. 2 zeigt eine Draufsicht auf den in **Fig.** 1 dargestellten Wafer 120 mit einem Schräglochmerkmal 150.

Fig. 3 zeigt eine Querschnittsansicht des in **Fig.** 2 dargestellten Schnitts A.

Fig. 4 zeigt eine Querschnittsansicht des in **Fig.** 2 dargestellten Schnitts A, einschließlich mehrerer Lochabschnitte.

Fig. 5 zeigt eine Darstellung einer Spektralantwort 153, die mit der Summe der Müller-Matrixelemente M_{02} und M_{20} assoziiert ist.

Fig. 6 zeigt eine Darstellung der simulierten Ergebnisse, die einen Vergleich zwischen tatsächlichen Neigungswinkeln, die mit der Simulation assoziiert sind, und regressierten Werten der Neigungswinkel, die durch ein hier beschriebenes trainiertes lineares Modell geschätzt werden, darstellt.

Fig. 7 zeigt eine Darstellung simulierter Ergebnisse, die einen Vergleich zwischen den tatsächlichen Orientierungswinkeln, die mit der in **Fig.** 6 dargestellten Simulation verbunden sind, und den regressierten Werten der Orientierungswinkel, die durch ein hierin beschriebenes trainiertes lineares Modell geschätzt wurden, veranschaulicht.

Fig. 8 zeigt eine Darstellung der simulierten Ergebnisse, die einen Vergleich zwischen den tatsächlichen Neigungswinkeln und den regressierten Werten der durch eine Kombination eines Neuronalen-Netz-Modells und eines trainierten linearen Modells geschätzten Neigungswinkel veranschaulicht.

Fig. 9 zeigt eine Darstellung der simulierten Ergebnisse, die einen Vergleich zwischen den tatsächlichen Orientierungswinkeln und den regressierten Werten der Orientierungswinkel, die durch eine Kombination eines Neuronalen-Netz-Modells und eines trainierten linearen Modells geschätzt wurden, darstellt.

Fig. 10 zeigt eine Darstellung simulierter Ergebnisse, die einen Vergleich zwischen den tatsächlichen Neigungswinkeln und den regressierten Werten der durch ein trainiertes Neuronales-Netz-Modell geschätzten Neigungswinkel veranschaulicht.

Fig. 11 zeigt eine beispielhafte interessierende NAND-Struktur mit hohem Aspektverhältnis.

Fig. 12 zeigt ein Verfahren 200 zur Durchführung spektroskopischer Messungen von asymmetrischen Strukturmerkmalen in mindestens einem neuartigen Aspekt.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

[0028] Im Folgenden wird im Einzelnen auf Hintergrundbeispiele und einige Ausführungsformen der Erfindung Bezug genommen, die in den beiliegenden Zeichnungen beispielhaft dargestellt sind.

[0029] Hier werden Verfahren und Systeme zur Durchführung spektroskopischer Messungen von asymmetrischen Merkmalen von Halbleiterstrukturen vorgestellt. Gemessene Spektren werden verarbeitet, um die Messung von symmetriebrechenden Defekten, die bei der Herstellung von fortgeschrittenen Halbleiterstrukturen entstehen, hervorzuheben. Zum Beispiel hat sich die Steuerung des Ätzprozesses von tiefen Löchern als eine kritische Prozessanforderung bei der Herstellung von Speicherstrukturen mit hohem Aspektverhältnis, z.B. dreidimensionaler NAND-Speicher, herausgestellt. Messungen einer interessierenden Struktur werden bei zwei oder mehr Azimutwinkeln durchgeführt, um die Empfindlichkeit gegenüber einem beliebig orientierten asymmetrischen Merkmal zu gewährleisten. Spektren, die mit einem oder mehreren nicht-diagonalen Müller-Matrix-Elementen assoziiert sind, die auf Asymmetrie empfindlich sind, werden für die weitere Analyse ausgewählt. Die ausgewählten Spektren werden weiter in einen oder mehrere Teilbereiche der Wellenlänge unterteilt, die zur Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses ausgewählt werden. Die ausgewählten Spektren werden über die ausgewählten Wellenlängen-Teilbereiche integriert, um Spektralantwort-Metriken zu erzeugen, die mit den nicht-diagonalen Müller-Matrixelementen assoziiert sind. Werte von Parametern, die die Geometrie eines asymmetrischen Merkmals charakterisieren, werden auf der Grundlage der Spektralantwort-Metriken und kritischer Dimensionsparameter bestimmt, die mit traditionellen, auf spektraler Anpassung basierenden Techniken gemessen werden. Diese Merkmale, einzeln oder in Kombination, ermöglichen Messungen von asymmetrischen Merkmalen von Strukturen mit hohem Aspektverhältnis (z.B. Strukturen mit einer Tiefe von einem Mikrometer oder mehr) mit hohem Durchsatz, hoher Präzision und hoher Genauigkeit.

[0030] **Fig.** 1 zeigt ein beispielhaftes Metrologiesystem 100 zur Messung asymmetrischer Strukturmerkmale von Halbleiterstrukturen. In einigen Beispielen enthalten die Halbleiterstrukturen mindestens eine Struktur mit hohem Aspektverhältnis (HAR). Wie in **Fig.** 1 dargestellt, ist das Metrologiesystem 100 als breitbandiges spektroskopisches Ellipsometer konfiguriert. Im Allgemeinen kann das Metrologiesystem 100 jedoch als

spektroskopisches Reflektometer, Scatterometer, Ellipsometer oder eine beliebige Kombination davon konfiguriert werden.

[0031] Das Metrologiesystem 100 umfasst eine Beleuchtungsquelle 110, die einen Strahl von Beleuchtungslicht 117 erzeugt, der auf einen Wafer 120 auftrifft. In einigen Ausführungsformen ist die Beleuchtungsquelle 110 eine Breitband-Beleuchtungsquelle, die Beleuchtungslicht im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Spektrum ausstrahlt. In einer Ausführung ist die Beleuchtungsquelle 110 eine lasergestützte Plasma-Lichtquelle (LSP) (auch bekannt als lasergetriebene Plasmaquelle). Der Pumplaser der LSP-Lichtquelle kann Dauerstrich oder gepulst sein. Eine lasergetriebene Plasmaquelle kann über den gesamten Wellenlängenbereich von 150 Nanometer bis 2000 Nanometer deutlich mehr Photonen erzeugen als eine Xenon-Lampe. Die Beleuchtungsquelle 110 kann eine einzelne Lichtquelle oder eine Kombination aus mehreren breitbandigen Lichtquellen oder Lichtquellen diskreter Wellenlänge sein. Das von der Beleuchtungsquelle 110 erzeugte Licht umfasst ein kontinuierliches Spektrum oder Teile eines kontinuierlichen Spektrums von Ultraviolett bis Infrarot (z.B. Vakuum-Ultraviolett bis mittleres Infrarot). Im Allgemeinen kann die Beleuchtungslichtquelle 110 eine Super-Kontinuum-Laserquelle, eine Infrarot-Helium-Neon-Laserquelle, eine Bogenlampe oder jede andere geeignete Lichtquelle umfassen.

[0032] In einem weiteren Aspekt ist die Menge an Beleuchtungslicht breitbandiges Beleuchtungslicht, das einen Wellenlängenbereich von mindestens 500 Nanometern umfasst. In einem Beispiel umfasst das breitbandige Beleuchtungslicht Wellenlängen unter 250 Nanometer und Wellenlängen über 750 Nanometer. Im Allgemeinen umfasst das breitbandige Beleuchtungslicht Wellenlängen zwischen 120 Nanometern und 3.000 Nanometern. In einigen Ausführungsformen kann breitbandiges Beleuchtungslicht mit Wellenlängen über 3.000 Nanometer eingesetzt werden.

[0033] Wie in **Fig.** 1 dargestellt, enthält das Metrologie-System 100 ein Beleuchtungs-Subsystem, das so konfiguriert ist, dass es Beleuchtungslicht 117 auf eine oder mehrere auf dem Wafer 120 gebildete Strukturen richtet. Das Beleuchtungssubsystem umfasst die Lichtquelle 110, einen oder mehrere optische Filter 111, die Polarisationskomponente 112, die Feldblende 113, die Aperturblende 114 und die Beleuchtungsoptik 115. Der eine oder die mehreren optischen Filter 111 werden verwendet, um den Lichtpegel, die Spektralleistung oder beides vom Beleuchtungs-Subsystem zu steuern. In einigen Beispielen werden ein oder mehrere Mehrzonenfilter als optische Filter 111 verwendet. Die Polarisationskomponente 112 erzeugt den gewünschten Polarisationszustand am Ausgang des Beleuchtungssubsystems. In einigen Ausführungsformen ist die polarisierende Komponente ein Polarisator, ein Kompensator oder beides und kann jede geeignete, kommerziell erhältliche polarisierende Komponente enthalten. Die polarisierende Komponente kann fest, in verschiedene feste Positionen drehbar oder kontinuierlich rotierend sein. Obwohl das in **Fig.** 1 dargestellte Beleuchtungs-Subsystem eine polarisierende Komponente enthält, kann das Beleuchtungs-Subsystem mehr als eine polarisierende Komponente enthalten. Die Feldblende 113 steuert das Sichtfeld (FOV) des Beleuchtungs-Subsystems und kann jede geeignete, im Handel erhältliche Feldblende enthalten. Die Aperturblende 114 steuert die numerische Apertur (NA) des Beleuchtungs-Subsystems und kann jede geeignete, handelsübliche Aperturblende enthalten. Licht von der Beleuchtungsquelle 110 wird durch die Beleuchtungsoptik 115 geleitet, um auf eine oder mehrere Strukturen (nicht in **Fig.** 1 dargestellt) auf dem Wafer 120 fokussiert zu werden. Das Beleuchtungs-Subsystem kann jede Art und Anordnung eines oder mehrerer optischer Filter 111, von Polarisationskomponente 112, Feldblende 113, Aperturblende 114 und Beleuchtungsoptik 115 umfassen, die in der spektroskopischen Ellipsometrie, Reflektometrie und Scatterometrie bekannt sind.

[0034] Wie in **Fig.** 1 dargestellt, durchläuft der Strahl des Beleuchtungslichts 117 bei der Ausbreitung von der Beleuchtungsquelle 110 zum Wafer 120 den/die optischen Filter 111, die Polarisationskomponente 112, die Feldblende 113, die Aperturblende 114 und die Beleuchtungsoptik 115. Der Strahl 117 beleuchtet einen Teil des Wafers 120 über einen Messfleck 116.

[0035] Das Metrologiesystem 100 umfasst auch ein Sammeloptik-Subsystem, das so konfiguriert ist, dass es durch die Wechselwirkung zwischen der einen oder den mehreren Strukturen und dem einfallenden Beleuchtungsstrahl 117 erzeugtes Licht sammelt. Ein Strahl aus gesammeltem Licht 127 wird vom Messpunkt 116 durch die Sammeloptik 122 gesammelt. Das gesammelte Licht 127 durchläuft die Sammelblende 123, das polarisierende Element 124 und die Feldblende 125 des Sammeloptik-Subsystems.

[0036] Die Sammeloptik 122 enthält beliebige geeignete optische Elemente, um Licht von der einen oder den mehreren auf dem Wafer 120 gebildeten Strukturen zu sammeln. Die Sammelblende 123 steuert die NA des Sammeloptik-Subsystems. Das polarisierende Element 124 analysiert den gewünschten Polarisationszustand. Das polarisierende Element 124 ist ein Polarisator oder ein Kompensator. Das polarisierende Element

124 kann fest, in verschiedene feste Positionen drehbar oder kontinuierlich drehbar sein. Obwohl das in **Fig.** 1 dargestellte Sammel-Subsystem ein polarisierendes Element enthält, kann das Sammel-Subsystem mehr als ein polarisierendes Element enthalten. Die Sammel-Feldblende 125 steuert das Sichtfeld des Sammel-Subsystems. Das Sammel-Subsystem erfasst Licht vom Wafer 120 und leitet das Licht durch die Sammeloptik 122 und das polarisierende Element 124, um es auf die Sammel-Feldblende 125 zu fokussieren. In einigen Ausführungsformen wird die Sammel-Feldblende 125 als Spektrometerspalt für die Spektrometer des Detektions-Subsystems verwendet. Die Sammel-Feldblende 125 kann jedoch an oder in der Nähe eines Spektrometerspaltes der Spektrometer des Detektions-Subsystems angeordnet sein.

[0037] Das Sammel-Subsystem kann jede Art und Anordnung von Sammeloptik 122, Aperturblende 123, polarisierendem Element 124 und Feldblende 125 umfassen, die in der spektroskopischen Ellipsometrie, Reflektometrie und Scatterometrie bekannt sind.

[0038] In der in **Fig.** 1 dargestellten Ausführungsform lenkt das Sammeloptik-Subsystem das Licht zum Spektrometer 126. Das Spektrometer 126 erzeugt eine Ausgabe in Abhängigkeit von dem Licht, das von der einen oder den mehreren Strukturen gesammelt wird, die durch das Beleuchtungs-Subsystem beleuchtet werden. In einem Beispiel sind die Detektoren des Spektrometers 126 Charge-Coupled-Devices (CCD), die auf ultraviolettes und sichtbares Licht (z.B. Licht mit Wellenlängen zwischen 190 Nanometern und 860 Nanometern) empfindlich sind. In anderen Beispielen sind einer oder mehrere der Detektoren des Spektrometers 126 ein Photodetektor-Array (PDA), das auf infrarotes Licht (z.B. Licht mit Wellenlängen zwischen 950 Nanometern und 2500 Nanometern) empfindlich ist. Im Allgemeinen können jedoch auch andere Detektortechnologien in Betracht gezogen werden (z. B. ein positionsempfindlicher Detektor (PSD), ein Infrarot-Detektor, ein Photovoltaik-Detektor usw.). Jeder Detektor wandelt das einfallende Licht in elektrische Signale um, die die spektrale Intensität des einfallenden Lichts anzeigen. Im Allgemeinen erzeugt das Spektrometer 126 Ausgangssignale 170, die die Spektralantwort der zu messenden Struktur auf das Beleuchtungslicht anzeigen.

[0039] Das Metrologiesystem 100 umfasst auch das Computersystem 130, das so konfiguriert ist, dass es die Signale 170 empfängt, die die gemessene Spektralantwort der interessierenden Struktur anzeigen, sowie Werte eines oder mehrerer geometrischer Parameter 171, die ein asymmetrisches Merkmal der gemessenen Struktur(en) beschreiben, auf der Grundlage der gemessenen Spektralantwort schätzt.

[0040] Im Allgemeinen umfasst die gemessene Spektralantwort der interessierenden Struktur Spektren, die mit Elementen einer Müller-Matrix-Formulierung assoziiert sind, die zur Charakterisierung der gemessenen Antwort verwendet wird. Der Stokes-Müller-Formalismus beschreibt die Antwort eines Mediums auf Anregung durch polarisiertes Licht. Gleichung (1) zeigt eine Müller-Matrix, M, die die Beziehung zwischen dem einfallenden Strahl, charakterisiert durch den Stokes-Vektor, S_I, und dem reflektierten Strahl, charakterisiert durch den Stokes-Vektor, S_R, beschreibt.

$$S_R = MS_I \qquad (1)$$

[0041] Im Allgemeinen repräsentiert der Stokes-Vektor den Polarisationszustand einer Lichtwelle. Als Beispiel zeigt Gleichung (2) einen Stokes-Vektor, S, wobei I die Gesamtintensität ist, I_0 die Intensität, die von einem linearen Polarisator durchgelassen wird, der unter einem Winkel von null Grad bezüglich der P-Polarisationsachse in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ausgerichtet ist, I_{45} die Intensität, die von einem linearen Polarisator durchgelassen wird, der unter einem Winkel von 45 Grad bezüglich der P-Polarisationsachse in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ausgerichtet ist, I_{-45} die Intensität, die von einem linearen Polarisator durchgelassen wird, der in einem Winkel von -45 Grad bezüglich der P-Polarisationsachse in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ausgerichtet ist, I_R die Intensität, die von einem rechtszirkularen Polarisator durchgelassen wird, und I_L die Intensität, die von einem linkszirkularen Polarisator durchgelassen wird. Die Größen in Klammern sind räumlich und zeitlich gemittelt.

$$S = \begin{bmatrix} I \\ \langle I_0 - I_{90} \rangle \\ \langle I_{45} - I_{-45} \rangle \\ \langle I_R - I_L \rangle \end{bmatrix} \qquad (2)$$

[0042] Für eine bestimmte spektroskopische Messung werden die Beleuchtungsintensität und die Polarisationseigenschaften des einfallenden Strahls programmiert. So sind einige oder alle Elemente des Stokes-Vektors, die mit dem einfallenden Strahl, S_I, assoziiert sind, apriori bekannt. Außerdem werden die Intensität

und die Polarisationseigenschaften des reflektierten Strahls mit dem Spektrometer (d.h. Spektrometer 126) gemessen. So werden einige oder alle Elemente des Stokes-Vektors, die mit dem reflektierten Strahl, S_R, assoziiert sind, gemessen. Als Ergebnis werden einige oder alle Müller-Matrixelemente aufgrund der bekannten und gemessenen Eigenschaften des einfallenden bzw. reflektierten Lichts bestimmt. Gleichung [3] veranschaulicht die Elemente der Müller-Matrix und ihre Beziehung zu den bekannten und gemessenen Elementen der Stokes-Vektoren S_I beziehungsweise S_R.

$$S_R = \begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} S_I \qquad (3)$$

[0043] Einige oder alle Elemente der Müller-Matrix können direkt aus den bekannten Elementen der Stokes-Vektoren, S_I und S_R, auf der Grundlage der in Gleichung [3] dargestellten linearen Beziehung bestimmt werden. Ob einige oder alle Elemente der Müller-Matrix bestimmt werden, hängt von den bekannten Intensitäts- und Polarisationseigenschaften des einfallenden Lichts und den gemessenen Intensitäts-und Polarisationseigenschaften des reflektierten Lichts ab. Wenn beispielsweise der Polarisator 112 als rotierender Polarisator und der Polarisator 124 als rotierender Analysator konfiguriert sind, kann das Element in den ersten drei Zeilen und den ersten drei Spalten der Müller-Matrix bestimmt werden. Werden zusätzlich rotierende Kompensatoren im Beleuchtungspfad und im Sammelpfad des Metrologiesystems 100 eingesetzt, können alle Elemente der 4x4 Müller-Matrix bestimmt werden.

[0044] In einem weiteren Aspekt werden Werte eines oder mehrerer kritischer Dimensionsparameter auf der Grundlage einer Anpassung einer modellierten Spektralantwort an die gemessene Spektralantwort bestimmt, die mit einem oder mehreren Elementen der Müller-Matrix assoziiert ist. Typischerweise werden viele kritische Dimensionsparameter, die keine asymmetrischen Merkmale einer zu messenden Struktur beschreiben, auf der Grundlage einer spektralen Anpassung über ein oder mehrere Müller-Matrixelemente zuverlässig geschätzt. Geometrische Parameter, die asymmetrische Merkmale einer Struktur beschreiben, werden jedoch typischerweise nicht zuverlässig durch spektrale Anpassung geschätzt, selbst in Fällen, in denen eine spektrale Anpassung in Verbindung mit bestimmten nicht-diagonalen Elementen der Müller-Matrix verwendet wird.

[0045] In einem Aspekt wird ein Wert eines oder mehrerer geometrischer Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur beschreiben, auf der Grundlage von Werten eines oder mehrerer kritischer Dimensionsparameter, die durch spektrale Anpassung zuverlässig geschätzt werden, und einer oder mehrerer Spektralantwort-Metriken bestimmt. Die Spektralantwort-Metriken sind skalare Werte, die aus Spektren abgeleitet werden, die mit einem oder mehreren nicht-diagonalen Müller-Matrixelementen assoziiert sind. Im Allgemeinen sind die Spektralantwort-Metriken von dem asymmetrischen Merkmal und anderen kritischen Dimensionen abhängig, die durch spektrale Anpassung zuverlässig bestimmt werden. Die Erfinder haben herausgefunden, dass die Entkopplung der Schätzung der kritischen Dimensionsparameter durch spektrale Anpassung von der Schätzung von Asymmetrieparameterwerten die Messung der Asymmetrieparameterwerte verbessert. In einigen Ausführungsformen setzt ein trainiertes lineares Modell einen Asymmetrieparameter in Beziehung zu einer oder mehreren Spektralantwort-Metriken und einer oder mehreren kritischen Dimensionen, die durch spektrale Anpassung zuverlässig bestimmt werden. Ein Schätzwert des Asymmetrieparameters wird durch Regression des trainierten Modells bestimmt. In einigen Ausführungsformen bildet ein trainiertes Neuronales-Netz-Modell die gemessenen Spektralantwort-Metriken und kritischen Dimensionsparameter auf den Wert des Asymmetrieparameters ab. In einigen Ausführungsformen wird eine Kombination von Modellen, wie z.B. ein trainiertes lineares Modell und ein trainiertes Neuronales-Netz-Modell, verwendet, um den Wert eines oder mehrerer Asymmetrieparameter zu schätzen. Im Allgemeinen kann jede geeignete Modellierungsmethode verwendet werden, um den Wert eines oder mehrerer Asymmetrieparameter zu schätzen.

[0046] **Fig.** 2 zeigt ein asymmetrisches Lochmerkmal 150, das auf dem Wafer 120 hergestellt wurde. Wie in **Fig.** 2 dargestellt, ist ein X-Y-Koordinatensystem mit dem Wafer 120 verbunden. Die X-Achse des X-Y-Koordinatensystems ist mit den Schreiblinien 154 des Wafers 120 ausgerichtet. Wie in **Fig.** 2 dargestellt, ist das Lochmerkmal 150 nicht senkrecht zur Oberfläche des Wafers 120. Die Schräglage des Lochmerkmals ist in einem Winkel, OA, zur Richtung der Schreiblinien 154 des Wafers 120 ausgerichtet. In ähnlicher Weise ist die Schräglage des Lochmerkmals in einem Winkel, OA, in Bezug auf die X-Richtung des X-Y-Koordinatenrahmens, der mit dem Wafer 120 verbunden ist, orientiert.

[0047] **Fig.** 3 zeigt den Querschnitt A-A, ausgerichtet mit der Schräglage des in **Fig.** 2 dargestellten Lochmerkmals 150. **Fig.** 3 zeigt eine obere Schicht oder eine Folge von Schichten 120A unmittelbar unter der Oberfläche des Wafers 120. Wie in **Fig.** 3 dargestellt, ist das Lochmerkmal 150 in einem Winkel TA in Bezug auf eine Oberflächennormale des Wafers 120 geneigt. In dem in **Fig.** 2 und 3 dargestellten Beispiel wird das asymmetrische Lochmerkmal 150 durch zwei Asymmetrieparameter beschrieben: Orientierungswinkel, OA, und Neigungswinkel, TA.

[0048] **Fig.** 4 zeigt den Querschnitt A-A, ausgerichtet mit der Schräglage des in **Fig.** 1 dargestellten Lochmerkmals 150. **Fig.** 4 zeigt insbesondere eine obere Schicht oder eine Folge von Schichten 120A direkt unter der Oberfläche des Wafers 120 und eine vergrabene Schicht oder eine Folge von Schichten 120B direkt unter der (den) Schicht(en) 120A. Wie in **Fig.** 4 dargestellt, ist der Lochabschnitt 150 unter einem Winkel TA_1 in Bezug auf eine Oberflächennormale des Wafers 120 und der Lochabschnitt 152 unter einem Winkel TA_2 in Bezug auf die Oberflächennormale des Wafers 120 geneigt. Zusätzlich ist der Lochabschnitt 152 horizontal (d.h. in einer Richtung parallel zur Oberfläche von Wafer 120) in Bezug auf Lochabschnitt 150 um einen Overlay-Versatz, OL, verschoben. In dem in **Fig.** 4 dargestellten Beispiel werden die asymmetrischen Lochabschnitte 150 und 152 durch vier Asymmetrieparameter beschrieben: Orientierungswinkel, OA, Neigungswinkel, TA_1 und TA_2, und Overlay-Versatz, OL.

[0049] Die geneigten Lochabschnitte 150 und 152 sind als nicht einschränkendes Beispiel angegeben. Im Allgemeinen können viele verschiedene Strukturen asymmetrische Merkmale aufweisen. Darüber hinaus können die gleichen asymmetrischen Merkmale durch verschiedene Sätze von Asymmetrieparametern beschrieben werden. In einem Beispiel können asymmetrische Lochmerkmale auch durch die elliptische Form der Löcher parametrisiert werden.

[0050] In einem weiteren Aspekt werden spektrale Messungen einer interessierenden Struktur bei zwei oder mehr unterschiedlichen Azimutwinkeln durchgeführt. Die resultierenden Messungen werden zur Schätzung eines oder mehrerer geometrischer Parameter verwendet, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur, wie hier beschrieben, charakterisieren. In einer bevorzugten Ausführungsform werden die Spektralmessungen bei zwei zueinander orthogonalen Azimutwinkeln durchgeführt. Die Kombination von mehreren orthogonalen Messungen ermöglicht eine präzise Schätzung der geometrischen Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur und die Achse, entlang der das asymmetrische Merkmal liegt, charakterisieren. Liegt das asymmetrische Merkmal beispielsweise entlang der Einfallsebene einer Messung, so ist die orthogonale Messung empfindlich auf die Asymmetrie.

[0051] Wie in **Fig.** 1 dargestellt, ist die Z-Achse senkrecht zur Oberfläche des Wafers 120 ausgerichtet. Die X- und Y-Achsen sind komplanar mit der Oberfläche des Wafers 120 und damit senkrecht zur Z-Achse. Ebenso sind die X'- und Y'-Achsen komplanar mit der Oberfläche des Wafers 120 und damit senkrecht zur Z-Achse. Die X'- und Y'-Achsen sind in Bezug auf die X- und Y-Achsen um einen Azimutwinkel AZ gedreht. Der Azimutwinkel gibt die Orientierung der Lichtzufuhr zum Wafer 120 um die Z-Achse an. Der Hauptstrahl 118 des Strahles des Beleuchtungslichtes 117 und der Hauptstrahl 121 des Strahles des gesammelten Lichtes 127 definieren eine Einfallsebene. Die X'-Achse ist mit der Einfallsebene ausgerichtet und die Y'-Achse ist orthogonal zur Einfallsebene. Auf diese Weise liegt die Einfallsebene in der X'-Z-Ebene. Der Strahl des Beleuchtungslichts 117 trifft auf die Oberfläche des Wafers 120 unter dem Einfallswinkel α, bezogen auf die Z-Achse, ein und liegt innerhalb der Einfallsebene.

[0052] Im Allgemeinen ist die Orientierung eines asymmetrischen Merkmals in Bezug auf den zu messenden Wafer a priori unbekannt. Messungen unter mehreren Azimutwinkeln stellen sicher, dass mindestens eine der Messungen auf das asymmetrische Merkmal empfindlich ist. Außerdem erhöht die Durchführung von Messungen bei zwei orthogonalen Azimutwinkeln die Wahrscheinlichkeit, die Asymmetrieachse genau zu bestimmen. Dies wird z.B. durch die Messung des Orientierungswinkels eines asymmetrischen Merkmals in Bezug auf die Einfallsebene eines ersten Satzes von Messungen und die Messung des Orientierungswinkels des asymmetrischen Merkmals in Bezug auf eine zweite Einfallsebene, die mit einem zweiten Satz von Messungen verbunden ist, erreicht. Da die Orientierungen der den beiden Messungen zugeordneten Einfallsebenen in Bezug auf den Wafer bekannt sind, wird der Orientierungswinkel des asymmetrischen Merkmals in Bezug auf den Wafer direkt aus beiden Messungen bestimmt. In vielen Messszenarien liefern beide Messungen eine unabhängige Schätzung des Orientierungswinkels in Bezug auf den Wafer. In einigen Szenarien, in denen das asymmetrische Merkmal nach der Einfallsebene einer bestimmten Messung ausgerichtet ist, ist die Messung jedoch unempfindlich gegenüber der Asymmetrie. In diesen Szenarien ist die orthogonale Messung am empfindlichsten für dasselbe asymmetrische Merkmal und liefert daher die zuverlässigste Schätzung des Orientierungswinkels des asymmetrischen Merkmals in Bezug auf den Wafer.

[0053] Im Allgemeinen erhöhen Messungen bei mehreren verschiedenen Azimutwinkeln die verfügbare Signalinformation und verbessern die Messgenauigkeit von asymmetrischen Merkmalen. Obwohl in diesem Dokument Beispiele für Messungen unter zwei orthogonalen Winkeln angegeben sind, kann daher im Allgemeinen eine beliebige Anzahl von Messungen unter verschiedenen Azimutwinkeln verwendet werden, um die Messgenauigkeit in Übereinstimmung mit den hier beschriebenen Methoden zu verbessern.

[0054] In einem weiteren Aspekt werden eine oder mehrere Spektralantwort-Metriken, die jeweils einem oder mehreren nicht-diagonalen Elementen der Müller-Matrix zugeordnet sind, durch Integration gemessener Spektren bestimmt, die dem einen oder den mehreren nicht-diagonalen Elementen der Müller-Matrix zugeordnet sind. Eine Spektralantwort-Metrik ist ein skalares Maß für die Spektralantwort aufgrund von Asymmetrie. Die Integration über die gemessenen Spektren reduziert das Rauschen und erhöht die Signalstärke, die mit dem Müller-Matrix-Element oder der Kombination von Müller-Matrix-Elementen verbunden ist.

[0055] In einem Beispiel, dargestellt durch Gleichung (4), werden die mit dem Müller-Matrixelement M_{30} verbundenen Spektren über die Wellenlänge integriert.

$$SRM_{M_{30}} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (M_{30}) d\lambda \qquad (4)$$

[0056] In einigen Beispielen wird die Integration über die Summe mehrerer Elemente der Müller-Matrix durchgeführt. Gleichung (5) veranschaulicht eine Spektralantwort-Metrik, die durch die Integration von Spektren bestimmt wird, die mit der Summe der Müller-Matrixelemente M_{20} und M_{02} assoziiert sind.

$$SRM_{M_{02}+M_{20}} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (M_{02} + M_{20}) d\lambda \qquad (5)$$

[0057] In einer bevorzugten Ausführungsform wird die Summe der nicht-diagonalen Müller-Matrixelemente M_{02} und M_{20} als Spektralantwort-Metrik verwendet, da die Summe M_{02}+M_{20} bei fehlender Asymmetrie gleich Null ist. Das Maß der Asymmetrie wird also durch die Abweichung von $SRM_{M02+M20}$ von Null ausgedrückt. In ähnlicher Weise wird in einer bevorzugten Ausführungsform das nicht-diagonale Müller-Matrixelement M_{30} als Spektralantwort-Metrik verwendet, da M_{30} bei fehlender Asymmetrie gleich Null ist. Als solches wird das Maß der Asymmetrie durch die Abweichung von SRM_{M30} von Null ausgedrückt. In einer anderen bevorzugten Ausführungsform werden sowohl die Spektralantwort-Metrik $SRM_{M02+M20}$ als auch die SRM_{M30} verwendet, um den Wert eines oder mehrerer geometrischer Parameter zu schätzen, die ein asymmetrisches Merkmal einer interessierenden Struktur wie hier beschrieben beschreiben.

[0058] Obwohl die auf M_{30} und der Summe (M_{02}+M_{20}) basierenden Spektralantwort-Metriken hier konkret beschrieben werden, können im Allgemeinen Spektralantwort-Metriken, die auf jedem geeigneten Müller-Matrixelement oder jeder geeigneten Kombination von Müller-Matrixelementen basieren, im Rahmen dieses Patentdokuments in Betracht gezogen werden. Zum Beispiel kann eine Spektralantwort-Metrik auf der Basis von M_{03}, der Summe (M_{12}+M_{21}) usw. bestimmt werden.

[0059] In einem anderen Aspekt werden Spektren, die mit einem oder mehreren nicht-diagonalen Elementen der Müller-Matrix assoziiert sind, in einen oder mehrere Teilbereiche der Wellenlängen unterteilt. Darüber hinaus werden die Spektralantwort-Metriken durch Integration der Spektren, die mit dem einen oder den mehreren nicht-diagonalen Elementen der Müller-Matrix assoziiert sind, über den einen oder die mehreren Teilbereiche der Wellenlängen bestimmt. In einigen Beispielen erhöht die Bestimmung einer Spektralantwort-Metrik auf der Grundlage ausgewählter Teile des verfügbaren gemessenen Spektrums die Empfindlichkeit der Spektralantwort-Metrik auf den/die Parameter, der/die das Asymmetriemerkmal beschreibt/beschreiben. Dies wird erreicht, indem Wellenlängen mit der größten Empfindlichkeit auf das asymmetrische Merkmal verstärkt werden und die Auswirkungen von Zufallsrauschen durch Integration verringert werden.

[0060] **Fig.** 5 zeigt eine beispielhafte Spektralantwort 153, die mit der Summe (M_{02}+M_{20}) assoziiert ist. Wie in **Fig.** 5 dargestellt, zeigen signifikante Teile des Spektrums eine Signalantwort, die innerhalb des Rauschpegels der Messung liegt, während andere Teile des Spektrums eine Signalantwort aufweisen, die den Rauschpegel der Messung deutlich übersteigt. In einem Beispiel werden die Teile des Spektrums, die einen vorgegebenen Schwellenwert T überschreiten, aus dem Spektrum ausgewählt, um die Signalantwort zu identifizieren, die den Rauschpegel überschreitet. In dem illustrierten Beispiel werden die Wellenlängen-Teilbereiche λ_{12} und λ_{34} aus dem verfügbaren Spektrum ausgewählt. Außerdem wird eine der Summe (M_{02}+M_{20}) zugeordnete Spektralantwort-Metrik bestimmt, indem die Summe (M_{02}+M_{20}) über nur die ausgewählten Teilbereiche integriert wird, wie durch Gleichung (6) veranschaulicht

$$SRM = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (M_{02} + M_{20}) d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} (M_{02} + M_{20}) d\lambda \qquad (6)$$

[0061] In dem in **Fig.** 2 und 3 dargestellten Beispiel wird die Asymmetrie eines geneigten Lochs 150 durch den Neigungswinkel TA und den Orientierungswinkel OA charakterisiert. Darüber hinaus ist das geneigte Loch durch andere kritische Dimensionen charakterisiert, die nicht die Asymmetrie des Lochmerkmals beschreiben, wie z.B. die Höhe H des Lochs und den Durchmesser CD des Lochs. Der Orientierungswinkel, OA, ist in Bezug auf die positive Richtung der in **Fig.** 1 dargestellten X-Achse definiert. Wenn der Orientierungswinkel gleich Null ist, verzerrt sich das asymmetrische Merkmal in der positiven Richtung der X-Achse. Ebenso wird das asymmetrische Merkmal bei einem Orientierungswinkel von 90 Grad in der positiven Richtung der Y-Achse verzerrt. Der Neigungswinkel, TA, wird als Null definiert, wenn die Mittelachse des Lochs normal zum Wafer ist (d.h. keine Schräglage).

[0062] In einem Beispiel wird das Metrologiesystem 100 eingesetzt, um spektroskopische Messungen des geneigten Lochs 150 bei zwei orthogonalen Azimutwinkeln durchzuführen. In einer Messung wird die Einfallsebene des Beleuchtungslichts mit der in **Fig.** 1 dargestellten X-Achse ausgerichtet. In einer weiteren Messung wird die Einfallsebene des Beleuchtungslichts mit der in **Fig.** 1 dargestellten Y-Achse ausgerichtet.

[0063] Die gemessenen Spektren 170, die mit allen verfügbaren Müller-Matrixelementen bei beiden Azimutwinkeln assoziiert sind, werden vom Computersystem 130 empfangen. Das Computersystem 130 ermittelt mehrere Spektralantwort-Metriken basierend auf den gemessenen Spektren. In einem Beispiel ermittelt das Computersystem 130 die Spektralantwort-Metrik durch Integration ausgewählter Anteile des Müller-Elements M_{30} und der Summe der Müller-Matrixelemente (M_{20}+M_{02}) für beide Azimutwinkel. Die Gleichungen (7) - (10) veranschaulichen die Spektralantwort-Metriken, die durch Integration über Nλ Segmente des verfügbaren Spektrums von (M_{20}+M_{02}), gemessen bei einem 180-Grad-Azimutwinkel, Nλ Segmente des verfügbaren Spektrums von M_{30}, gemessen bei einem 180-Grad-Azimutwinkel, Nλ Segmente des verfügbaren Spektrums von (M_{20}+M_{02}), gemessen bei einem 90-Grad-Azimutwinkel, und Nλ Segmente des verfügbaren Spektrums von M_{30}, gemessen bei einem 90-Grad-Azimutwinkel, bestimmt werden. Der tiefgestellte Index a bezeichnet die Summe der Müller-Matrixelemente (M_{20}+M_{02}) und der tiefgestellte Index b bezeichnet das Müller-Matrixelement M_{30}. Obwohl die durch die Gleichungen (7) - (10) dargestellten Spektralantwort-Metriken jeweils durch Integration über Nλ Segmente der verfügbaren Spektren bestimmt werden, können die zur Integration ausgewählten Wellenlängensegmente im Allgemeinen für jede Spektralantwort-Metrik eindeutig sein.

$$SRM_{a,180} = \sum_{i=1}^{N_\lambda} \int_{\lambda_{i,Min}}^{\lambda_{i,Max}} (M_{20} + M_{02}) d\lambda \qquad (7)$$

$$SRM_{b,180} = \sum_{i=1}^{N_\lambda} \int_{\lambda_{i,Min}}^{\lambda_{i,Max}} M_{30} d\lambda \qquad (8)$$

$$SRM_{a,90} = \sum_{i=1}^{N_\lambda} \int_{\lambda_{i,Min}}^{\lambda_{i,Max}} (M_{20} + M_{02}) d\lambda \qquad (9)$$

$$SRM_{b,90} = \sum_{i=1}^{N_\lambda} \int_{\lambda_{i,Min}}^{\lambda_{i,Max}} M_{30} d\lambda \qquad (10)$$

[0064] Das Computersystem 130 schätzt auch die Werte der Lochhöhe, H, des Lochdurchmessers, CD, des Lochneigungswinkels, TA, und des Orientierungswinkels, OA, durch modellgestützte spektrale Anpassung mit einer beliebigen Kombination der verfügbaren Müller-Matrixelemente. Wie bereits erwähnt, werden zuverlässige Schätzungen von H und CD von der modellbasierten spektralen Anpassung erwartet, aber die geschätzten Werte von TA und OA sind typischerweise ungenau.

[0065] Das Computersystem 130 schätzt die Werte von TA und OA auf der Grundlage der unter Bezugnahme auf die Gleichungen (7) - (10) beschriebenen Spektralantwort-Metriken und der durch spektrale Anpassung geschätzten Werte von CD und H.

[0066] In einigen Beispielen erzeugt das Computersystem 130 ein trainiertes lineares Modell, das anschließend zur Schätzung von Werten von TA und OA verwendet wird.

[0067] Es wird angenommen, dass die Werte der Spektralantwort-Metrik, SRM, von CD, H, TA und OA abhängen. Es kann sein, dass die Abhängigkeit von CD und H im Allgemeinen nicht unabhängig von der Abhängigkeit von TA und OA ist. Gleichung (11) veranschaulicht die Annahme, dass eine Spektralantwort-

Metrik, SRM, von CD, H, TA und OA abhängt, aber die Abhängigkeit kann als eine Kombination einer Funktion, g, die von CD und H abhängt, und einer Funktion, h, die von TA und OA abhängt, ausgedrückt werden.

$$SRM(CD,Höhe,TA,OA) = g(CD,Höhe)\cdot h(TA,OA) \qquad (11)$$

[0068] Es wird angenommen, dass die Funktion h direkt proportional zum Grad des Neigungswinkels TA entlang der jeweiligen Lichtachse ist, wie in den Gleichungen (12) - (13) dargestellt.

$$h_{90}(TA,OA) \propto \cos(OA)\cdot Köhe\cdot\tan(TA) \qquad (12)$$

$$h_{180}(TA,OA) \propto \sin(OA)\cdot Höhe\cdot\tan(TA) \qquad (13)$$

[0069] Die Funktion g wird als unempfindlich gegenüber TA und OA angenommen, und die Berücksichtigung dieser Funktion kann effektiv von der Berücksichtigung der Funktion h entkoppelt werden. Zusätzlich haben die Erfinder entdeckt, dass die Funktion g für jede der vier Spektralantwort-Metriken, $SRM_{a,180}$, $SRM_{b,180}$, $SRM_{a,90}$ und $SRM_{b,90}$, ungefähr gleich ist.

[0070] Die Beziehung zwischen Funktion h und den interessierenden Parametern OA und TA kann für nominale Werte von CD und H bestimmt werden, aber die Beziehung gilt nicht für beliebige CD und H. Um dieses Problem zu lösen, führt das Computersystem 130 eine lineare Regression der kleinsten Quadrate durch, um Spektralantwort-Metriken, SRM, die mit allgemeinen Werten von CD und H assoziiert sind, auf normalisierte Spektralantwort-Metriken, SRM', die mit bekannten, nominalen Werten von CD und H assoziiert sind, abzubilden, wobei SRM' in Gleichung (14) dargestellt ist.

$$SRM' = SRM(CD_{Nom},H_{Nom},TA,OA) = g(CD_{Nom},H_{Nom})\cdot h(TA,OA) \qquad (14)$$

[0071] Eine Spektralantwort-Metrik, SRM, ist mit der normierten Spektralantwort-Metrik, SRM', durch den Normierungsfaktor g (CD, H) / g (CD_{NOM}, H_{NOM}) verknüpft, wie durch Gleichung (15) veranschaulicht.

$$SRM(CD,H,TA,OA) = SRM'(TA,OA)\frac{g(CD,H)}{g(CD_{Nom},H_{Nom})} \qquad (15)$$

[0072] Unter der Annahme nominaler, nicht-trivialer Werte für TA und OA erzeugt das Computersystem 130 eine Reihe von Spektralantwort-Metriken, SRM, die mit Messungen von Lochmerkmalen mit N verschiedenen Werten von CD und M verschiedenen Werten von H verbunden sind, sowie einen Satz von Spektralantwort-Metriken, die mit der Messung eines Lochmerkmals bei den gewählten Nominalwerten für CD und H verbunden sind.

[0073] Die in Gleichung (16) dargestellten unbekannten Koeffizienten (C_0,...,C_N) und (D_0,...,D_M) werden mittels linearer Regression der kleinsten Quadrate bestimmt, um zu einem Modell für den Normierungsfaktor g (CD, H) /g (CD_{NOM}, H_{NOM}) zu gelangen.

$$\begin{bmatrix} 1 & CD & \cdots & CD^N & H & \cdots & H^M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} C_0 \\ \vdots \\ C_N \\ D_1 \\ \vdots \\ D_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{SRM(CD,H,TA_{Nom},OA_{Nom})}{SRM(CD_{Nom},H_{Nom},TA_{Nom},OA_{Nom})} \\ \vdots \end{bmatrix} = \qquad (16)$$

$$\frac{g(CD,H)}{g(CD_{Nom},H_{Nom})}$$

[0074] Unter der Annahme der Nominalwerte von CD und H generiert das Computersystem 130 eine Reihe von normierten Spektralantwort-Metriken, SRM', die mit unterschiedlichen Werten von TA und OA verbunden sind.

[0075] Die in Gleichung (17) dargestellten unbekannten Koeffizienten A_1 und A_2 werden mittels linearer Regression der kleinsten Quadrate ermittelt.

$$\begin{bmatrix} SRM'^{2}_{a,180}+SRM'^{2}_{a,90} & SRM'^{2}_{b,180}+SRM'^{2}_{b,90} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \left[H\cdot\tan(TA)\right]^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad (17)$$

[0076] Die in Gleichung (18) dargestellten unbekannten Koeffizienten B_1 und B_2 werden ebenfalls mittels linearer Regression der kleinsten Quadrate ermittelt.

$$\begin{bmatrix} SRM'_{a,180} & SRM'_{b,180} \\ SRM'_{a,90} & SRM'_{b,90} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \sin(OA)\cdot H\cdot\tan(TA) \\ \cos(OA)\cdot H\cdot\tan(TA) \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad (18)$$

[0077] Die Ergebnisse der Gleichungen (11) - (18) werden kombiniert, um zu einem trainierten linearen Modell zu gelangen, das die interessierenden Asymmetrieparameter OA und TA mit Spektralantwort-Metriken verbindet, die aus Messungen von asymmetrischen Strukturen abgeleitet wurden. Auf diese Weise werden die Werte für das trainierte lineare Modell durch die Gleichungen (19) -(21) dargestellt.

$$SRM'_{(a,b),(90,180)}=\frac{SRM_{(a,b),(90,180)}(CD,H,TA,OA)}{C_0+C_1\cdot CD+\cdots+C_N\cdot CD^N+D_1\cdot H+\cdots+D_M\cdot H^M} \qquad (19)$$

$$TA=\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{A_1\cdot\left(SRM'^{2}_{a,180}+SRM'^{2}_{a,90}\right)+A_2\cdot\left(SRM'^{2}_{b,180}+SRM'^{2}_{b,90}\right)}}{H}\right) \qquad (20)$$

$$OA=atan2\left(B_1\cdot SRM'_{a,180}+B_2\cdot SRM'_{b,180},B_1\cdot SRM'_{a,90}+B_2\cdot SRM'_{b,90}\right) \qquad (21)$$

[0078] **Fig.** 6 zeigt einen Plot 155 mit simulierten Ergebnissen, der einen Vergleich zwischen den tatsächlichen, mit der Simulation assoziierten Neigungswinkeln 156 und regressierten Werten der Neigungswinkel 157 unter Verwendung des trainierten linearen Modells, das mit Bezug auf die Gleichungen (11) - (21) beschrieben wird, darstellt. **Fig.** 7 zeigt ein Diagramm 160 simulierter Ergebnisse, das einen Vergleich zwischen den tatsächlichen Orientierungswinkeln 161, die mit derselben Simulation assoziiert sind, und regressierten Werten der Orientierungswinkel 162 unter Verwendung des trainierten linearen Modells, das mit Bezug auf die Gleichungen (11) - (21) beschrieben wird, darstellt. In diesem Beispiel werden CD und H des geneigten Lochmerkmals zufällig über einen Bereich von 5% variiert, der Neigungswinkel variiert von 0° bis 0,5° und der Orientierungswinkel variiert von 0° bis 360°. Die simulierten Messsignale wurden mit zufälligem Gauß-Rauschen beaufschlagt und ein einzelner Wellenlängen-Teilbereich wurde zur Bestimmung der Spektralantwort-Metriken verwendet. Wie in **Fig.** 6 dargestellt, folgen die Schätzwerte des Neigungswinkels gut den tatsächlichen Neigungswinkelwerten. In ähnlicher Weise, wie in **Fig.** 7 dargestellt, folgen die Schätzwerte des Orientierungswinkels gut den tatsächlichen Orientierungswinkelwerten.

[0079] In einigen Beispielen erzeugt das Computersystem 130 ein trainiertes Neuronales-Netz-Modell, das anschließend zur Schätzung der Werte von TA und OA eingesetzt wird.

[0080] In einigen Beispielen wird ein Neuronales-Netz-Modell trainiert, um die zuvor beschriebenen Spektralantwort-Metriken und die zuverlässig regressierten kritischen Dimensionen auf Werte eines oder mehrerer geometrischer Parameter abzubilden, die ein zu messendes asymmetrisches Merkmal charakterisieren.

[0081] In einem Beispiel umfasst der Trainingsinput eines Neuronalen-Netz-Modells die vier Spektralantwort-Metriken, die mit Bezug auf die Gleichungen (7) - (10) beschrieben werden, d.h. $SRM_{a,180}$, $SRM_{b,180}$, $SRM_{a,90}$ und $SRM_{b,90}$, und die zuverlässig regressierten Werte von CD und Höhe. Der Trainingsoutput beinhaltet den Normierungsfaktor g(CD, H) / g(CD_{NOM},H_{NOM}). In einigen Beispielen wird die hier beschriebene lineare Regression der kleinsten Quadrate mit dem durch das trainierte neuronale Netz bestimmten Normierungsfaktor angewendet.

[0082] In einem Beispiel wird ein neuronales Netzwerk von 20 Neuronen mit 2 verborgenen Schichten trainiert, um den Normierungsfaktor g (CD, H) / g (CD_{NOM}, H_{NOM}) vorherzusagen. Eingabedaten werden aus synthetischen Spektren generiert, die mit zufällig variierenden Werten von CD, Höhe, TA und OA in der gleichen Weise verknüpft sind, wie in Bezug auf **Fig.** 6 und 7 beschrieben. Die nominale CD und Höhe werden

aus einem einzigen Zufallsprofil in den Trainingsdaten ausgewählt. Die hier beschriebene lineare Regression der kleinsten Quadrate wird unter Verwendung des durch das trainierte neuronale Netz bestimmten Normierungsfaktors angewendet.

[0083] **Fig.** 8 zeigt ein Diagramm 165 der simulierten Ergebnisse, das einen Vergleich zwischen den tatsächlichen Neigungswinkeln, die mit dreieckigen Referenzmarken dargestellt werden, und regressierten Neigungswinkelwerten, die mit quadratischen Referenzmarken dargestellt werden, zeigt. Die Unterschiede zwischen den tatsächlichen und den regressierten Werten sind durch die Kurve 166 dargestellt. In diesem Beispiel beträgt der 3-Sigma-Wert (d.h. die dreifache Standardabweichung) der Differenz zwischen den tatsächlichen und den regressierten Werten des Neigungswinkels 0,00298.

[0084] **Fig.** 9 zeigt ein Diagramm 175 mit simulierten Ergebnissen, das einen Vergleich zwischen den tatsächlichen Orientierungswinkeln, die mit dreieckigen Referenzmarken dargestellt werden, und regressierten Orientierungswinkelwerten, die mit quadratischen Referenzmarken dargestellt werden, zeigt. Die Unterschiede zwischen den tatsächlichen und den regressierten Werten sind durch die Kurve 176 dargestellt. In diesem Beispiel beträgt der 3-Sigma-Wert (d.h. die dreifache Standardabweichung) der Differenz zwischen den tatsächlichen und den regressierten Werten des Orientierungswinkels 0,19000.

[0085] In einem anderen Beispiel wird statt der Anwendung linearer Regression zur Schätzung der Werte der Asymmetrieparameter ein weiteres Neuronales-Netz-Modell trainiert, um TA und OA auf der Basis des Normierungsfaktors und der gemessenen Eingaben zu bestimmen.

[0086] In einem anderen Beispiel umfasst der Trainingsinput eines Neuronalen-Netz-Modells die vier Spektralantwort-Metriken, die mit Bezug auf die Gleichungen (7) - (10) beschrieben werden, d.h. $SRM_{a,180}$, $SRM_{b,180}$, $SRM_{a,90}$ und $SRM_{b,90}$, und die zuverlässig regressierten Werte von CD und Höhe. Der Trainings-Output beinhaltet entsprechende Werte von TA und OA.

[0087] **Fig.** 10 zeigt ein Diagramm 180 mit simulierten Ergebnissen, wobei ein trainiertes Neuronales-Netz-Modell verwendet wird, um TA und OA direkt aus den vier Spektralantwort-Metriken und den zuverlässig regressierten Werten von CD und Höhe zu schätzen. **Fig.** 10 zeigt einen Vergleich zwischen den tatsächlichen Neigungswinkeln, die mit dreieckförmigen Referenzmarken dargestellt werden, und regressierten Neigungswinkelwerten, die mit quadratischen Referenzmarken dargestellt werden. Die Unterschiede zwischen den tatsächlichen und den regressierten Werten sind durch die Kurve 181 dargestellt. In diesem Beispiel beträgt der 3-Sigma-Wert (d.h. die dreifache Standardabweichung) der Differenz zwischen den tatsächlichen und den regressierten Werten des Neigungswinkels 0,00783.

[0088] In einem weiteren Beispiel beinhaltet der Trainingsinput eines neuronalen Netzwerkmodells die vier Spektralantwort-Metriken, die mit Bezug auf die Gleichungen (7) -(10) beschrieben werden, nicht aber die zuverlässig regressierten Werte von CD und Höhe. Der Trainingsoutput enthält entsprechende Werte von TA und OA. Simulationsergebnisse, die diesen Ansatz validieren, zeigen, dass der 3-Sigma-Wert der Differenz zwischen tatsächlichen und regressierten Werten des Neigungswinkels 0,18000 beträgt, was nicht so effektiv ist wie die zuvor beschriebenen Ansätze.

[0089] Im Allgemeinen werden die hier beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Werte eines oder mehrerer geometrischer Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal einer interessierenden Struktur beschreiben, tatsächlich iterativ angewandt. In einigen Beispielen werden die geschätzten Werte der Asymmetrieparameter der spektralen Anpassungsanalyse zugeführt, um zu verbesserten Schätzungen einer oder mehrerer kritischer Dimensionen zu gelangen. Diese verbesserten Schätzungen der kritischen Dimensionen werden zur Aktualisierung der Spektralantwort-Metriken verwendet, die wiederum zur Generierung verbesserter Schätzungen der asymmetrischen Parameter verwendet werden. Diese Iteration wird bis zur Konvergenz auf Werte der Asymmetrieparameter fortgesetzt. Die geschätzten Werte der Asymmetrieparameter werden in einem Speicher (z.B. Speicher 132) abgelegt.

[0090] In einigen Ausführungsformen werden mehrere verschiedene Spektralantwort-Metriken bestimmt, die jeweils auf einem anderen nicht-diagonalen Müller-Matrixelement oder einer anderen Kombination von Müller-Matrixelementen basieren (z.B. M_{30} und die Summe (M_{20}+M_{02})). In einem weiteren Aspekt werden verschiedene Spektralantwort-Metriken unterschiedlich gewichtet, z.B. durch Skalierung jeder Spektralantwort-Metrik mit einer anderen Konstante. Auf diese Weise werden Spektralantwort-Metriken, die empfindlicher auf bestimmte Asymmetrieparameter sind, stärker gewichtet als Spektralantwort-Metriken, die weniger empfindlich auf die spezifischen Asymmetrieparameter sind.

[0091] **Fig.** 12 zeigt ein Verfahren 200 zur Durchführung spektroskopischer Messungen asymmetrischer Parameter in mindestens einem neuartigen Aspekt. Das Verfahren 200 eignet sich zur Umsetzung durch ein Metrologiesystem wie das in **Fig.** 1 der vorliegenden Erfindung dargestellte Metrologiesystem 100. In einem Aspekt wird erkannt, dass die Datenverarbeitungsblöcke des Verfahrens 200 über einen vorprogrammierten Algorithmus ausgeführt werden können, der von einem oder mehreren Prozessoren des Computersystems 130 oder eines beliebigen anderen Universalrechnersystems ausgeführt werden kann. Es wird hierin erkannt, dass die besonderen strukturellen Aspekte des Metrologiesystems 100 keine Einschränkungen darstellen und nur als veranschaulichend interpretiert werden sollten.

[0092] In Block 201 wird eine auf einem Halbleiterwafer hergestellte interessierende Struktur mit einer Menge an breitbandiger optischer Strahlung bei zwei oder mehr unterschiedlichen Azimutwinkeln beleuchtet.

[0093] In Block 202 wird als Antwort auf die Beleuchtung des Halbleiterwafers bei jedem der zwei oder mehr Azimutwinkel eine Menge an Messlicht von dem Halbleiterwafer detektiert.

[0094] In Block 203 wird eine gemessene Spektralantwort der interessierenden Struktur auf die Beleuchtung bei jedem der zwei oder mehr Azimutwinkel auf der Grundlage jeder detektierten Menge an Messlicht bestimmt. Jede gemessene Spektralantwort enthält Spektren, die mit mehreren Elementen einer Müller-Matrix verknüpft sind.

[0095] In Block 204 werden die Werte eines oder mehrerer kritischer Dimensionsparameter auf der Grundlage einer Anpassung einer modellierten Spektralantwort an die gemessenen Spektralantworten, die mit den zwei oder mehr Azimutwinkeln assoziiert sind, geschätzt.

[0096] Im Block 205 werden ein oder mehrere Teilbereiche von Wellenlängen mindestens eines Spektrums eines oder mehrerer nicht-diagonaler Elemente der Müller-Matrix ausgewählt, die jeder gemessenen Spektralantwort zugeordnet sind.

[0097] In Block 206 wird das mindestens eine Spektrum des einen oder der mehreren nicht-diagonalen Elemente der Müller-Matrix über den einen oder die mehreren ausgewählten Teilbereiche der Wellenlängen integriert, um eine oder mehrere Spektralantwort-Metriken zu erzeugen.

[0098] In Block 207 werden Werte eines oder mehrerer geometrischer Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur beschreiben, auf der Grundlage der Werte des einen oder der mehreren kritischen Dimensionsparameter und der einen oder der mehreren Spektralantwort-Metriken geschätzt.

[0099] Beispielhafte Messtechniken, die wie hier beschrieben konfiguriert werden können, sind u.a. die spektroskopische Ellipsometrie (SE), einschließlich der Müller-Matrix-Ellipsometrie (MMSE), Drehpolarisator SE (RPSE), Drehpolarisator-Drehkompensator SE (RPRC), Drehkompensator-Rotationskompensator SE (RCRC), spektroskopische Reflektometrie (SR), einschließlich polarisierter SR, unpolarisierter SR, spektroskopische Scatterometrie, Scatterometrie-Overlay, Strahlprofilreflektometrie, sowohl winkelaufgelöst als auch polarisationsaufgelöst, Strahlprofilellipsometrie, Einzel- oder Mehrfach-Diskret-Wellenlängen-Ellipsometrie, etc. Generell kann jede Messtechnik, die eine große Bandbreite an Winkelinformationen in den Messsignalen enthält, einzeln oder in beliebiger Kombination in Betracht gezogen werden. Zum Beispiel kann jede SR- oder SE-Technik, die für die Charakterisierung von Halbleiterstrukturen anwendbar ist, einschließlich bildbasierter Messtechniken, einzeln oder in beliebiger Kombination in Betracht gezogen werden.

[0100] In einer weiteren Ausführungsform umfasst das System 100 ein oder mehrere Computersysteme 130, die dazu dienen, Messungen an tatsächlichen Bauelementstrukturen auf der Grundlage von spektroskopischen Messdaten durchzuführen, die nach den hier beschriebenen Methoden erfasst wurden. Das eine oder die mehreren Computersysteme 130 können mit dem Spektrometer kommunikativ gekoppelt sein. In einem Aspekt sind das eine oder die mehreren Computersysteme 130 so konfiguriert, dass sie Messdaten 170 empfangen, die mit Messungen der Struktur der Probe 120 assoziiert sind.

[0101] Es sollte anerkannt werden, dass ein oder mehrere Schritte, die in der gesamten vorliegenden Offenlegung beschrieben werden, von einem einzigen Computersystem 130 oder alternativ von einem Mehrfachcomputersystem 130 durchgeführt werden können. Außerdem können verschiedene Subsysteme des Systems 100 ein Computersystem umfassen, das geeignet ist, zumindest einen Teil der hier beschriebenen Schritte durchzuführen. Die vorstehende Beschreibung ist daher nicht als eine Beschränkung der vorliegenden Erfindung zu verstehen, sondern lediglich als eine Veranschaulichung.

[0102] Darüber hinaus kann das Computersystem 130 auf jede in der Technik bekannte Weise kommunikativ an die Spektrometer gekoppelt sein. Beispielsweise können das eine oder die mehreren Computersysteme 130 mit den Spektrometern zugeordneten Computersystemen gekoppelt sein. In einem anderen Beispiel können die Spektrometer direkt von einem einzigen Computersystem gesteuert werden, das mit dem Computersystem 130 verbunden ist.

[0103] Das Computersystem 130 des Metrologiesystems 100 kann so konfiguriert sein, dass es Daten oder Informationen von den Subsystemen des Systems (z. B. Spektrometer und dergleichen) über ein Übertragungsmedium, das drahtgebundene und/oder drahtlose Teile enthalten kann, empfängt und/oder erfasst. Auf diese Weise kann das Übertragungsmedium als Datenverbindung zwischen dem Computersystem 130 und anderen Subsystemen des Systems 100 dienen.

[0104] Das Computersystem 130 des Metrologiesystems 100 kann so konfiguriert sein, dass es Daten oder Informationen (z. B. Messergebnisse, Modellierungseingaben, Modellierungsergebnisse, Referenzmessergebnisse usw.) von anderen Systemen über ein Übertragungsmedium, das drahtgebundene und/oder drahtlose Teile enthalten kann, empfängt und/oder erfasst. Auf diese Weise kann das Übertragungsmedium als Datenverbindung zwischen dem Computersystem 130 und anderen Systemen (z. B. Speicher im Metrologiesystem 100, externer Speicher oder andere externe Systeme) dienen. Beispielsweise kann das Rechnersystem 130 so konfiguriert sein, dass es über eine Datenverbindung Messdaten von einem Speichermedium (z. B. Speicher 132 oder ein externer Speicher) empfängt. Beispielsweise können mit den hier beschriebenen Spektrometern gewonnene Spektralergebnisse in einem permanenten oder semipermanenten Speicher (z. B. Speicher 132 oder einem externen Speicher) gespeichert werden. Dabei können die Spektralergebnisse aus dem integrierten Speicher oder aus einem externen Speichersystem importiert werden. Außerdem kann das Computersystem 130 über ein Übertragungsmedium Daten an andere Systeme senden. So kann z.B. ein vom Rechnersystem 130 ermitteltes Messmodell oder ein geschätzter Parameterwert 171 übermittelt und in einem externen Speicher abgelegt werden. Dabei können Messergebnisse an ein anderes System exportiert werden.

[0105] Das Computersystem 130 kann unter anderem ein Personalcomputersystem, ein Großrechnersystem, eine Workstation, einen Bildrechner, einen Parallelprozessor oder jedes andere in der Technik bekannte Gerät umfassen. Im Allgemeinen kann der Begriff „Computersystem“ weit gefasst werden und umfasst jedes Gerät mit einem oder mehreren Prozessoren, die Befehle von einem Speichermedium ausführen.

[0106] Programmanweisungen 134, die Methoden wie die hier beschriebenen implementieren, können über ein Übertragungsmedium wie eine drahtgebundene, kabelgebundene oder drahtlose Übertragungsstrecke übertragen werden. Zum Beispiel werden, wie in **Fig.** 1 dargestellt, die im Speicher 132 gespeicherten Programmanweisungen 134 über den Bus 133 an den Prozessor 131 übertragen.

[0107] Die Programmanweisungen 134 werden auf einem computerlesbaren Medium (z.B. Speicher 132) gespeichert. Beispiele für computerlesbare Medien sind ein Nur-LeseSpeicher, ein Direktzugriffsspeicher, eine magnetische oder optische Platte oder ein Magnetband.

[0108] In einigen Beispielen sind die hier beschriebenen Messmodelle als Element eines optischen SpectraShape®-Messsystems für kritische Dimensionen implementiert, das von der KLA-Tencor Corporation, Milpitas, Kalifornien, USA, erhältlich ist. Auf diese Weise wird das Modell unmittelbar nach der Erfassung der Spektren durch das System erstellt und ist sofort einsatzbereit.

[0109] In einigen anderen Beispielen werden die hier beschriebenen Messmodelle offline implementiert, z.B. durch ein Computersystem, das die AcuShape® Software der KLA-Tencor Corporation, Milpitas, Kalifornien, USA, implementiert. Das resultierende, trainierte Modell kann als Element einer AcuShape®-Bibliothek eingebunden werden, auf die ein Metrologiesystem, das Messungen durchführt, zugreifen kann.

[0110] In einem anderen Aspekt werden die hier beschriebenen Verfahren und Systeme für die spektroskopische Metrologie von Halbleiterbauelementen auf die Messung von asymmetrischen Merkmalen von Strukturen mit hohem Seitenverhältnis (HAR), Strukturen mit großen lateralen Abmessungen oder beidem angewandt. Die beschriebenen Ausführungsformen ermöglichen die Metrologie von asymmetrischen Merkmalen von Halbleiterbauelementen einschließlich dreidimensionaler NAND-Strukturen, wie vertikale NAND-Strukturen (V-NAND), dynamische Speicherstrukturen mit wahlfreiem Zugriff (DRAM) usw., die von verschiedenen Halbleiterherstellern hergestellt werden, wie Samsung Inc. (Südkorea), SK Hynix Inc. (Südkorea), Toshiba Corporation (Japan) und Micron Technology, Inc. (Vereinigte Staaten), etc. **Fig.** 11 zeigt eine beispielhafte

NAND-Struktur 190 mit hohem Seitenverhältnis, die asymmetrische Merkmalsfehler enthalten kann. Für die Messung dieser Strukturen mit hohem Aspektverhältnis ist ein breitbandiges spektroskopisches Ellipsometer mit weiten Bereichen des Azimutwinkels geeignet. HAR-Strukturen enthalten oft harte Maskenschichten, um Ätzprozesse für HARs zu erleichtern. Wie hier beschrieben, bezieht sich der Begriff „HAR-Struktur“ auf jede Struktur, die durch ein Seitenverhältnis von mehr als 10:1 gekennzeichnet ist und das bis zu 100:1 oder höher sein kann.

[0111] In einem weiteren Aspekt werden die hier beschriebenen Messergebnisse als aktives Feedback an ein Werkzeug des Herstellungsprozesses (z.B. Lithographiewerkzeug, Ätzwerkzeug, Abscheidewerkzeug, etc.) bereitgestellt. Beispielsweise werden die Werte von Messparametern, die auf der Grundlage der hier beschriebenen Messverfahren ermittelt wurden, an ein Lithographiewerkzeug übermittelt, um das Lithographiesystem so anzupassen, dass ein gewünschter Output (d.h. reduzierte Asymmetriefehler usw.) erreicht wird. In ähnlicher Weise werden Ätzparameter (z.B. Ätzzeit, Diffusität, etc.) oder Abscheidungsparameter (z.B. Zeit, Konzentration, etc.) auf Basis des aktiven Feedbacks der gemessenen Parameter an die Ätz- bzw. Abscheidungswerkzeuge angepasst. In einigen Beispielen werden Korrekturen an Prozessparametern, die aufgrund gemessener asymmetrischer Parameter ermittelt wurden, an ein Lithographiewerkzeug, ein Ätzwerkzeug, ein Abscheidewerkzeug, etc. übermittelt. Als Reaktion darauf passt ein Fertigungswerkzeug einen Kontrollparameter des Halbleiterherstellungsprozesses an, um strukturelle Defekte zu reduzieren, die durch die gemessene Asymmetrie charakterisiert sind.

[0112] Wie hier beschrieben, umfasst der Begriff „kritische Dimension“ jede kritische Dimension einer Struktur (z.B. untere kritische Dimension, mittlere kritische Dimension, obere kritische Dimension, Seitenwandwinkel, Gitterhöhe usw.), eine kritische Dimension zwischen zwei oder mehr Strukturen (z.B. Abstand zwischen zwei Strukturen) und eine Verschiebung zwischen zwei oder mehr Strukturen (z.B. Overlayverschiebung zwischen übereinander liegenden Gitterstrukturen usw.). Zu den Strukturen können dreidimensionale Strukturen, gemusterte Strukturen, Überlagerungsstrukturen usw. gehören.

[0113] Wie hier beschrieben, schließt der Begriff „Kritische-Dimensions-Anwendung“ oder " Kritische-Dimensions-Messanwendung" jede kritische Dimensionsmessung ein.

[0114] Wie hier beschrieben, umfasst der Begriff „Metrologiesystem“ jedes System, das zumindest teilweise zur Charakterisierung einer Probe in irgendeinem Aspekt eingesetzt wird, einschließlich Messanwendungen wie z.B. Messung kritischer Dimensionen, Overlay-Messtechnik, Fokus-/Dosierungsmesstechnik und Zusammensetzungsmesstechnik. Diese Fachbegriffe schränken jedoch nicht den Bedeutungsumfang des Begriffs „Metrologiesystem“, wie hier beschrieben, ein. Darüber hinaus kann das Metrologiesystem 100 für die Messung von strukturierten Wafern und/oder unstrukturierten Wafern konfiguriert werden. Das Metrologiesystem kann als LED-Prüfwerkzeug, Kantenprüfwerkzeug, Rückseitenprüfwerkzeug, Makroprüfwerkzeug oder Multimodus-Prüfwerkzeug (mit Daten von einer oder mehreren Plattformen gleichzeitig) sowie als jedes andere Mess- oder Prüfwerkzeug konfiguriert werden, das von der Kalibrierung von Systemparametern auf der Grundlage von Daten zu kritischen Abmessungen profitiert.

[0115] Hier werden verschiedene Ausführungsformen eines Halbleitermesssystems beschrieben, das für die Messung einer Probe innerhalb eines beliebigen Halbleiterbearbeitungswerkzeugs (z.B. eines Inspektionssystems oder eines Lithographiesystems) verwendet werden kann. Der Begriff „Probe“ bezieht sich hier auf einen Wafer, ein Retikel oder jede andere Probe, die mit den in der Technik bekannten Mitteln bearbeitet (z.B. gedruckt oder auf Fehler geprüft) werden kann.

[0116] Der hier verwendete Begriff „Wafer“ bezieht sich im Allgemeinen auf Substrate, die aus einem Halbleiter- oder Nicht-Halbleitermaterial bestehen. Beispiele sind unter anderem einkristallines Silizium, Galliumarsenid und Indiumphosphid. Solche Substrate können üblicherweise in Halbleiterfertigungsanlagen vorgefunden und/oder verarbeitet werden. In einigen Fällen kann ein Wafer nur das Substrat umfassen (d.h. ein blanker Wafer). Alternativ kann ein Wafer eine oder mehrere Schichten aus verschiedenen Materialien enthalten, die auf einem Substrat gebildet werden. Eine oder mehrere Schichten, die auf einem Wafer gebildet werden, können „gemustert“ oder „ungemustert“ sein. Zum Beispiel kann ein Wafer eine Vielzahl von Dies mit wiederholbaren Mustermerkmalen enthalten.

[0117] Ein „Retikel“ kann ein Retikel in jeder Phase eines Retikelherstellungsprozesses sein, oder ein fertiges Retikel, das zur Verwendung in einer Halbleiterfertigungsanlage freigegeben werden kann oder nicht. Ein Retikel oder eine „Maske“ wird im Allgemeinen als ein im Wesentlichen transparentes Substrat mit darauf ausgebildeten, im Wesentlichen undurchsichtigen Bereichen definiert, die in einem Muster konfiguriert sind.

Das Substrat kann z.B. ein Glasmaterial wie amorphes SiO2 enthalten. Ein Retikel kann während eines Belichtungsschritts eines Lithographieprozesses über einem mit einem Fotolack bedeckten Wafer angeordnet werden, so dass das Muster auf dem Retikel auf den Fotolack übertragen werden kann.

[0118] Eine oder mehrere Schichten, die auf einem Wafer gebildet sind, können gemustert oder ungemustert sein. Zum Beispiel kann ein Wafer eine Vielzahl von Dies enthalten, von denen jeder wiederholbare Mustermerkmale aufweist. Die Bildung und Verarbeitung solcher Materialschichten kann schließlich zu fertigen Bauelementen führen. Viele verschiedene Arten von Bauelementen können auf einem Wafer gebildet werden, und der Begriff Wafer, wie er hier verwendet wird, soll einen Wafer umfassen, auf dem jede Art von Bauelement, das in der Technik bekannt ist, hergestellt wird.

[0119] In einer oder mehreren beispielhaften Ausführungsformen können die beschriebenen Funktionen in Hardware, Software, Firmware oder einer beliebigen Kombination davon implementiert sein. Wenn sie in Software implementiert sind, können die Funktionen auf einem computerlesbaren Medium gespeichert oder als eine oder mehrere Anweisungen oder Codes übertragen werden. Zu den computerlesbaren Medien gehören sowohl Computerspeichermedien als auch Kommunikationsmedien einschließlich aller Medien, die die Übertragung eines Computerprogramms von einem Ort zum anderen erleichtern. Ein Speichermedium kann jedes verfügbare Medium sein, auf das ein Universal- oder Spezialcomputer zugreifen kann. Als Beispiel, und ohne Einschränkung, können solche computerlesbaren Medien RAM, ROM, EEPROM, CD-ROM oder andere optische Plattenspeicher, Magnetplattenspeicher oder andere magnetische Speichergeräte oder jedes andere Medium umfassen, das zum Übertragen oder Speichern gewünschter Programmcode-Mittel in Form von Befehlen oder Datenstrukturen verwendet werden kann und auf das ein Universal- oder Spezialcomputer oder ein Universal- oder Spezialprozessor zugreifen kann. Auch jede Verbindung wird korrekterweise als computerlesbares Medium bezeichnet. Wenn die Software beispielsweise von einer Website, einem Server oder einer anderen entfernten Quelle über ein Koaxialkabel, Glasfaserkabel, eine verdrillte Zweidrahtleitung, eine Digital Subscriber Line (DSL) oder drahtlose Technologien wie Infrarot, Funk und Mikrowelle übertragen wird, dann sind Koaxialkabel, Glasfaserkabel, verdrillte Zweidrahtleitung, DSL oder drahtlose Technologien wie Infrarot, Funk und Mikrowelle in der Definition des Mediums enthalten. Disk und Disc, wie hier verwendet, umfasst Compact Disc (CD), Laserdisc, Optical Disc, Digital Versatile Disc (DVD), Floppy Disk und Blu-ray Disc, wobei Disks Daten normalerweise magnetisch wiedergeben, während Discs Daten optisch mit Lasern wiedergeben. Kombinationen der oben genannten Elemente sollten ebenfalls in den Bedeutungsumfang der computerlesbaren Medien einbezogen werden.

Patentansprüche

1. Metrologiesystem (100), umfassend:

eine Beleuchtungsquelle (110), die konfiguriert ist, um eine Menge an optischer Breitbandstrahlung (117) zu erzeugen;

ein oder mehrere optische Elemente, die die Menge an optischer Breitbandstrahlung (117) von der Beleuchtungsquelle (110) zu einem Messpunkt (116) auf einer Oberfläche eines Halbleiterwafers (120) unter jedem von zwei oder mehr Azimutwinkeln (AZ) lenken;

ein Spektrometer (126), das konfiguriert ist, um eine Menge an Messlicht als Reaktion auf das Beleuchten des Halbleiterwafers (120) unter jedem der zwei oder mehr Azimutwinkel (AZ) von dem Halbleiterwafer (120) zu detektieren, und eine gemessene Spektralantwort einer interessierenden Struktur auf die Beleuchtung zu bestimmen, basierend auf jeder erfassten Menge an Messlicht, wobei jede gemessene Spektralantwort Spektren enthält, die mit mehreren Elementen einer Müller-Matrix assoziiert sind;

und ein Computersystem (130), das konfiguriert ist zum:

Schätzen von Werten eines oder mehrerer kritischer Dimensionsparameter, die die interessierende Struktur charakterisieren, basierend auf einer Anpassung einer modellierten Spektralantwort an die gemessenen Spektralantworten, die den zwei oder mehr Azimutwinkeln (AZ) zugeordnet sind;

Wählen eines oder mehrerer Teilbereiche von Wellenlängen mindestens eines Spektrums eines oder mehrerer nicht-diagonaler Elemente der Müller-Matrix, die mit jeder gemessenen Spektralantwort assoziiert sind;

Integrieren des mindestens einen Spektrums des einen oder der mehreren nicht-diagonalen Elemente der Müller-Matrix über die ausgewählten einen oder mehreren Teilbereiche von Wellenlängen, um eine oder mehrere Spektralantwort-Metriken zu erzeugen; und

Schätzen von Werten eines oder mehrerer geometrischer Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur beschreiben, basierend auf den Werten des einen oder der mehreren kritischen Dimensionsparameter und der einen oder der mehreren Spektralantwort-Metriken.

2. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei das Computersystem (130) ferner konfiguriert ist zum:
Übermitteln der Werte des einen oder der mehreren geometrischen Parameter an ein Halbleiterfertigungswerkzeug, wobei das Halbleiterfertigungswerkzeug einen Steuerparameter eines Halbleiterfertigungsprozesses basierend auf den Werten des einen oder der mehreren geometrischen Parameter anpasst, um Strukturfehler zu reduzieren, die durch die gemessene Asymmetrie gekennzeichnet sind.

3. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei die zwei oder mehr Azimutwinkel (AZ) zwei zueinander senkrechte Azimutwinkel (AZ) umfassen.

4. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei das eine oder die mehreren nicht-diagonalen Elemente der Müller-Matrix das M_{30}-Element der Müller-Matrix umfassen.

5. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei das eine oder die mehreren nicht-diagonalen Elemente der Müller-Matrix eine Summe der M_{20}- und M_{02}-Elemente der Müller-Matrix enthalten.

6. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei das Auswählen des einen oder der mehreren Teilbereiche von Wellenlängen mindestens eines Spektrums eines oder mehrerer nicht-diagonaler Elemente der Müller-Matrix das Auswählen eines oder mehrerer Teilbereiche von Wellenlängen beinhaltet, mit einer Spektralantwort, die einen vorbestimmten Schwellenwert (T) innerhalb des einen oder der mehreren Teilbereiche von Wellenlängen überschreitet.

7. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei das Schätzen der Werte des einen oder der mehreren geometrischen Parameter auf mehreren Spektralantwort-Metriken basiert, wobei jede der mehreren Spektralantwort-Metriken unterschiedlich gewichtet wird.

8. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei der eine oder die mehreren geometrischen Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur beschreiben, einen Neigungswinkel (TA) und / oder einen Orientierungswinkel (OA) eines Lochmerkmals (150) umfassen.

9. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei die interessierende Struktur eine Speicherstruktur mit hohem Seitenverhältnis ist.

10. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei das Schätzen der Werte des einen oder der mehreren geometrischen Parameter ein trainiertes Neuronales-Netzwerk-Modell beinhaltet, das die Werte des einen oder der mehreren kritischen Dimensionsparameter und der einen oder der mehreren Spektralantwort-Metriken mit den Werten des einen oder der mehreren geometrischen Parameter in Beziehung setzt.

11. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 1, wobei das Schätzen der Werte des einen oder der mehreren geometrischen Parameter ein lineares Regressionsmodell umfasst, das die Werte des einen oder der mehreren kritischen Dimensionsparameter und der einen oder der mehreren Spektralantwort-Metriken mit dem einen oder den mehreren geometrischen Parametern in Beziehung setzt.

12. Verfahren, umfassend:
Beleuchten einer auf einem Halbleiterwafer (120) hergestellten interessierenden Struktur mit einer Menge an optischer Breitbandstrahlung (117) bei jedem von zwei oder mehr Azimutwinkeln (AZ);
Detektieren einer Menge an Messlicht von dem Halbleiterwafer (120) als Reaktion auf das Beleuchten des Halbleiterwafers (120) bei jedem der zwei oder mehr Azimutwinkel (AZ);
Bestimmen einer gemessenen Spektralantwort der interessierenden Struktur auf die Beleuchtung, die bei jedem der zwei oder mehr Azimutwinkel (AZ) bereitgestellt wird, basierend auf jeder erfassten Menge an Messlicht, wobei jede gemessene Spektralantwort Spektren enthält, die mehreren Elementen einer Müller-Matrix zugeordnet sind;
Schätzen von Werten eines oder mehrerer kritischer Dimensionsparameter basierend auf einer Anpassung einer modellierten Spektralantwort an die gemessenen Spektralantworten, die den zwei oder mehr Azimutwinkeln (AZ) zugeordnet sind;
Auswählen eines oder mehrerer Teilbereiche von Wellenlängen von mindestens einem Spektrum von einem oder mehreren nicht-diagonalen Elementen der Müller-Matrix, die mit jeder gemessenen Spektralantwort assoziiert sind;
Integrieren des mindestens einen Spektrums des einen oder der mehreren nicht-diagonalen Elemente der Müller-Matrix über den einen oder die mehreren ausgewählten Teilbereiche von Wellenlängen, um eine

oder mehrere Spektralantwort-Metriken zu erzeugen; und
Schätzen von Werten eines oder mehrerer geometrischer Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur beschreiben, basierend auf den Werten des einen oder der mehreren kritischen Dimensionsparameter und der einen oder der mehreren Spektralantwort-Metriken.

13. Verfahren nach Anspruch 12, ferner umfassend:
Übermitteln der Werte des einen oder der mehreren geometrischen Parameter an ein Halbleiterfertigungswerkzeug, wobei das Halbleiterfertigungswerkzeug einen Steuerparameter eines Halbleiterfertigungsprozesses basierend auf den Werten des einen oder der mehreren geometrischen Parameter anpasst, um durch die gemessene Asymmetrie charakterisierte Strukturfehler zu reduzieren.

14. Verfahren nach Anspruch 12, wobei die zwei oder mehr Azimutwinkel (AZ) zwei zueinander senkrechte Azimutwinkel (AZ) umfassen.

15. Verfahren nach Anspruch 12, wobei das Auswählen des einen oder der mehreren Teilbereiche von Wellenlängen mindestens eines Spektrums eines oder mehrerer nicht-diagonaler Elemente der Müller-Matrix das Auswählen eines oder mehrerer Teilbereiche von Wellenlängen mit einer Spektralantwort beinhaltet, die einen vorbestimmten Schwellenwert (T) innerhalb des einen oder der mehreren Teilbereiche von Wellenlängen überschreitet.

16. Verfahren nach Anspruch 12, wobei das eine oder die mehreren nicht-diagonalen Elemente der Müller-Matrix eine Summe von mindestens zwei Elementen der Müller-Matrix enthalten.

17. Verfahren nach Anspruch 12, wobei das Schätzen der Werte eines oder mehrerer geometrischer Parameter ein trainiertes Neuronales-Netzwerk-Modell beinhaltet, das den einen oder die mehreren geometrischen Parameter mit den Werten des einen oder der mehreren kritischen Dimensionsparameter und der einen oder den mehreren Spektralantwort-Metriken in Beziehung setzt.

18. Verfahren nach Anspruch 12, wobei das Schätzen der Werte eines oder mehrerer geometrischer Parameter ein lineares Regressionsmodell beinhaltet, das den einen oder die mehreren geometrischen Parameter mit den Werten des einen oder der mehreren kritischen Dimensionsparameter und der einen oder den mehreren Spektralantwort-Metriken in Beziehung setzt.

19. Metrologiesystem (100), umfassend:
ein oder mehrere optische Elemente, die eine Menge an optischer Breitbandstrahlung (117) von einer Beleuchtungsquelle (110) zu einem Messpunkt (116) auf einer Oberfläche eines Halbleiterwafers (120) lenken;
ein Spektrometer (126), das konfiguriert ist, um eine Menge an Messlicht von dem Halbleiterwafer (120) als Reaktion auf das Beleuchten des Halbleiterwafers (120) zu erfassen und eine gemessene Spektralantwort einer interessierenden Struktur basierend auf der erfassten Menge an Messlicht zu bestimmen, wobei die gemessene Spektralantwort Spektren enthält, die mit mehreren Elementen einer Müller-Matrix assoziiert sind;
und ein computerlesbares Medium (132) mit Anweisungen (134), die, wenn sie von einem oder mehreren Prozessoren (131) ausgeführt werden, den einen oder die mehreren Prozessoren (131) veranlassen zum:
Schätzen von Werten eines oder mehrerer kritischer Dimensionsparameter auf der Grundlage einer Anpassung einer modellierten Spektralantwort an die gemessene Spektralantwort;
Wählen eines oder mehrerer Teilbereiche von Wellenlängen mindestens eines Spektrums eines oder mehrerer nicht-diagonaler Elemente der Müller-Matrix, die der gemessenen Spektralantwort zugeordnet sind;
Integrieren des mindestens einen Spektrums des einen oder der mehreren nicht-diagonalen Elemente der Müller-Matrix über den einen oder die mehreren ausgewählten Teilbereiche von Wellenlängen, um eine oder mehrere Spektralantwort-Metriken zu erzeugen; und
Schätzen von Werten eines oder mehrerer geometrischer Parameter, die ein asymmetrisches Merkmal der interessierenden Struktur beschreiben, basierend auf den Werten des einen oder der mehreren kritischen Dimensionsparameter und der einen oder den mehreren Spektralantwort-Metriken.

20. Metrologiesystem (100) nach Anspruch 19, wobei das computerlesbare Medium (132) ferner Anweisungen umfasst, die, wenn sie von dem einen oder den mehreren Prozessoren (131) ausgeführt werden, den einen oder die mehreren Prozessoren (131) veranlassen zum Übermitteln der Werte des einen oder der mehreren geometrischen Parameter an ein Halbleiterfertigungswerkzeug, wobei das Halbleiterfertigungswerkzeug einen Steuerparameter eines Halbleiterfertigungsprozesses basierend auf den Werten des

einen oder der mehreren geometrischen Parameter anpasst, um Strukturfehler, die durch die gemessene Asymmetrie gekennzeichnet sind, zu reduzieren.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

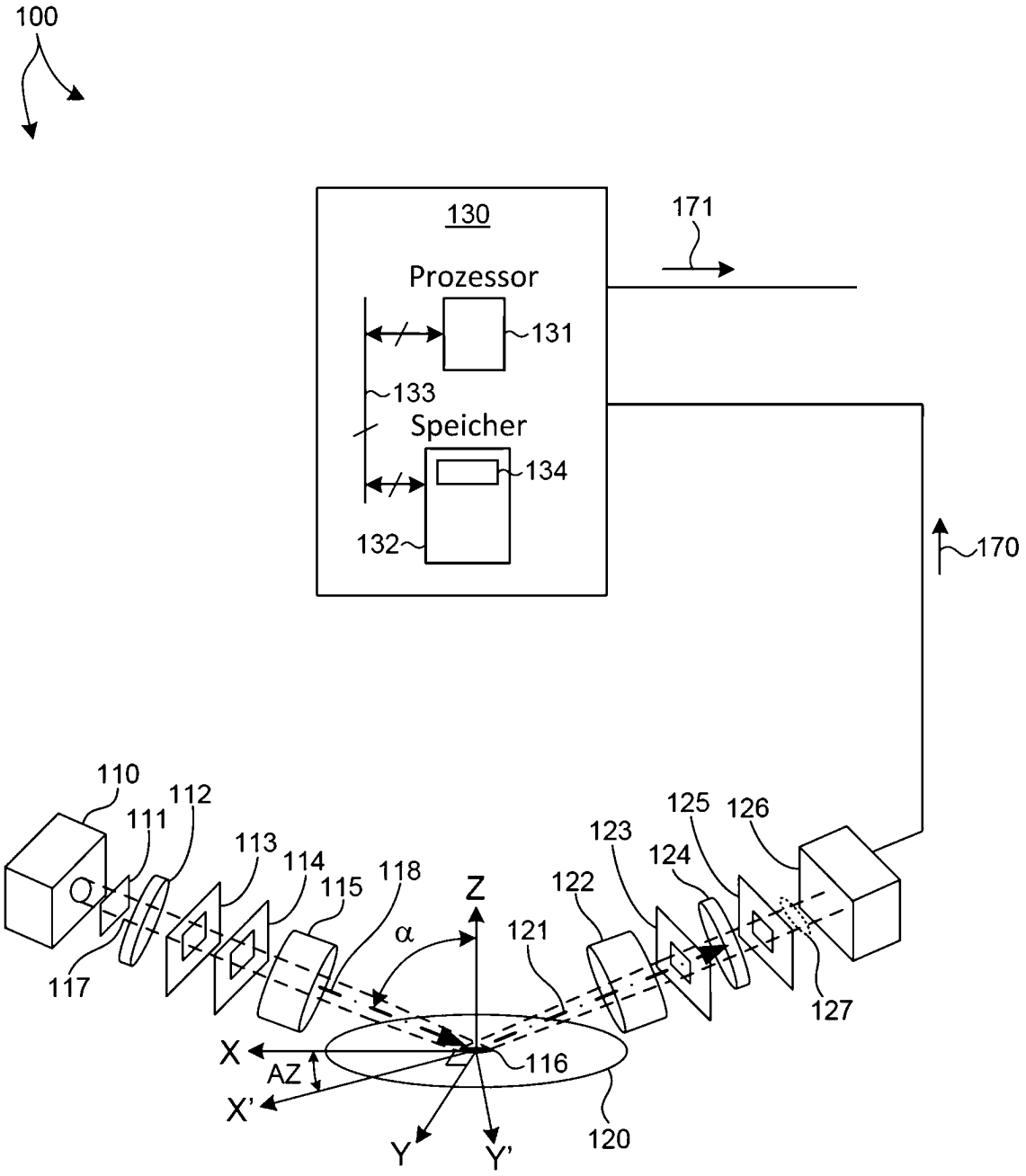


FIG. 1

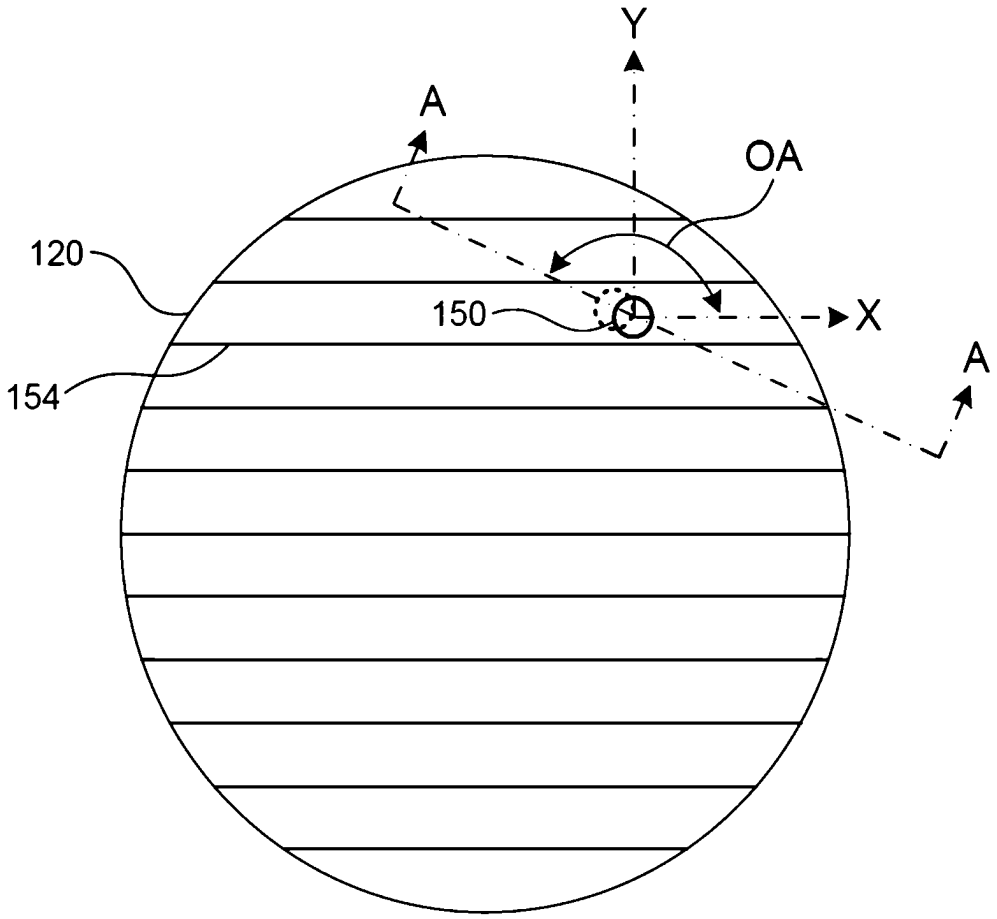


FIG. 2

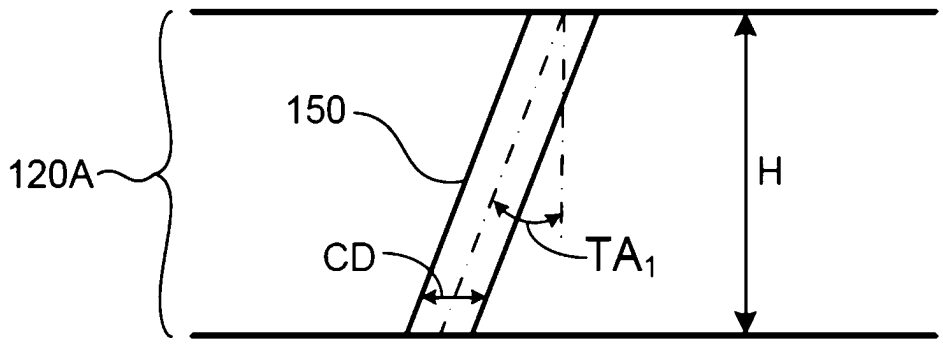


FIG. 3

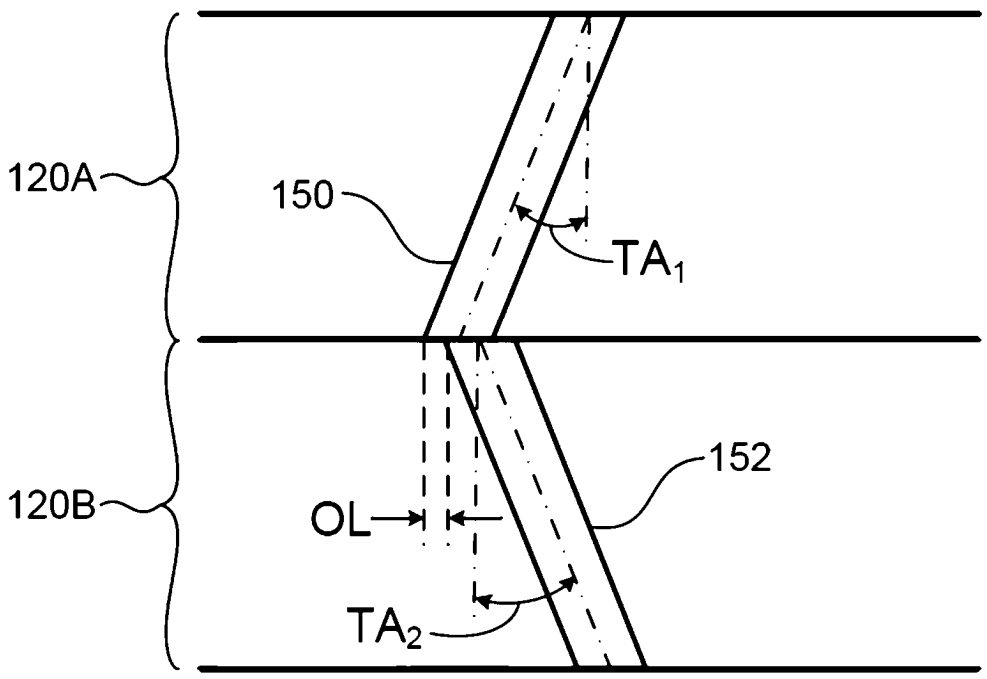


FIG. 4

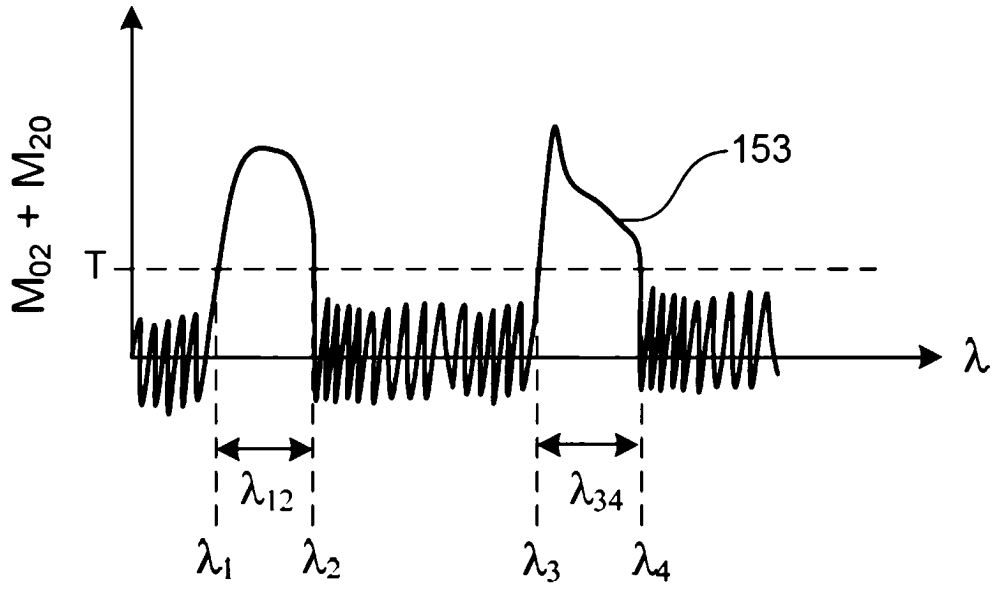


FIG. 5

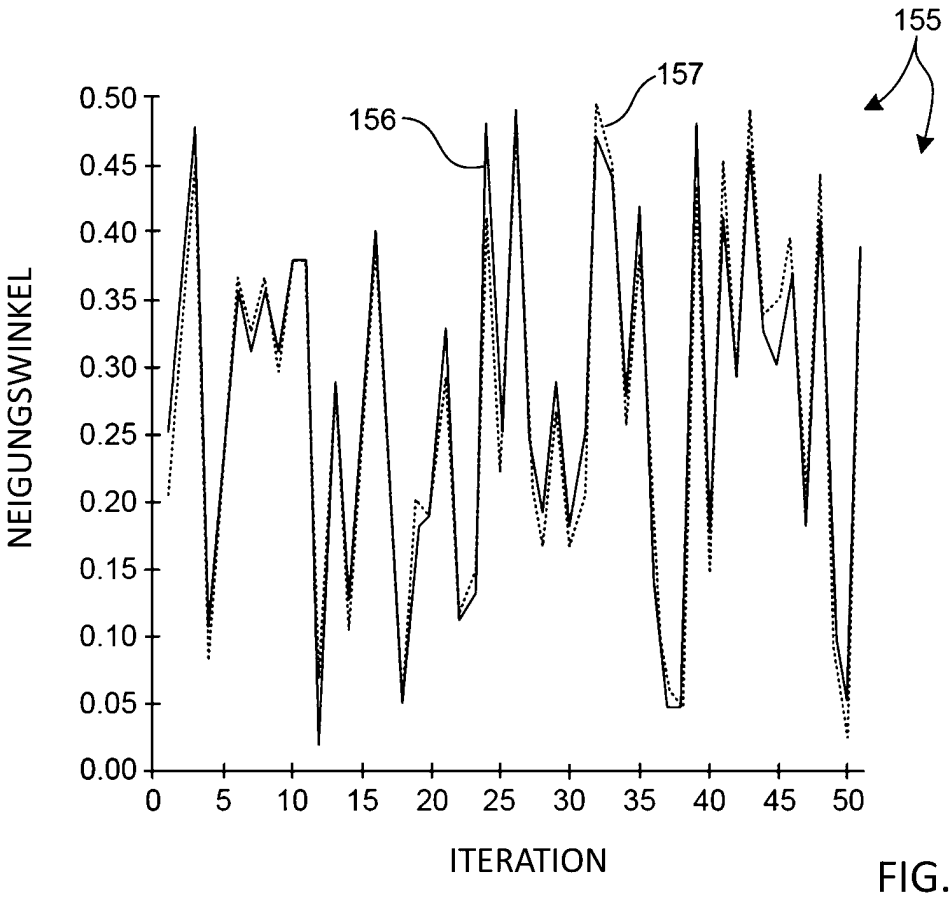

155
157
156
NEIGUNGSWINKEL
0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
ITERATION

FIG. 6

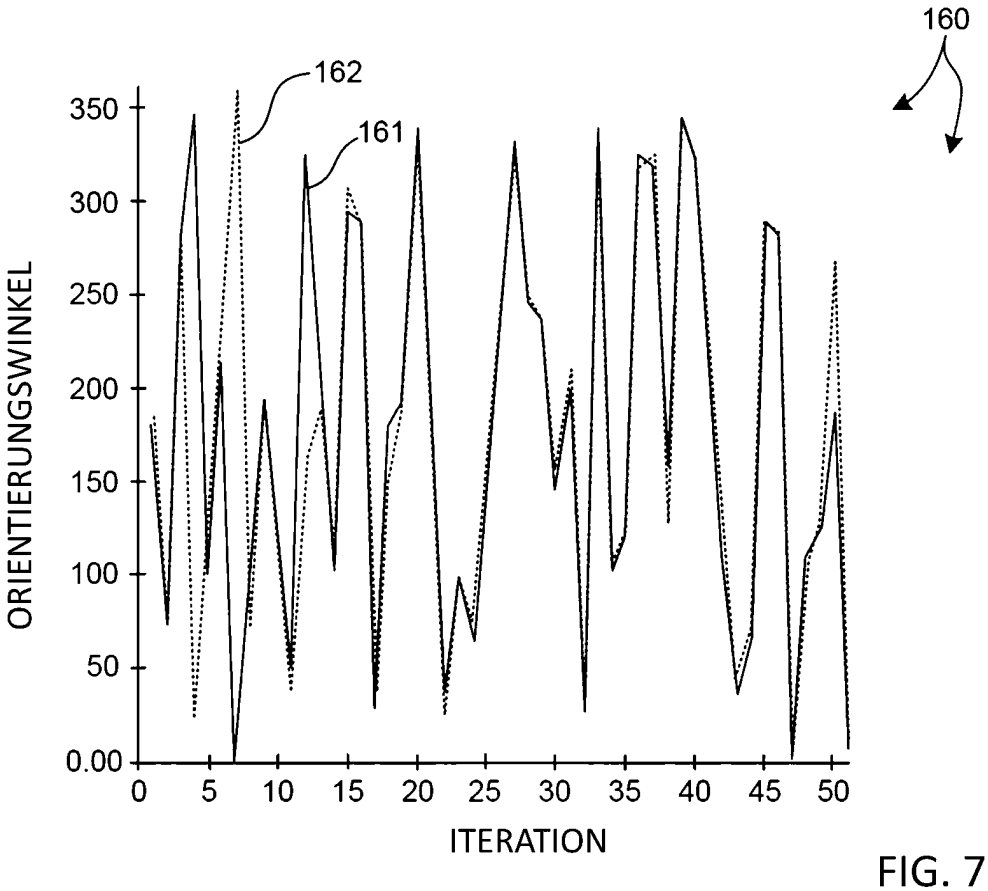

160
162
161
ORIENTIERUNGSWINKEL
350
300
250
200
150
100
50
0.00
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
ITERATION

FIG. 7

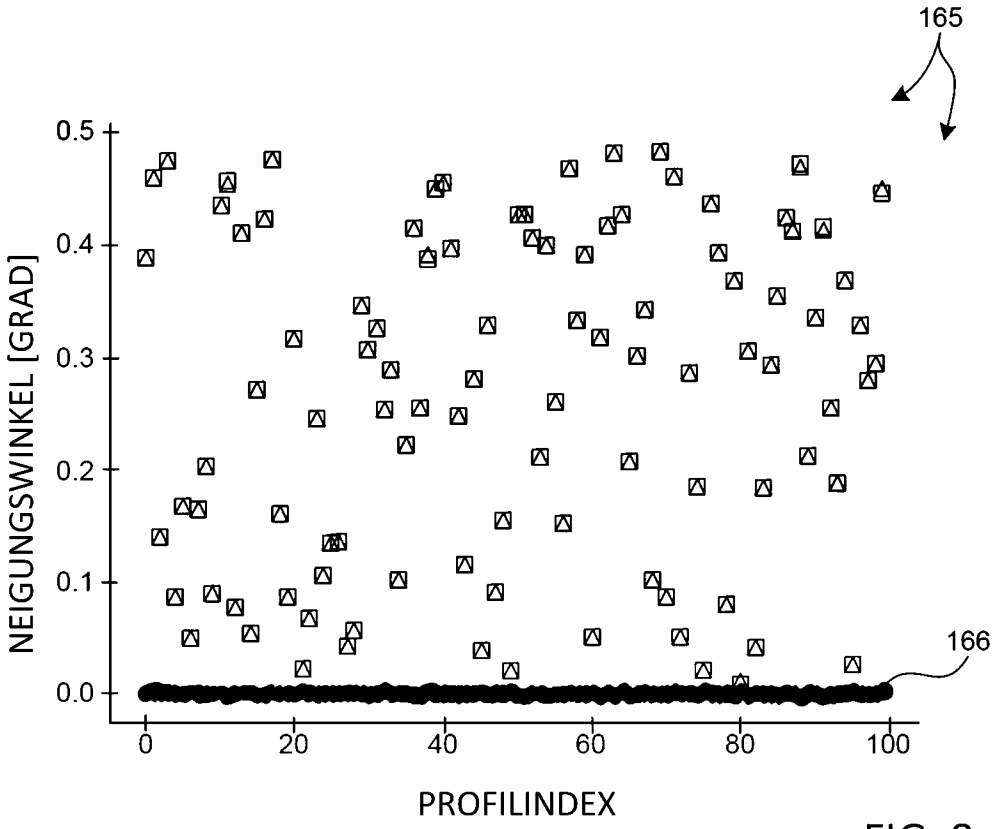

165
166
NEIGUNGSWINKEL [GRAD]
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0
20
40
60
80
100
PROFILINDEX

FIG. 8

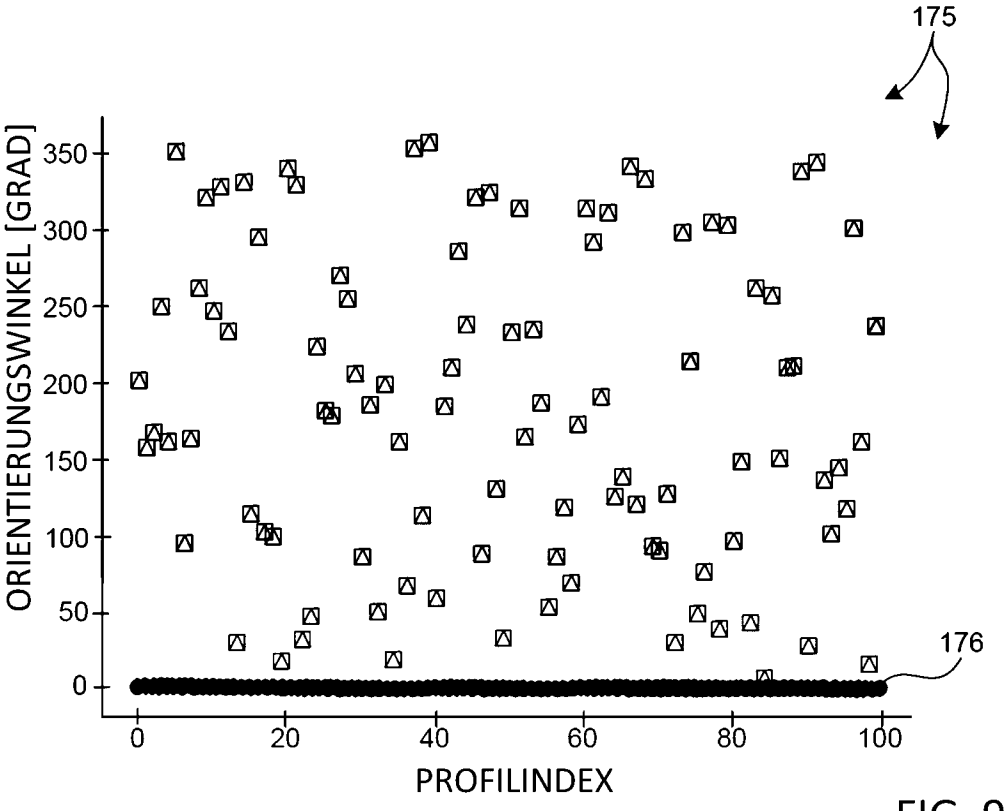

175
176
ORIENTIERUNGSWINKEL [GRAD]
350
300
250
200
150
100
50
0
0
20
40
60
80
100
PROFILINDEX

FIG. 9

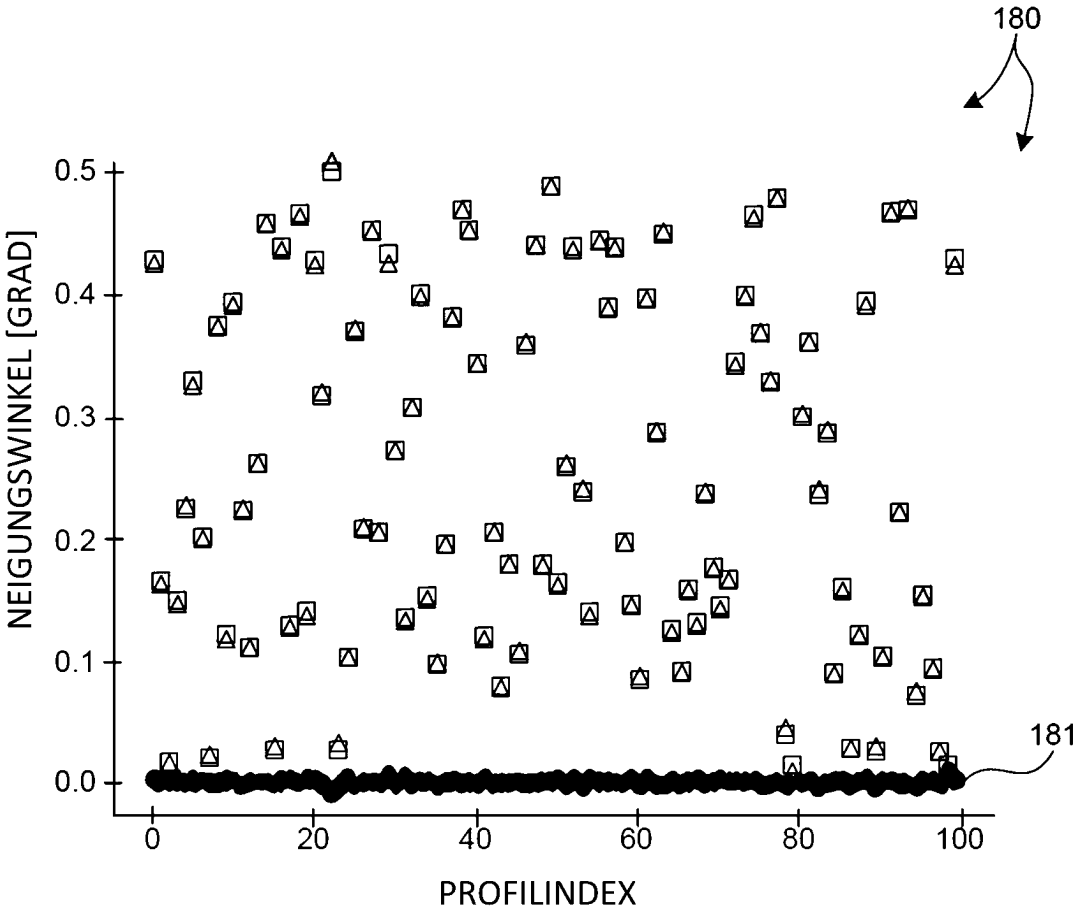

180
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
NEIGUNGSWINKEL [GRAD]
0
20
40
60
80
100
PROFILINDEX
181

FIG. 10

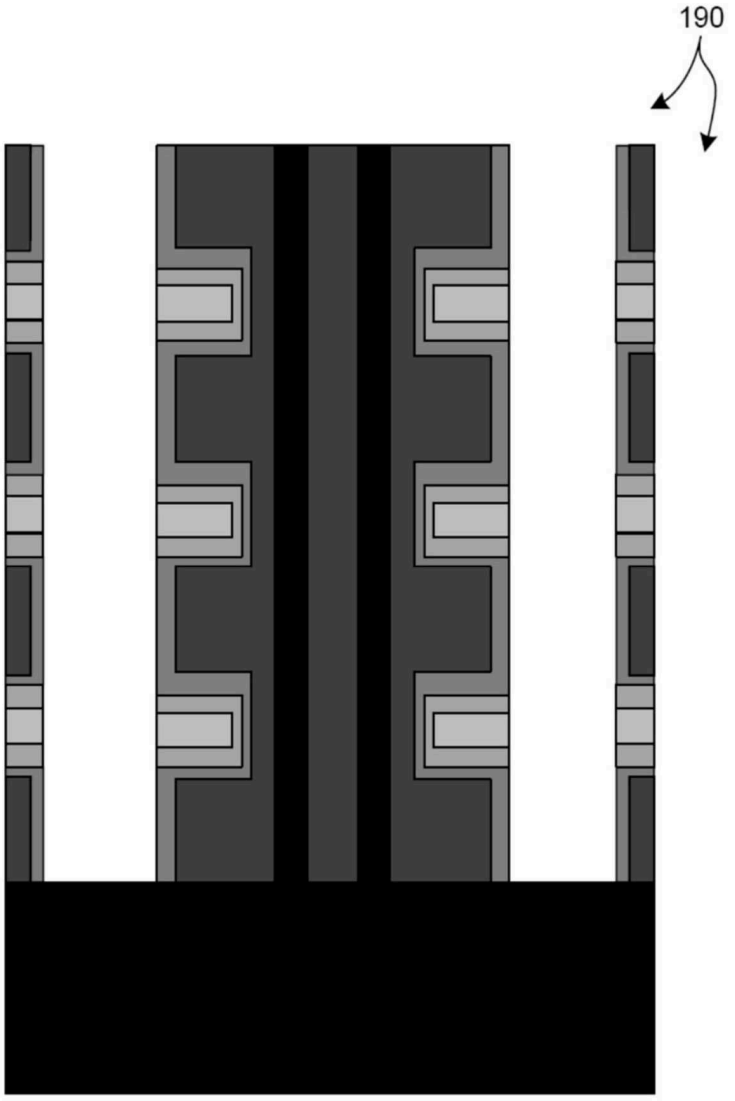


FIG. 11

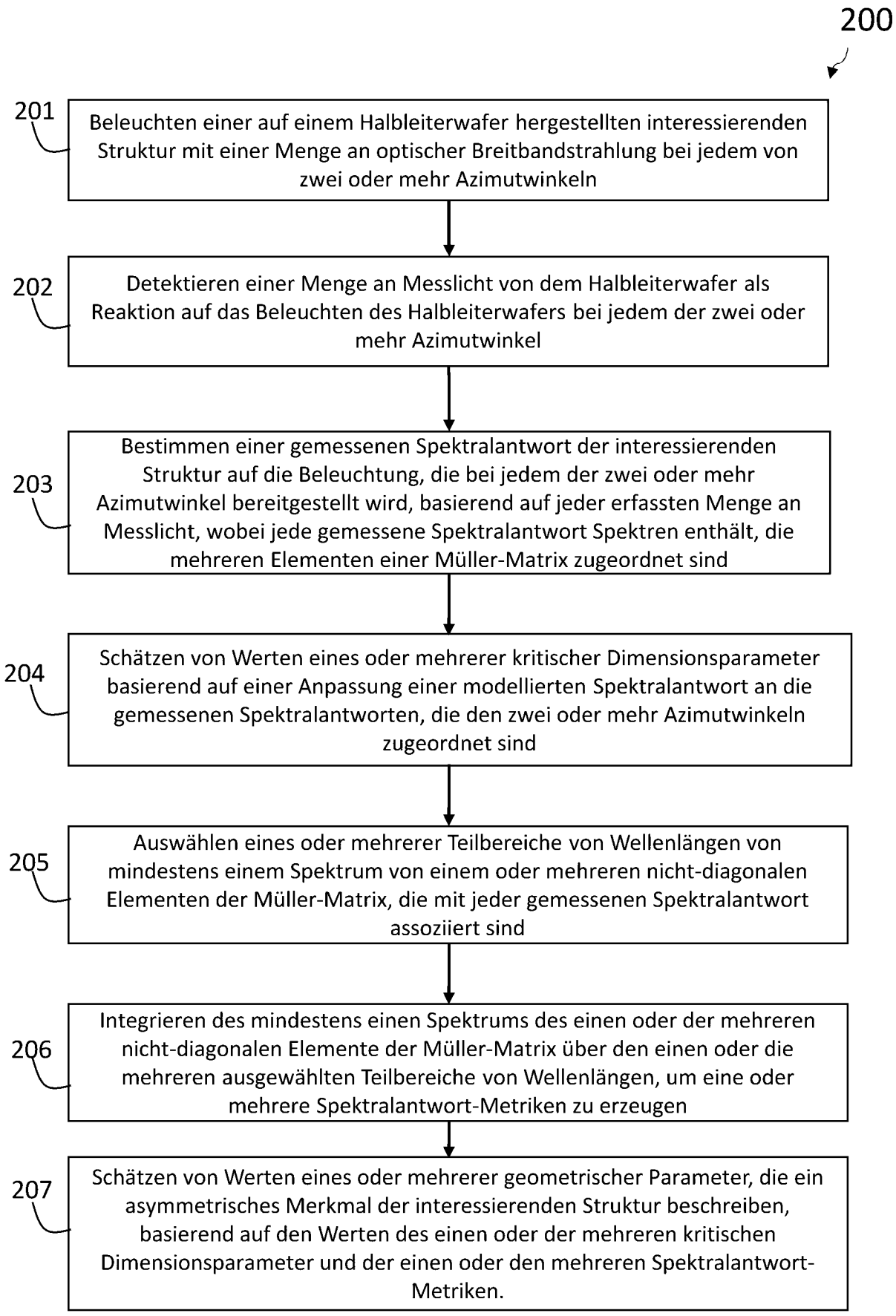


FIG. 12

 Das Dokument wurde durch die Firma Luminess hergestellt.