



(12) **Patentschrift**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2017 001 913.3**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2017/025780**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2017/176649**
(86) PCT-Anmeldetag: **03.04.2017**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **12.10.2017**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **13.12.2018**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **27.03.2025**

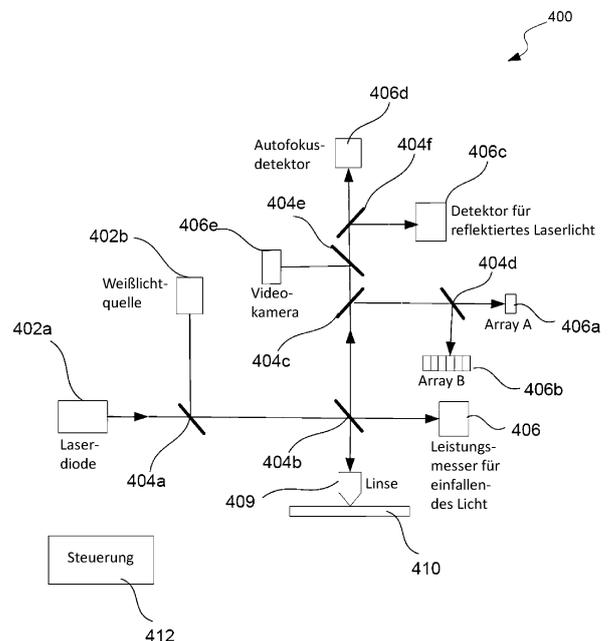
(51) Int Cl.: **H01L 21/66 (2006.01)**
H01L 21/768 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

| | |
|--|---|
| (30) Unionspriorität: 15/091,522 05.04.2016 US | (72) Erfinder: Nicolaides, Lena, Castro Valley, Calif., US; Goodwin, Timothy, Mountain View, Calif., US; Tan, Raul, Milpitas, CA, US; Li, Shifang, Pleasanton, Calif., US |
| (73) Patentinhaber: KLA-Tencor Corporation, Milpitas, Calif., US | (56) Ermittelter Stand der Technik: US 2014 / 0 222 380 A1 WO 2013 / 169 791 A1 |
| (74) Vertreter: Reichert & Lindner Partnerschaft Patentanwälte, 93049 Regensburg, DE | |

(54) Bezeichnung: **VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR MESSUNG VON EIGENSCHAFTEN IN EINER TSV-STRUKTUR UNTER VERWENDUNG VON STRAHLPROFILREFLEKTOMETRIE**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Messung einer Eigenschaft einer Silizium-Durchkontaktierungsstruktur, im Folgenden TSV-Struktur genannt, das Verfahren umfassend: Verwenden einer Strahlprofilreflektivitätsvorrichtung, im Folgenden BPR-Vorrichtung genannt, (400) um sich zu einer ersten xy-Position zu bewegen, die eine TSV-Struktur hat; Verwenden der BPR-Vorrichtung (400), um einen optimalen Fokus bei der ersten xy-Position zu erzielen, indem die z-Position auf eine erste optimale z-Position zum Erhalt von Messdaten bei der ersten xy-Position eingestellt wird; Erhalten von Reflektivitätsmessdaten über die BPR-Vorrichtung (400), für eine Vielzahl von Einfallswinkeln bei der ersten xy-Position; und Bestimmen einer oder mehrerer Schichtdicken für die TSV-Struktur auf Grundlage der Reflektivitätsmessdaten.



Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET DER ERFINDUNG

[0001] Die Erfindung betrifft allgemein das Gebiet von Systemen zur Wafermetrologie und Inspektion. Genauer betrifft die vorliegende Erfindung Metrologietechniken für TSV-Strukturen (Through-Silicon Via, Silizium-Durchkontaktierung).

HINTERGRUND

[0002] Allgemein involviert die Halbleiterherstellungsindustrie hochkomplexe Techniken zur Herstellung integrierter Schaltkreise unter Verwendung von Halbleitermaterialien, die in Schichten und strukturiert auf ein Substrat, etwa Silizium, aufgebracht werden. Ein integrierter Schaltkreis wird gewöhnlich ausgehend von einer Vielzahl von Retikeln hergestellt. Die Erzeugung von Retikeln und die anschließende optische Inspektion solcher Retikel sind zu Standardschritten in der Herstellung von Halbleitern geworden. Die Herstellung von Halbleiterbauelementen, etwa Logik- und Speicherbauelementen, beinhaltet es typischerweise, einen Halbleiterwafer unter Verwendung einer großen Anzahl von Halbleiterherstellungsprozessen zu bearbeiten, mit mehreren Retikeln um verschiedene Strukturen und mehrere Ebenen der Halbleiterbauelemente zu bilden. Mehrere Halbleiterbauelemente können in einer Anordnung auf einem einzigen Halbleiterwafer hergestellt und dann in einzelne Halbleiterbauelemente getrennt werden.

[0003] Falls auf dem Retikel oder Wafer Defekte vorliegen, kann es sein, dass die sich ergebenden Halbleiterbauelemente nicht richtig funktionieren. Zusätzlich müssen verschiedene Strukturen auf dem Wafer vorgegebenen Spezifikationen genügen oder zum Zwecke der Qualitätskontrolle überwacht werden. Daher besteht andauernder Bedarf an verbesserten Messmechanismen.

[0004] Die US 2014 / 0 222 380 A1 betrifft ein Verfahren zur elektromagnetischen Modellierung von Strukturen und deren Beleuchtung, zur Anwendung in Bereichen der Halbleiter-Metrologie und -Inspektion.

[0005] Die WO 2013 / 169 791 A1 betrifft die gleichzeitige Anwendung von optischer Scatterometrie und Röntgen-Kleinwinkelstreuung im Kontext von Metrologieanwendungen an Proben aus der Halbleiterindustrie.

ÜBERSICHT

[0006] Das Folgende bietet eine vereinfachte Übersicht der Offenbarung, um ein grundsätzliches Verständnis bestimmter Ausführungsformen der Erfindung zu ermöglichen. Dies ist keine umfassende Übersicht der Offenbarung und identifiziert keine Schlüsselemente oder kritischen Elemente der Erfindung und umreißt nicht den Umfang der Erfindung. Ihr einziger Zweck ist, einige hierin offenbarte Konzepte in vereinfachter Form vorzustellen, als eine Vorbereitung für die detailliertere Beschreibung, die folgt.

[0007] Eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Messung einer Eigenschaft einer Silizium-Durchkontaktierungsstruktur (TSV) werden offenbart. Eine Strahlprofilreflektivitäts-(BPR)-Vorrichtung wird verwendet, um sich zu einer ersten Position, (x, y) , zu bewegen, die eine TSV-Struktur hat. Die BPR-Vorrichtung wird dann verwendet, um einen optimalen Fokus bei der ersten Position, (x, y) , zu erhalten, indem die z-Position auf eine erste optimale z-Position eingestellt wird, um Messdaten bei der ersten Position, (x, y) , zu erhalten. Über die BPR-Vorrichtung werden Reflektivitätsmessdaten für eine Vielzahl an Einfallswinkeln (AOI, angle of incidence) bei der ersten Position (x, y) erhalten. Eine oder mehrere Schichtdicken auf der TSV-Struktur werden auf Grundlage der Reflektivitätsmessdaten bestimmt. Eine z-Position kann ebenfalls aufgezeichnet und verwendet werden, um eine Höhe einer solchen TSV-Struktur zu bestimmen, und ebenso eine oder mehrere benachbarte Positionen, (x, y) .

[0008] In einer bestimmten Ausführung wird die erste optimale z-Position von einem Kodierer des Tisches der BPR-Vorrichtung aufgezeichnet. Die BPR-Vorrichtung wird verwendet, um sich zu einer zweiten Position, (x, y) , neben der TSV-Struktur zu bewegen. Die BPR-Vorrichtung wird dann verwendet, um einen optimalen Fokus bei der zweiten Position, (x, y) , zu erzielen, indem die z-Position auf eine zweite optimale z-Position eingestellt wird, um Messdaten bei der zweiten Position, (x, y) , zu erhalten. Die zweite optimale z-Position von dem Kodierer des Tisches der BPR-Vorrichtung wird ebenfalls aufgezeichnet. Über die BPR-Vorrichtung werden Reflektivitätsmessdaten für eine Vielzahl an Einfallswinkeln bei der zweiten xy -Position erhalten. Eine oder mehrere Schichtdicken für die zweite Position, (x, y) , die der TSV-Struktur benachbart ist, werden auf Grundlage der Reflektivitätsmessdaten bestimmt. Eine Höhendifferenz zwischen der TSV-Struktur und der

zweiten Position, (x, y) , wird auf Grundlage der aufgezeichneten ersten und zweiten optimalen z-Position und der für die erste und zweite (x, y) -Position bestimmten Schichtdicken bestimmt. In einem Aspekt werden die Messdaten für die erste und zweite (x, y) -Position für s- und p-Polarisation gewonnen. In einem anderen Aspekt werden die Schichtdicken für die erste und zweite (x, y) -Position bestimmt, indem in einem Satz Fresnel-Gleichungen, von denen jede Reflektivität, Einfallswinkel und Dicke in Beziehung setzt, nach einem Satz von Fresnel-Koeffizienten gelöst wird. In einem weiteren Aspekt beinhaltet es die Lösung nach dem Satz Fresnel-Koeffizienten, eine Anpassroutine nach der Methode der kleinsten Quadrate auf den Satz Fresnel-Gleichungen anzuwenden, und eine Korrektur wegen der Absorptionseigenschaften einer oder mehrerer Schichten bei der ersten und zweiten (x, y) -Position vorzunehmen.

[0009] In einer anderen Ausführungsform werden für eine Vielzahl benachbarter (x, y) -Positionen die folgenden Vorgänge wiederholt: das Verwenden der BPR-Vorrichtung zum Bewegen, das Verwenden der BPR-Vorrichtung zum Erhalten eines optimalen Fokus, das Aufzeichnen einer optimalen z-Position, das Erhalten von Reflektivitätsmessdaten, das Bestimmen einer oder mehrerer Schichtdicken, und das Bestimmen von Höhenunterschieden, um eine Rauigkeitsmetrik für die Vielzahl der benachbarten (x, y) -Positionen zu erhalten. In einem weiteren Aspekt bedecken die benachbarten (x, y) -Positionen eine Fläche von 5-10 Mikrometer auf 5-10 Mikrometer und darüber.

[0010] In einer alternativen Ausführungsform bezieht sich die Erfindung auf ein Strahlprofilreflektivitäts-(BPR, beam profile reflectivity)-System zur Messung einer Eigenschaft einer Silizium-Durchkontaktierungs-(TSV)-Struktur. Das System beinhaltet ein Beleuchtungsoptikmodul zum Erzeugen und Richten eines einfallenden Strahls auf eine Probe unter einer Vielzahl von Einfallswinkeln, ein Erfassungsoptik-Modul zum Erhalten von Reflektivitätsmessdaten von der Probe in Antwort auf den einfallenden Strahl, und eine Steuerung, die dazu ausgebildet ist, einen oder mehrere der oben beschriebenen Verfahrensvorgänge auszuführen.

[0011] In einer anderen Ausführung wird ein Clustersystem zur Durchführung von Metrologie und Inspektion an einer Probe offenbart. Das Clustersystem beinhaltet eine Inspektionsvorrichtung zur Inspektion einer Probe auf Defekte, eine beliebige der oben beschriebenen Ausführungsformen eines BPR-Systems und ein Wafer-Handhabungssystem, um eine oder mehrere Proben zwischen der Inspektionsvorrichtung und dem BPR-System zu bewegen. In einer anderen Ausführungsform beinhaltet das Clustersystem eine Bearbeitungsvorrichtung zum Durchführen eines Herstellungsprozesses an einer Probe, und das Wafer-Handhabungssystem ist dazu ausgebildet, Proben zu der Bearbeitungsvorrichtung und davon weg zu bewegen.

[0012] Diese und andere Aspekte der Erfindung werden unten mit Bezugnahme auf die Figuren weiter beschrieben.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Fig. 1A ist eine diagrammatische Seitenansicht eines Substrat-Durchkontaktierungs-(TSV)-Prozesses, der die Abscheidung einer Verbindungsschicht auf einem Substrat und innerhalb einer Durchkontaktierung beinhaltet.

Fig. 1B ist eine diagrammatische Seitenansicht eines TSV-Prozesses nach Rückseitenätzung des Substrats.

Fig. 1C ist eine diagrammatische Seitenansicht eines TSV-Prozesses nach Rückseitenätzung des Substrats und Abscheidung einer Schicht über der TSV-Struktur.

Fig. 2 ist eine diagrammatische Draufsicht auf einen Wafer mit mehreren Dies mit mehreren TSV-Verbindungen auf ihrer Rückseite.

Fig. 3 ist eine diagrammatische Darstellung der einfallenden und ausgehenden Strahlen in einer Strahlprofilreflektometrie-(BPR)-Vorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

Fig. 4 ist eine detaillierte diagrammatische Darstellung einer Strahlprofilreflektometrie-(BPR)-Vorrichtung, in der Techniken der vorliegenden Erfindung eingesetzt werden können.

Fig. 5 zeigt die stark vergrößernde Abbildungsoptik für ein BPR-System gemäß einer Anwendung der vorliegenden Erfindung.

Fig. 6 ist ein Flussdiagramm, das ein Vorgehen zur Bestimmung von TSV-Maßen gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt.

Fig. 7A bis 7H zeigen einen Prozess zur Bestimmung der Schichtdicke unter Verwendung eines BPR-Systems.

Fig. 8A und 8B zeigen Varianten einer kombinierten Metrologie-InspektionsVorrichtung gemäß zwei Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung.

Fig. 9 zeigt eine Ausführungsform eines Systems zur Bereitstellung von Beleuchtung an einen Messkopf eines BPR-Systems, das eine Vielzahl an Beleuchtungsquellen gemäß einer bestimmten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung verwendet.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG VON BEISPIELEN VON AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0013] Die hierin beschriebenen Metrologie- und Inspektionstechniken können im Hinblick auf ein beliebiges geeignetes Exemplar umgesetzt werden. Ein Beispiel eines Exemplars ist eine Halbleiterstruktur, von der die Schichtdicke messbar ist, etwa eine Silizium-Durchkontaktierungs-(TSV)-Struktur. Exemplare können auch Halbleiterretikel, Solarpaneele, Computerplatten, etc. sein.

[0014] Ein TSV-Prozess wird gewöhnlich verwendet, um Kupferdurchkontaktierungen elektrisch zu isolieren. Eine TSV erstreckt sich gewöhnlich vollständig durch den Wafer oder den Die. TSVs verwenden Verbindungstechniken und bieten eine Alternative zu anderen Verbindungstechniken, etwa Drahtbonden oder Flip Chips. TSV-Verbindungen können eine vergleichsweise höhere Dichte haben und eine vergleichsweise kürzere Verbindungslänge bieten, zum Beispiel von einem Chip zu einer Platine.

[0015] **Fig. 1A** ist eine schematische Seitenansicht eines TSV-Prozesses. Wie gezeigt, wird ein Verbindungsmaterial 104, etwa Cu, auf einem Substrat 102 und innerhalb eines Durchkontaktierungsbereichs 104a abgeschieden. Die Durchkontaktierung kann durch einen beliebigen geeigneten Prozess gebildet werden, etwa Bohren oder Ätzen durch das Silizium. Die Durchkontaktierung kann eine beliebige geeignete Abmessung haben, etwa 100 bis 200 μm tief und 50-100 μm im Durchmesser. Das Substrat wird dann auf der Rückseite geätzt, um einen Teil des Verbindungsmaterials freizulegen, um eine Siliziumdurchkontaktierung (TSV) wie in **Fig. 1B** gezeigt zu bilden. Das Substrat 102 kann ursprünglich eine Dicke von ungefähr 750 μm haben und dann geätzt werden, um das Cu in der Durchkontaktierung freizulegen.

[0016] In einer Ausführungsform ist das Substrat 102 ein Siliziumwafersubstrat. In anderen Beispielen kann das Substrat ein beliebiges geeignetes Bulk-Halbleitermaterial beinhalten, etwa Germanium, Siliziumcarbid, Indiumarsenid, Galliumarsen, Indiumphosphat etc. Das Substrat 102 kann auch eine epitaktische Schicht über dem Bulk-Halbleitermaterial beinhalten. Die epitaktische Schicht kann eine Germaniumschicht über dem Bulk-Silizium sein, oder eine weitere Siliziumschicht, die über dem Bulk-Silizium-Germanium liegt.

[0017] Das Substrat 102 kann auch andere überdeckte Strukturen oder dotierte Bereiche beinhalten. Zusätzlich können andere Halbleiter-, Isolier- und Leiter-Schichten auf das Substrat 102 und die Verbindungs-TSV-Schicht 104 aufstrukturiert werden. Die dotierten Bereiche und andere strukturierte Materialien bilden zusammen verschiedene Bauelemente (etwa Metall-Isolator-Halbleiter-Feldeffekt-Transistor-(MOSFET)-Bauelemente), Isolierstrukturen (etwa dielektrische Isolierstrukturen, etwa Flachgrabenisolier-(shallow trench isolation)- oder STI-Strukturen), etc.

[0018] Wie in **Fig. 1B** gezeigt, ist der Cu-Bereich 104b der TSV 104a auf der Rückseite des Substrats 102 freigelegt. Diese TSV 104a und ihr freigelegter Bereich 104b können verschiedene Probleme haben, die vorzugsweise detektiert und genau überwacht werden, da Verbindungsprobleme der Funktion des Bauelements abträglich sein können. Beispielsweise kann das Durchkontaktierungsloch so gebohrt sein, dass die Durchkontaktierung geneigt und nicht senkrecht zu der Substratoberfläche ist. Die TSV 104a kann eine unregelmäßige Form haben, Hohlräume beinhalten, oder an ihrem freigelegten Bereich 104b Rauigkeit aufweisen.

[0019] **Fig. 1C** ist eine schematische Seitenansicht eines TSV-Prozesses nach dem Rückseitenätzen des Substrats und der Abscheidung einer Schicht 107 über der TSV-Struktur. Wie gezeigt, ist die TSV-Struktur nicht länger freigelegt, sondern mit Schicht 107 bedeckt. In einem Beispiel ist diese Schicht 107 eine dielektrische Schicht, welche über den TSV-Strukturen des Wafers während des Prozesses zur Bildung des fertigen Bauelements abgeschieden wird und dielektrische Kappen für die TSVs bildet, z.B. mit einer Höhe 104d.

[0020] Ein Ziel der Metrologie kann es sein, das Ausmaß zu charakterisieren, um das das Cu sich über die Waferrückseite hinaus erstreckt (oder eine Messung von 104c). Das heißt, die Höhe dieser Erstreckung

104c muss oftmals innerhalb strenger Vorgaben liegen. Ein anderes Ziel kann die Messung des Ausmaßes der TSV-Kappe (z.B. 104d) sein.

[0021] Fig. 2 ist eine schematische Draufsicht eines Wafers 202 mit mehreren Dies (etwa 204a-e), die alle mehrere TSV-Verbindungen auf ihrer Rückseite (nicht gezeigt) haben. Die verschiedenen Dies oder Die-Bereiche können unterschiedliche assoziierte TSV-Eigenschaften haben, etwa Unterschiede in den zuvor erwähnten TSV-Ausmaßen 104c oder 104d. Beispielsweise kann ein Die 204a TSVs haben, die sich nicht ganz durch das Substrat erstrecken. Ein anderer Die 204b kann TSVs haben, die sich über eine kurze Distanz von der Rückseitenoberfläche erstrecken, während ein anderer Die 204c TSVs haben kann, die sich um einen größeren Betrag von der Rückseite erstrecken.

[0022] Die Messung der Höhe der Erstreckung der TSVs kann unter Verwendung einer Profil-Metrologievorrichtung, etwa dem Micro3000-Metrologiemodul von KLA-Tencor aus Milpitas, CA, bewerkstelligt werden. Diese Vorrichtung misst die Differenz von Fokuspunkten und der entsprechenden Bewegung der Vorrichtung in z-Richtung, um das Ausmaß eines jeden TSV zu bestimmen. Obwohl die Messung solcher Ausmaße mit dieser Art Vorrichtung ein langsamer Prozess ist, können solche Messdaten einfach gewonnen werden, falls sich die TSV nur durch ein Siliziumsubstrat erstreckt. Es können jedoch Messprobleme auftreten, falls die Rückseite des Siliziumsubstrats auch mit einer oder mehreren Schichten unterschiedlichen Materials (z.B. 106 in Fig. 1B) beschichtet ist, was es schwierig machen kann, den Fokuspunkt für die verschiedene(n) Beschichtung(en) (z.B. 106) relativ zum Fokuspunkt auf der freiliegenden Oberfläche (104b) der TSV zu bestimmen. Beispielsweise können einige der Schichten transparent sein, während andere Schichten für das optische einfallende Licht von der Metrologievorrichtung opak sind.

[0023] Bestimmte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung verwenden eine Strahlprofilreflektometrie-(BPR)-Vorrichtung, um Eigenschaften von TSV-Strukturen zu messen. Fig. 3 ist eine schematische Darstellung des einfallenden und ausgehenden Strahls in einer BPR-Vorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. In dieser typischen BPR-Vorrichtung dienen eine oder mehrere Linsen (z.B. Strahlteiler 304) dazu, das einfallende Licht 302 zu kollimieren und auf einen Fleck auf der Probe 306 zu fokussieren. Der einfallende Strahl 302 kann im Wesentlichen senkrecht zu der Oberfläche der Probe 306 fokussiert werden, um die Fleckgröße zu minimieren und die Auflösung zu maximieren.

[0024] Die einzelnen Strahlen des einfallenden Strahlbündels 302 haben verschiedene Einfallswinkel, was von der numerischen Apertur der Beleuchtungslinse abhängt. In einem BPR-System ist die numerische Apertur groß, etwa 0,9, was dazu führt, dass die ankommenden einfallenden Strahlen unter einem weiten Winkelbereich, etwa ungefähr 0° bis 65° , auf die Probe 306 treffen. Jeder Lichtstrahl trifft unter einem bestimmten Winkel auf den Wafer. Dieser Winkel hängt von der Position des Strahls in dem Strahlbündel ab. Beispielsweise wird der reflektierte Strahl 302a von dem Strahlteiler 304 unter einem senkrechten Winkel bezüglich der Oberfläche der Probe 306 reflektiert. Der senkrechte Winkel (0°) entspricht einer Achse 308, die senkrecht zu der Probenoberfläche ist. Andere einfallende Strahlen, etwa 302b, haben einen größeren Einfallswinkel beim Auftreffen auf der Probenoberfläche. Diese Lichtstrahlen haben einen großen Einfallswinkelbereich auf die Probe. In dieser Figur hat ein Strahl (Zentrum des Strahlbündels) den Einfallswinkel 0° (senkrecht auf den Wafer), und die anderen Strahlen haben größere Einfallswinkel, etwa 50° . In einer Ausführung beträgt die Wellenlänge des Lichts ungefähr 6730 Å.

[0025] Die von der Probe 306 reflektierten Ausgangslichtstrahlen 310 laufen durch eine oder mehrere Linsen (z.B. Strahlteiler 304) und werden von einem oder mehreren Detektoren erfasst, etwa dem Detektor-Array 312. Der Array-Detektor ist dazu ausgebildet, Strahlen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel zu detektieren. Das heißt, jede Pixelposition, die auf der Probe durch einen einfallenden Strahl unter einem bestimmten Einfallswinkel abgebildet wird, entspricht einem detektierten Pixel auf dem Array-Detektor. Das heißt, jeder detektierte Pixel entspricht einem anderen Einfallswinkel. Beispielsweise kann es 512 Pixel-Messwerte geben, wobei jeder Pixel ein Messwert der Reflektivität in Abhängigkeit vom Einfallswinkel ist.

[0026] Fig. 4 ist eine detaillierte schematische Darstellung einer Strahlprofilreflektometrie-(BPR)-Vorrichtung 400, in der Techniken der vorliegenden Erfindung umgesetzt werden können. Das System 400 kann eine oder mehrere Lichtquellen (z.B. 402a und 402b) beinhalten, um Licht auf eine Probe 410 zu richten. Es können eine beliebige geeignete Anzahl und eine beliebige geeignete Art von Lichtquellen eingesetzt werden. Beispielsweise kann die Lichtquelle 402a eine Laserdiode (z.B. 673 nm) sein, und Lichtquelle 102 kann eine Weißlichtquelle sein.

[0027] Das einfallende Licht kann durch eine beliebige Art und Anzahl von Strahlteilern und Linsen (z.B. 404a, 404b, 409) geleitet werden, welche so konstruiert, bemessen und geformt sind, dass sie eine Vielzahl unterschiedlicher Einfallswinkel auf einen bestimmten Fleck der Probe 410 richten und fokussieren. In einer Ausführungsform erzeugt die Laserlichtquelle 402a ein Strahlbündel mit 673 nm oder darunter, das mehrere Einfallswinkel hat und dann kollimiert und auf Probe 410 fokussiert wird.

[0028] Das System 400 kann ebenso eine beliebige geeignete Anzahl und Art von Strahlteilern und Linsen (z.B. 404b, 404c, 404d, 404e, 404f) beinhalten, um Ausgangslicht, welches von der Probe 410 in Antwort auf den einfallenden Strahl reflektiert wird, auf einen oder mehrere Detektoren oder Sensoren (z.B. 406a, 406b, 406d, 406e) zu richten. Die Detektoren können beispielsweise der Array-A-Detektor 406a, der Array-B-Detektor 406b, der Detektor für reflektiertes Laserlicht 406c, der Autofokus-Detektor 406d und die Videokamera 406e sein. Die Array-A- und Array-B-Detektoren können dazu angeordnet sein, sowohl S- als auch P-Polarität von dem reflektierten Licht zu erfassen (z.B. ist Array A senkrecht zu Array B). Der Autofokus-Detektor wird verwendet, um zu detektieren, ob die Probe im Brennpunkt des Laserstrahls positioniert ist. Das Autofokus-Signal wird verwendet, um einen z-Tisch zu bewegen, bis ein vorgegebenes Autofokus-Signal gefunden wird. Das System 400 kann auch einen Leistungsmesser 406 für einfallendes Licht beinhalten.

[0029] Das System 400 kann auch Steuerung 412 beinhalten, welche dazu dient, verschiedene Komponenten des Systems zu steuern. Beispielsweise kann die Steuerung 412 einen oder mehrere Prozessoren und Speicher beinhalten. Der/Die Prozessor(en) und der Speicher der Steuerung können programmiert sein, verschiedene Einstellungen des Systems zu steuern und anzupassen. Jeder Prozessor kann typischerweise einen oder mehrere integrierte Mikroprozessorschaltkreise beinhalten und kann auch integrierte Schnittstellen- und/oder Speicherschaltkreise beinhalten und kann zusätzlich an ein oder mehrere geteilte und/oder globale Speichergeräte gekoppelt sein. Der/Die Prozessor(en) und der Speicher der Steuerung können auch dazu ausgebildet sein, Ausgabesignale oder Bilder von den Detektoren zu erhalten und solche Daten zum Zwecke der Defektdetektion oder Metrologie zu analysieren.

[0030] Die Steuerung kann auch einen Positionierungsmechanismus beinhalten, um den Tisch zu bewegen, auf den die Probe gelegt wird. Das Autofokusmodul und der Positionierungsmechanismus der Steuerung können zusammenarbeiten, um den Probenstisch zu positionieren um einen optimalen Fokus zu erhalten. Durch einen beliebigen geeigneten Mechanismus kann die Beleuchtungsoptik bezüglich des Tisches in einer x-, y- und/oder z-Richtung bewegt werden, und/oder kann der Tisch in einer x-, y- und/oder z-Richtung relativ zu der Optikachse bewegt werden, um Felder des Retikels zu scannen. Beispielsweise kann ein Motormechanismus verwendet werden, um den Tisch zu bewegen. Der Motormechanismus kann beispielsweise aus einem Schraubenantrieb und Schrittmotor, einem Linearantrieb mit Positionsrückmeldung oder einem Bandaktuator und Schrittmotor gebildet sein.

[0031] Der Positionierungsmechanismus beinhaltet allgemein auch einen oder mehrere Kodierer, die ausgelesen werden können, um die x-, y-, oder z-Position des Tisches und der Probe zu bestimmen, die dann verwendet werden, um eine TSV-Höhe wie hierin weiter beschrieben zu bestimmen.

[0032] Die Array-Detektoren können verwendet werden, um Licht zu messen, das jedem Einfallswinkel oder kleinen Menge von Einfallswinkeln entspricht, und ebenso sowohl linear s-polarisiertem als auch p-polarisiertem Licht entspricht. Beispielsweise kann jeder Array-Pixel Licht detektieren, das von der Probe in Antwort auf einen einfallenden Strahl reflektiert oder gestreut wurde, der unter einem bestimmten Einfallswinkel auf solch eine Probe trifft. **Fig. 5** zeigt die stark vergrößernde Abbildungsoptik für ein BPR-System gemäß einer Anwendung der vorliegenden Erfindung. Beispielsweise ist die Systemvergrößerung auf 100x eingestellt. Hierbei ist h_0 die Höhe eines parallelen Lichtstrahls über der optischen Hauptachse, F_1 ist der Fokuspunkt und θ_1 ist der Winkel des Strahls, der durch h_0 gelaufen ist, als er durch F_1 (z.B. Linse 409) gelaufen ist. Für das BPR läuft das Licht von der Probenoberfläche wiederum durch die stark vergrößernde Linse, welche den Lichtstrahl zurück zur Parallelität biegt. Der Abstand h_0 vom Zentrum des Laserflecks, der Winkel θ_1 und die effektive Brennweite F_1 genügen der Gleichung:

$$h_0 / F_1 = \sin(\theta_1)$$

[0033] In einem BPR-System kann es eine zusätzliche Relais-Linse geben, die das Bild des Laserquerschnitts vergrößert. Falls M der Vergrößerungsfaktor und D_p der Abstand vom Zentrum des vergrößerten Laserflecks bei dem Pixel-Array ist, dann $h_0 = D_p / M$.

[0034] $D_p = \text{Pixel \# (vom Zentrum)} \times \text{PW (Pixel-Breite)}$, somit:

$$(\text{Pixel \#}) \times (\text{PW}) / (\text{MxF}_1) = \sin(\theta_1)$$

[0035] Da der Ausdruck $(\text{PW})/(\text{MxF}_1)$ dazu tendiert, für jedes Array konstant zu sein, können zwei Ausdrücke, α für das Array A und β für das Array B, definiert werden:

$$\text{Für Array A : } (\text{Pixel \# vom Zentrum des Arrays A}) \times 0.01 \times \alpha = \sin(\theta_A)$$

$$\text{Für Array B : } (\text{Pixel \# vom Zentrum des Arrays B}) \times 0.01 \times \beta = \sin(\theta_B)$$

[0036] Die numerische Apertur (NA) für eine Linse steht in Beziehung zum größten Winkel unter dem Licht für ein Linsensystem fokussiert wird.

$$\text{Für Array A : } \text{NA} = (\text{Maximale Pixel \# vom Zentrum des Arrays A} - 1) \times 0.01 \times \alpha = \sin(\theta_{\text{Max}})$$

$$\text{Für Array B : } \text{NA} = (\text{Maximale Pixel \# vom Zentrum des Arrays B} - 1) \times 0.01 \times \beta = \sin(\theta_{\text{Max}})$$

[0037] Die minimale zulässige numerische Apertur für das BPR kann beispielsweise zu ungefähr 0,84 gewählt werden.

[0038] Die BPR-Technologie kann verwendet werden, um die polarisierte Reflektanz einer Oberfläche als Funktion des Einfallswinkels zu messen, indem die rückwärtige Brennebene eines Objektivs mit hoher NA (typischerweise 0,95) auf Array-Detektoren abgebildet wird. Die Winkelvariationsfunktionen können auch bei einer gegebenen Wellenlänge gemessen werden, um reichhaltige Information zu liefern, um Schichtdicken und andere optische Eigenschaften zu bestimmen, ohne ein Modell zu benötigen oder irgendwelche Annahmen in Betracht zu ziehen. Aufgrund der hohen NA und Verwendung einer Laserquelle hat das BPR-System auch eine sehr hohe räumliche Auflösung ($\sim 0,5 \mu\text{m}$) und kann daher die adäquate Genauigkeit bereitstellen, auch eine raue Oberfläche zu messen, in der die Schichtdicken auf mikroskopischer Skala variieren. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung und hohen Messgeschwindigkeit eines BPR-Systems kann ein Gebiet auf der Oberfläche gescannt werden, um die Dickenvariation über das gescannte Gebiet zu ermitteln. Somit kann die tatsächliche Oberflächenrauigkeit gemessen und aufgelöst werden. Der Beitrag jeder Schicht zu solch einer Dickenvariation kann ebenfalls bestimmt werden. Wiederum aufgrund des Designs mit hoher NA kann das BPR-System eine sehr genaue Höhenempfindlichkeit bieten. In einer Ausführung ist der Autofokus-(AF)-Mechanismus ebenfalls so konstruiert, dass das Licht mit einem hohen Maß an Genauigkeit durch das Objektiv läuft.

[0039] Jegliche geeignete Technik kann eingesetzt werden, um das BPR-System zum Messen einer TSV-Eigenschaft zu verwenden, etwa der Höhe (z.B. 104c oder 104d) relativ zu der umgebenden Schichtoberfläche (z.B. 106 oder 107). **Fig. 6** ist ein Flussdiagramm, das ein Verfahren 600 zur Bestimmung von TSV-Metriken gemäß einer spezifischen Umsetzung der vorliegenden Erfindung zeigt. Zunächst beinhaltet der Prozess 600 das Bewegen zu einer xy-Position am oberen Ende einer ersten TSV im Vorgang 602. Beispielsweise wird der Strahlengang relativ zu der ersten TSV-Struktur auf der Probe bewegt, so dass er auf die erste TSV trifft (Probe und/oder Strahlsäulenoptik bewegt). Die Orte jeder TSV-Struktur können von den Designern geliefert (z.B. in einer GDSII-Datei) und in die Inspektionsvorrichtung eingegeben werden, welche sich automatisch zu einer ersten TSV-Position bewegt, oder ein Bediener veranlasst solch eine Bewegung der Inspektionsmaschine zu einem ersten Ort manuell.

[0040] Ein Autofokus-Signal kann dann verwendet werden, um eine z-Position anzupassen um einen optimalen Fokus zu erzielen, in Vorgang 604. Beispielsweise kann ein Teil des Ausgangsstrahls im Autofokus-Detektor (z.B. 406d) empfangen und verwendet werden, um ein Autofokussignal zu erzeugen, das analysiert wird, um zu bestimmen, ob die z-Position angepasst werden muss, um einen optimaleren Fokus zu erhalten. Eine bestimmte z-Position kann erreicht werden, indem der Tisch über einen Positionierungsmechanismus (z.B. 412) nach oben und unten bewegt wird. Optimaler Fokus kann beispielsweise erzielt werden, wenn das Signal von einem Zwei-Zellen-Detektor, der nach einem Messerzerhacker an der gewünschten Fokusposition des reflektierten Laserstrahls angeordnet ist, ausgeglichen ist. Die z-Position kann auch aufgezeichnet werden, im Vorgang 604. Beispielsweise kann eine Kodierer-xyz-Position (auf dem Tisch befindlich) ausgelesen und im Speicher aufgezeichnet/gespeichert werden, zur späteren Verwendung im Zusammenhang mit der aktuellen TSV.

[0041] BPR-Messwerte an der aktuellen xyz-Position werden dann in Vorgang 606 gewonnen. Das heißt, es werden BPR-Messwerte bei unterschiedlichen Einfallswinkeln gewonnen. Diese BPR-Messwerte werden dann verwendet, um Schichtdicken (z.B. t_1 , t_2 , ... etc.) für eine oder mehrere Schichten bei der xy-Position in Vorgang 608 zu ermitteln. Beispielsweise kann ein linearer Array-Detektor betreibbar sein, um 512 Pixel oder 512 Messwerte bei unterschiedlichen Einfallswinkeln zu detektieren. Das heißt, Reflektivität wird als eine Funktion des Einfallswinkels gemessen, und diese Reflektivitätsmessdaten werden dann zusammen analysiert, um (einen) Schichtdickenwert(e) zu bestimmen.

[0042] Jede geeignete Technik kann verwendet werden, um Schichtdicken aus BPR-Messwerten zu bestimmen. **Fig. 7A bis 7H** zeigen einen Prozess zur Bestimmung von Schichtdicken unter Verwendung eines BPR-Systems. Für eine einzelne Grenzfläche zwischen Luft und Schicht zeigt **Fig. 7A**, dass ein Teil des einfallenden Lichts (702) an der Grenzfläche Luft/Schicht als reflektiertes Licht (704) reflektiert wird, und ein Teil als gebrochenes Licht (706) in die Schicht gebrochen wird. Das reflektierte Licht (704) plus das gebrochene Licht (706) ist gleich dem einfallenden Licht (702). Ferner hängt das Verhältnis des reflektierten Lichts und des gebrochenen Lichts vom Einfallswinkel, dem Index n_1 der Schicht, und der Einfallsebene ab. In diesem Fall ist der Index n_1 größer als 1; das reflektierte Licht ist 40%, und das gebrochene Licht ist 60% für einen gegebenen Winkel i und eine gegebene Einfallsebene.

[0043] Ein Lichtstrahl kann als eine Welle dargestellt werden, welche eine Vibrations- oder Oszillationskomponente hat. Diese Oszillation ist immer senkrecht zu der Richtung der Propagation, wie in **Fig. 7B** für die einfallenden Strahlen 710a und 710b gezeigt, welche Propagationsrichtungen 712 und Polarisationsrichtungen 714 haben. Zusätzlich ist die Oszillationsperiode im Raum die Lichtwellenlänge. Ein gewöhnlicher Lichtstrahl ist nicht polarisiert. Das heißt, dieser gewöhnliche nichtpolarisierte Strahl hat Oszillationen, welche zufällig in allen möglichen Ebenen auftreten, die die Propagationsrichtung enthalten.

[0044] **Fig. 7C** zeigt einen Strahl unpolarisierten Lichts 720, der senkrecht zu einer Ebene 722 verläuft. Die Pfeile (auf der Ebene 722 gezeigt) symbolisieren einige der Richtungen der Oszillationen. Ein Strahl linear polarisierten Lichts hat nur in einer Ebene (z.B. 724) Oszillationen. Ein Polarisator wandelt ein unpolarisiertes Licht in ein linear polarisiertes Licht um. Eine Analogie ist ein Gitter dünner paralleler Drähte, durch welches das unpolarisierte Licht verläuft. Das parallel zu den Drähten polarisierte Licht wird absorbiert, so dass das transmittierte Licht lediglich eine polarisierte Komponente senkrecht zu den Drähten hat. Der Drahtgitterpolarisator ist ein klassischer Polarisator und andere Arten von Polarisatoren, etwa solche, die auf doppelbrechenden Kristallen oder Dünnschichtbeschichtungen beruhen, sind verfügbar und können verwendet werden. Beispiele beinhalten einen Glan-Thomson-Polarisator oder einen Würfelpolarisator (z.B. 726 in **Fig. 7C**).

[0045] Falls die Einfallsebene senkrecht zu der Polarisationsrichtung ist (d.h. die Oszillationen sind in einer Ebene senkrecht zu der Einfallsebene), dann wird die Einfallsebene als eine s-Ebene bezeichnet, und der Strahl als s-polarisiert. **Fig. 7D** zeigt eine s-polarisierte Richtung 732 für einen einfallenden Strahl 734 in Einfallsebene 736. Falls die Einfallsebene 736 eines weiteren Einfallsstrahls 742 die Polarisationsrichtung, 738, beinhaltet (d.h. das Licht vibriert in der Einfallsebene 736), dann ist die Einfallsebene (736) des einfallenden Strahls (742) eine p-Ebene, und der Strahl wird als p-polarisiert bezeichnet.

[0046] **Fig. 7E** zeigt die theoretische Veränderung des Verhältnisses der (reflektierten Amplitude)/(einfallenden Amplitude) als eine Funktion des Einfallswinkels. Man beachte, dass für den Einfallswinkel 0° (senkrechter Strahl) die reflektierten Amplituden für s- und p-Polarisation gleich sind ($\text{refl}/\text{incid} = R_0$). Für das s-polarisierte Licht nimmt die Intensität des reflektierten Lichts mit dem Einfallswinkel zu. Für das p-polarisierte Licht nimmt die Intensität zunächst ab und dann zu.

[0047] Der Brewsterwinkel (i_B) ist der Einfallswinkel, für den die reflektierte Intensität für die p-polarisierten Strahlen gleich 0 ist. Während die Amplituden das Vorzeichen wechseln und negativ werden können, sind die durch das BPR-System gemessenen Intensitäten (Intensität = Quadrat der Amplitude) immer positiv. Die gepunktete Kurve in **Fig. 7E** entspricht dem, was das BPR-System effektiv misst.

[0048] Bei dem Brewsterwinkel wird kein p-polarisiertes Licht von der Schicht reflektiert, und das gesamte einfallende p-polarisierte Licht wird in die Schicht gebrochen, und wird dann von dem Substrat reflektiert und tritt als Strahl #2 aus. Für eine dünne Schicht ist der Versatz zwischen Strahl #1 und Strahl #2 sehr klein, und hat kohärent miteinander Superposition. Für diesen Einfallswinkel, i_B , gibt es keinen reflektierten Strahl #1. Wie unten erklärt, misst und simuliert das BPR-System jedoch Strahl #1, Strahl #2 und alle folgenden reflektierten Strahlen, um die Schichtdicke wie in **Fig. 7F** gezeigt, zu bestimmen.

[0049] Der Brewsterwinkel hängt im Allgemeinen vom Index der Luft und dem Index der Schicht ab, gemäß der folgenden Beziehung:

$$\tan(i_B) = n_1 / n_0$$

[0050] Der Wert bei diesem Winkel liefert Information über den Index n_1 der Schicht. Für die Grenzfläche Luft/Oxid, $i_B=55^\circ$. Für Luft/Nitrid: $i_B=63^\circ$, und für Luft/polySi: $i_B=75^\circ$.

[0051] Licht kann durch eine Welle oder Oszillation beschrieben werden. Jede Welle hat eine Amplitude, eine Wellenlänge und eine Phase. Als nächstes werden zwei Grenzflächen in der Form Luft/Schicht und Schicht/Substrat betrachtet, wie in **Fig. 7F** gezeigt. Strahl #1 ist der Strahl, der an der oberen Grenzfläche reflektiert wird, und Strahl #2 ist der Strahl, der in die Schicht gebrochen wird, vom Substrat reflektiert wird, und aus der oberen Grenzfläche austritt.

[0052] Nach Verlassen der Schicht sind die reflektierten Strahlen #1 und #2 parallel (gleicher Winkel i). Da die Schichtdicke t in diesem Beispiel klein ist (z.B. $1 \mu\text{m}$), sind die beiden Strahlen praktisch koinzident. Erfasst ein Detektor beide reflektierte Strahlen, würde er die Summe ihrer Oszillationsamplituden messen.

[0053] Der Strahl #2 ist über eine längere Distanz ($2d$ innerhalb des Films für den Mittelstrahl) gelaufen als Strahl #1. Die zusätzliche Strecke ($2d$) war innerhalb der Schicht. Diese Wegstrecke wird von dem Strahl #2 mit geringerer Geschwindigkeit als in Luft zurückgelegt, wegen des höheren Brechungsindex n_1 der Schicht. Diese zusätzliche Wegstrecke führt im Ergebnis zu einer Verzögerung zwischen den Oszillationsphasen der beiden Strahlen. An einem gegebenen Punkt, an dem Strahl #1 und Strahl #2 außerhalb der Probe parallel zueinander laufen, kann es sein, dass die Maximalamplitude von Strahl #1 nicht mit der Maximalamplitude von Strahl #2 zusammenfällt. Das heißt, es kann sein, dass sie nicht in Phase schwingen.

[0054] Strahl #1 und Strahl #2 sind in Phase, wenn ihre Phasendifferenz ein Vielfaches der Periode der Lichtwelle ist. Die Summe der beiden Strahlen #1 und #2 ist dann maximal: Amplitude Strahl #1 + Amplitude Strahl #2 (konstruktive Interferenz). Im Gegensatz dazu befinden sich Strahl #1 und Strahl #2 in Gegenphase, falls die Oszillation von Strahl #1 bei ihrem Maximum ist, wenn die Oszillation von Strahl #2 bei ihrem Minimum ist. In diesem letzteren Fall ist die Summe der beiden Strahlen #1 und #2 bei einem Minimum: Amplitude Strahl #1 - Amplitude Strahl #2 (destruktive Interferenz).

[0055] Diese Phasenverzögerung hängt ab von der Länge $2d$ der zusätzlichen Strecke, der Geschwindigkeit v der Lichtpropagation in der Schicht, dem Einfallswinkel und der Wellenlänge des Lichts. Die zusätzliche Wegstrecke $2d$ wiederum hängt ab von der Dicke t der Schicht und von dem Winkel r , wobei r mit dem Winkel i in Beziehung steht (Snelliusgesetz). Die Geschwindigkeit v der Propagation der Lichtwelle in der Schicht ist

$$v = c / n_1$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (oder in Luft) ist und n_1 der Index der Schicht ist.

[0056] In der Schicht läuft Strahl #2 mit geringerer Geschwindigkeit als in Luft. Die Periode der Welle im Raum variiert wie die Geschwindigkeit. Je größer der Index, desto kleiner die Geschwindigkeit und desto kleiner die Periode im Raum. Die Intensität des reflektierten Lichts hängt ab von dem Einfallswinkel i des Lichts, dem Brechungsindex n der Schicht, dem Extinktionskoeffizienten k der Schicht, der Schichtdicke t , der Wellenlänge λ des Lichts, und der Polarisation des Lichts.

[0057] Zusammengefasst hängt der Einfallswinkel für Licht davon ab, welcher Teil der Linse benutzt wird, um Licht zu fokussieren. Das BPR-System fokussiert allgemein ein kollimiertes, zylindrisches Strahlbündel einfallender Lichtstrahlen, die auf einen Fleck von $0,9$ oder $0,7$ Mikrometer Größe fokussiert werden, über einen Bereich von Einfallswinkeln. Da der reflektierte Winkel gleich dem Einfallswinkel ist, kollimiert die Ausgangslinse auch das reflektierte Lichtbündel. Einfallendes Licht wird an jeder Grenzfläche sowohl reflektiert als auch gebrochen, und die Reflektions- und Brechungswinkel an jeder Grenzfläche hängen von dem entsprechenden Einfallswinkel ab. Für jeden Einfallswinkel bestimmt Dünnschichtinterferenz die gemessene reflektierte Intensität. Da der einfallende Strahl auch linear polarisiert ist, kann die Polarisationsrichtung (S, P, oder gemischt) dann ausgewählt werden durch Wahl einer bestimmten Ebene, welche den einfallenden oder reflektierten Strahl schneidet. Die Arrays A und B können dann so orientiert werden, dass sie Licht detektieren, das nur S-polarisiert beziehungsweise nur P-polarisiert ist. Das sich ergebende Signal ist Reflektivität gegen Winkel, wie beispielsweise in **Fig. 7G** für das Array A oder s-polarisierte Reflektivität gezeigt.

[0058] Diese Reflektivitätsmesswerte bei den unterschiedlichen Einfallswinkeln können dann verwendet werden, um einen oder mehrere Schichtdickenwerte zu bestimmen. Beispielsweise kann, wie in **Fig. 7H** gezeigt, die Dicke t_1 bei xy-Position 750a (am oberen Ende des TSV-Pfostens) bestimmt werden. Jede geeignete Technik kann verwendet werden, etwa das Lösen nach den Fresnel-Koeffizienten. Information über die Schichtdicke wird gezielt abgeleitet unter Verwendung der gemessenen Reflektanz-Information in einem mathematischen Modell oder einem Satz Gleichungen, welche Reflektivität, Einfallswinkel und Schichtdicke in Beziehung setzen. Die verwendeten Gleichungen beruhen auf den wohlbekanntenen Fresnel-Gleichungen. Die wesentliche Gleichung für die Reflektivität einer Probe bezüglich S-polarisiertem Licht lautet wie folgt:

$$R_S = \left| \frac{r_{S1} + r_{S2} e^{i2k_1 t}}{1 + r_{S1} \cdot r_{S2} \cdot e^{i2k_1 t}} \right|^2 \quad \text{Gleichung [1]}$$

[0059] Worin R_S die Reflektivität des Lichts ist, die aus der isolierten Intensitätsmessung abgeleitet wird, der Brechungsindex in Luft zu Eins angenommen wird, und t die Dicke der Schicht ist. Die konstante k in Gleichung [1] wird gegeben durch die Gleichung:

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_L \cos \theta_L \quad \text{Gleichung [2]}$$

worin λ die Wellenlänge des Lichtstrahls ist. Alle r -Werte sind für die Reflektivität s-polarisierten Lichts, wobei r_{S1} die Reflektanz von der oberen Oberfläche der dünnen Schicht ist und r_{S2} die Reflektanz von der Grenzfläche zwischen Schicht und Substrat ist.

[0060] Für S-polarisiertes Licht sind die Reflektivität von der Oberfläche der dünnen Schicht (r_{S1}) und des Substrats (r_{S2}) durch die folgenden Gleichungen gegeben:

$$r_{S1} = \left(\frac{n_L \cos \theta_L - \cos \theta_0}{n_L \cos \theta_L + \cos \theta_0} \right) \quad \text{Gleichung [3]}$$

$r_{S2} = \left(\frac{n_S \cos \theta_S - n_L \cos \theta_L}{n_S \cos \theta_S + n_L \cos \theta_L} \right)$ worin n_L der Brechungsindex der dünnen Schicht, n_S der Brechungsindex des Substrats, θ_0 der Einfallswinkel an der Grenzfläche zwischen Luft und Oberfläche der dünnen Schicht, θ_L der Einfallswinkel in die dünne Schicht und θ_S der Einfallswinkel in das Substrat ist.

[0061] Für P-polarisiertes Licht ist die Reflektivität von der Oberfläche der dünnen Schicht (r_{P1}) und des Substrats (r_{P2}) durch die folgenden Gleichungen gegeben:

$$r_{P1} = \left[\frac{\frac{n_L}{\cos \theta_L} - \frac{1}{\cos \theta_0}}{\frac{n_L}{\cos \theta_L} + \frac{1}{\cos \theta_0}} \right] \quad \text{Gleichung [5]}$$

$$r_{P2} = \left[\frac{\frac{n_S}{\cos \theta_S} - \frac{n_L}{\cos \theta_0}}{\frac{n_S}{\cos \theta_S} + \frac{n_L}{\cos \theta_0}} \right] \quad \text{Gleichung [6]}$$

[0062] Die detektierte Reflektivität p-polarisierten Lichts ist

$$R_P = \left| \frac{r_{P1} + r_{P2} \cdot e^{i2k_1 t}}{1 + r_{P1} \cdot r_{P2} \cdot e^{i2k_1 t}} \right|^2 \quad \text{Gleichung [7]}$$

[0063] Die Dicke einer dünnen Schicht kann auf Grundlage einer besten Anpassung der simulierten Reflektivität, unter Verwendung der Gleichungen [1]-[7], an die gemessenen Reflektanzwerte abgeleitet werden, die wie oben beschrieben als eine Funktion des Einfallswinkels erhalten werden. Für mehrere Schichtlagen auf einem Substrat können die Gleichungen [1] bis [7] rekursiv angewendet werden, um die Reflektivität des

gesamten Schichtstapels zu ermitteln. Viele nichtlineare Optimierungsalgorithmen können verwendet werden, um die beste Anpassung zu ermitteln, etwa Gauss-Newton- oder LM-Methode.

[0064] Die Genauigkeit des Ergebnisses kann weiter verbessert werden, falls eine Analyse durchgeführt wird, welche Faktoren wie Lichtabsorption durch die Probe und die Auswirkung einer endlichen Detektorgröße berücksichtigt. Das Ausmaß der Absorption ändert sich von Material zu Material. Falls die Materialien bekannt sind, können verschiedene Korrekturfaktoren in Gleichungen 1 und 7 aufgenommen werden, um die Bestimmung weiter zu verfeinern. Die Absorptionskorrektur kann leicht vorgenommen werden, indem der Index n_S , n_L in Gleichungen [1] - [7] durch $n_S + ik_S$ und $n_L + ik_L$ ersetzt wird, und somit alle mathematischen Operationen auf komplexen Zahlen beruhen, wobei k der Imaginärteil des Indexes ist, der mit dem Absorptionskoeffizienten in Beziehung steht. Eine numerische Lösung kann beispielsweise durch die Anwendung einer Routine zur Anpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate gesucht werden. Solch eine numerische Analyse wird aufgrund des Umstandes sehr erleichtert, dass eine näherungsweise Lösung für die Schichtdicke gewöhnlich aus der Prozessinformation bekannt ist. Somit kann eine Routine zur Anpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate verwendet werden, um einen Satz Fresnel-Gleichungen zu lösen, wobei die wahrscheinliche Lösung für die Schichtdicke eingegeben wird. Wird die Lösung auf diese Weise verfeinert, kann die Genauigkeit der Messung signifikant verbessert werden.

[0065] Die obigen Vorgänge werden für eine xy-Position wiederholt, die der aktuellen TSV benachbart ist, um Signale von einem Bereich der Oberfläche zu erhalten, der die TSV nicht beinhaltet. Im Beispiel der **Fig. 1B** kann eine benachbarte Position auf der Oberfläche 106 neben dem TSV-Bereich 104a befindlich sein. In **Fig. 1C** kann eine benachbarte Position auf der Oberfläche 107 befindlich sein. Zurück zu **Fig. 6**, beinhaltet der Prozess 600 das Bewegen zu einer xy-Position, die zur aktuellen TSV benachbart ist, in Vorgang 610. Das Autofokus-Signal wird verwendet, um die z-Position anzupassen, um einen optimalen Fokus zu erhalten, und die z-Position für die aktuelle xy-Position im Vorgang 612 aufzuzeichnen. BPR-Messwerte werden dann bei dieser aktuellen benachbarten xyz-Position erhalten, im Vorgang 614. Diese BPR-Messwerte werden auch verwendet, um die Schichtdicken für die benachbarte Position (z.B. T1, T2, etc.) in Vorgang 616 zu ermitteln. Beispielsweise können, wie in **Fig. 7H** gezeigt, Dickenwerte für T1 und T2 für die xy-Position 750b ermittelt werden, welche zur TSV-Struktur benachbart ist.

[0066] Da die Fleckgröße ziemlich klein ist (z.B. 0,7 Mikrometer), werden die Dicken nicht wesentlich schwanken. In bestimmten Ausführungsformen kann der Prozess 600 für jede Position in einem bestimmten Scan-Gebiet wiederholt werden, etwa einem Gebiet, das ungefähr 5-10 Mikrometer auf 5-10 Mikrometer ist. Der Fleck kann bezüglich dieses bestimmten Gebiets in Inkrementen von beispielsweise 1 Mikrometer bewegt werden. Somit werden für ein bestimmtes TSV-Gebiet viele Sätze an Messdaten erhalten, und diese Messdaten können verwendet werden, um mehrere Sätze an Dicken für das bestimmte Gebiet zu bestimmen.

[0067] Die Höhe des TSV (über der umgebenden Schichtoberfläche) kann ebenfalls bestimmt werden, auf Grundlage von oberen und benachbarten Messergebnissen, aufgezeichneten z-Positionen und angegebenen Schichtgrenzflächeneigenschaften, in Vorgang 618. Das heißt, die Dicken und z-Positionen, die für die zwei xy-Positionen erhalten wurden, können verwendet werden, um die relative Höhe solcher xy-Positionen zu bestimmen.

[0068] Beispielsweise kann die Differenz zwischen den aufgezeichneten Höhen der ersten und zweiten xy-Position als eine Höhe für die TSV-Struktur angegeben werden. Diese Höhe kann auch bezüglich eines benutzerdefinierten z-Bezugswertes angegeben werden. Wie zum Beispiel in **Fig. 7H** gezeigt, kann der z-Bezugswert auf die Oberseite der Schicht mit Dicke T2 gesetzt werden. Im Allgemeinen bezieht sich die aufgezeichnete z-Position auf die z-Position des Tisches, bei der das Autofokus-Signal einen gewünschten Wert liefert, für den der Fokuspunkt des echten Strahls typischerweise in der Mitte des Schichtstapels liegt. Die Position der tatsächlichen Oberfläche relativ zum Fokuspunkt des Strahls kann durch einen Algorithmus bestimmt werden, der die ermittelten Dickenwerte für jede xy-Position als Eingabe nimmt. Die relative Höhe mehrerer xy-Positionen kann auch als eine Metrik für Rauigkeit verwendet werden.

[0069] Zurück zu **Fig. 6**, kann dann in Vorgang 620 bestimmt werden, ob es weitere TSV-Strukturen gibt. Falls es mehr TSV-Strukturen gibt, wird der Prozess 600 für eine nächste TSV-Struktur wiederholt. Ansonsten endet der Prozess.

[0070] Bestimmte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung verwenden ein BPR-System mit einer kleinen Fleckgröße, welches adäquate räumliche Auflösung bietet und somit hohe Genauigkeit für die Mes-

sung von Schichtdicken und relativen Höhen (oder Rauigkeitsmetriken) für eine raue Oberfläche. Die hohe räumliche Auflösung ist mit der Eigenschaft hoher NA des typischen BPR-System-Layouts assoziiert. Die geringe Fleckgröße und hohe Messgeschwindigkeit erlauben das Scannen eines Gebiets und die Messung mehrerer Punkte in diesem Gebiet, was die Messung der Oberflächenrauigkeit mit hoher räumlicher Auflösung und Isolierung der Rauigkeit unterschiedlicher Lagen der Schicht ermöglicht. Das BPR-System wird verwendet, um die Reflektanz-Variation als eine Funktion des Einfallswinkels (AOI, angle of incidence) zu messen, was einen reichhaltigen Satz an Information bietet, der die gleichzeitige Messung der Schichtdicken und optischen Eigenschaften ermöglicht, ohne ein Dispersionsmodell zu benötigen. Bestimmte hierin beschriebene Techniken bieten auch eine Möglichkeit, Strukturhöhe mit hoher Genauigkeit zu messen, da (a) das System mit hoher NA hohe Empfindlichkeit auf Höhe bietet, und (b) jede der Schichtdicken durch Analyse des BPR-Signals isoliert werden kann.

[0071] Das BPR-System kann als ein eigenständiges System ausgelegt oder in eine Cluster-Maschine integriert sein. In einer bestimmten Ausführung ermöglicht ein Kombinationssystem die Messung der TSV-Dicke auf einem Halbleiterwafer unter Verwendung von BPR und die Messung anderer Metrologiemerkmale (z.B. CD, Overlay, Schichtzusammensetzung, etc.) oder Defektdetektion unter Verwendung von Reflektivität, oder elektromagnetischer Scatterometrie-Wellenform oder Rasterelektronenmikroskop-(SEM)-Bildern oder-Signalen auf dem gleichen Messsystem oder unter Verwendung verbundener Messsysteme, die zumindest einen Teil eines robotischen Wafer-Handhabungssystems teilen. Die Verfahren zur Messung der Eigenschaften der TSV-Struktur und anderer Metrologie- oder Inspektionseigenschaften können auf getrennten Messsystemen geplant und durchgeführt werden. Ein Nachteil von Verfahren zur Messung solcher Eigenschaften auf getrennten Messsystemen ist die zusätzliche Zeit, die erforderlich ist, um separate Vorgänge auf separaten Metrologiemaschinen zu planen und auszuführen. Ein weiterer Nachteil ist die Redundanz gemeinsamer Bauteile und die damit verbundenen Kosten.

[0072] Um diese Nachteile zu überwinden kann ein Metrologiesystem bereitgestellt werden, das BPR und Inspektion/Metrologie kombiniert. In einer Ausführungsform können das BPR- und das Inspektions-/Metrologie-System getrennte Systeme sein, die unabhängig voneinander arbeiten können, aber so verbunden sind, dass sie zumindest einen Teil eines robotischen Wafer-Handhabungssystems teilen.

[0073] Im Betrieb können ein Wafer, eine Gruppe von Wafern oder ein Stapel mehrerer Wafer in das kombinierte Metrologiesystem eingeführt werden, indem der Waferbehälter auf das robotische Wafer-Handhabungssystem geladen wird, das für dieses kombinierte Metrologie-/Inspektions-System vorgesehen ist. Es können Messrezepte ausgewählt werden, die BPR-Messungen auf einigen oder allen der Wafer und andere Metrologie-/Inspektions-Messungen auf einigen oder allen der Wafer angeben. Die BPR-Messungen und die anderen Metrologie-/Inspektions-Messungen können zusammen in einem oder mehreren Rezepten angegeben werden, oder können in separaten Rezepten angegeben werden. Die BPR- und anderen Metrologie-/Inspektions-Messungen können auf den gleichen Wafern oder auf verschiedenen Wafern durchgeführt werden, oder auf einigen der gleichen und einigen verschiedenen Wafern. Die BPR- und anderen Metrologie-/Inspektions-Systeme können parallel oder in Reihe arbeiten.

[0074] Ein anderes Beispiel eines kombinierten Metrologiesystems wäre ein verbundenes System, das ein BPR-System, ein weiteres Metrologie-/Inspektions-System, etwa eines der von KLA-Tencor aus Milpitas, CA, hergestellten, eine robotische Handhabungseinrichtung und ein Wafer-Einplansystem umfasst. Ein BPR-System kann auch mit einer Verarbeitungsmaschine zusammengefügt werden. Die Kommunikation mit Fabrikautomatisierungs- und/oder Fabrikinformations- und/oder Fabrik-Prozesssteuerungs-Systemen kann durch separate Kommunikations- oder Automatisierungssysteme erfolgen, oder kann zumindest teilweise oder vollständig geteilt sein.

[0075] Ein Vorteil des kombinierten BPR- und weiteren Metrologie-/Inspektions-Systems ist die Reduzierung der Gesamtzeit, die erforderlich ist, um das Einplanen und/oder die Durchführung der BPR- und anderer Messungen abzuschließen. Zumindest eine Warteschlangenverzögerungszeit kann eliminiert werden.

[0076] Fig. 8A und 8B zeigen Varianten einer kombinierten Metrologie-/Inspektionsvorrichtung 800 beziehungsweise 801, gemäß zweier Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung. In beiden Figuren beinhaltet die kombinierte Metrologie-/Inspektionsvorrichtung ein robotisches Wafer-Handhabungssystem 802, ein BPR-Modul 804, ein weiteres Metrologie-/Inspektions-Modul 806, eine Waferladeposition A 808 und eine Waferladeposition B 810.

[0077] Das robotische Wafer-Handhabungssystem 802 ist dazu ausgebildet, Wafer zu und von dem BPR-Modul 804 und Metrologie-/Inspektions-Modul 806, und ebenso zu und von den Waferladepositionen A 808 und B 810 zu transferieren. Das BPR-Modul 804 ist dazu ausgebildet, TSV-Eigenschaften zu messen, etwa Höhe, Schichtdicke und Rauigkeit, etc. Das Metrologie-/Inspektions-Modul 806 kann dazu ausgebildet sein, Defekte zu detektieren oder eine beliebige Metrik zu messen, etwa Overlay oder kritische Dimensionen, etwa Linienbreite, obere Linienbreite, Durchkontaktierungsdurchmesser, Böschungswinkel und Profil. Die Waferladeposition A und die Waferladeposition B sind dazu ausgebildet, einen oder mehrere Wafer zu enthalten. In den meisten Fällen enthalten sie eine Vielzahl an Wafern. Die Wafer können dem gleichen oder einem anderen Los entstammen.

[0078] In einer spezifischen Ausführung beinhaltet das System 800 ein Inspektionsvorrichtungssystem (806), um Intensitätssignale oder Bilder von einem Wafer zu erhalten. Zum Beispiel kann die Inspektionsvorrichtung von einem Teil des Wafers ein optisches Bild konstruieren oder Intensitätswerte erzeugen, auf Grundlage eines Teils detektierten Lichts, das zu einem oder mehreren Lichtsensoren reflektiert, transmittiert oder sonstwie gerichtet wird. Die Inspektionsvorrichtung kann dann zur Defektdetektionsanalyse die Intensitätswerte oder Bilder, und ebenso Kodierpositionsdaten, ausgeben.

[0079] In **Fig. 8A** und **8B** sind das BPR-Modul 804 und das Metrologie-/Inspektions-Modul 806 separate Systeme, die über das robotische Wafer-Handhabungssystem 802 verbunden sind.

[0080] Das BPR-Modul kann jede geeignete Form haben, etwa wie das BPR-System 400 der **Fig. 4**. Das Inspektions-/Metrologie-Modul kann jede geeignete Form zur Inspektion einer Probe mit einer oder mehreren elektromagnetischen Wellenformen annehmen, um eine Eigenschaft der Probe zu messen oder um Defekte auf solch einer Probe zu detektieren. Beispiele eines Inspektionssystems beinhalten speziell konfigurierte 29xx, 8xxx oder 3xxx Inspektionssystemfamilien, die von KLA-Tencor aus Milpitas, Kalifornien erhältlich sind.

[0081] In einem Prozess haben einige der Wafer von Waferladeposition A und/oder B TSV-Eigenschaften, die beim BPR-Modul 804 gemessen werden, und danach andere Metrologie- oder Inspektionseigenschaften, die beim Metrologie-/Inspektions-Modul 806 gemessen werden. Der Wafer kann durch beide Prozesse gemessen werden, ohne aus dem System entfernt zu werden, d.h. die Waferhandhabung und die damit zusammenhängenden Durchsatzprobleme werden reduziert. In einem anderen Vorgang haben einige Wafer von Waferladeposition A und/oder B TSV-Eigenschaften, die beim BPR-Modul 804 gemessen werden, und einige andere Wafer von Waferladeposition A und/oder B haben andere Metrologie- oder Inspektionseigenschaften, die beim Metrologie-/Inspektions-Modul 806 gemessen werden. Bei jedem dieser Vorgänge können das BPR- und das Metrologie-/Inspektions-Modul voneinander unabhängig und gleichzeitig vorgehen.

[0082] Eine Gruppe von Wafern kann zunächst von entweder dem BPR-Modul 804 oder dem Inspektions-/Metrologie-Modul 806 empfangen werden. Beispielsweise können die Wafer ein Waferlos sein, das bei Position A 808 geladen wird. Die TSV-Eigenschaften eines Wafers aus der Gruppe von Wafern werden durch BPR-Modul 804 gemessen. Ein weiterer Metrologie- oder Inspektions-Prozess kann dann durch das Metrologie-/Inspektions-Modul 806 an einem Wafer aus der Gruppe von Wafern durchgeführt werden. Solche BPR- und anderen Metrologie-/Inspektions-Vorgänge können zur gleichen Zeit an verschiedenen Wafern durchgeführt werden. Der Transfer des Wafers kann beispielsweise durch das in **Fig. 8A** und **8B** gezeigte robotische System 802 durchgeführt werden. Sind alle Messungen durchgeführt, wird die Gruppe Wafer aus der Metrologievorrichtung freigegeben, beispielsweise bei Position B 810.

[0083] Die oben beschriebenen BPR-Systeme sollen den Umfang der Erfindung nicht beschränken. Die hierin beschriebenen erfinderischen Techniken können bezüglich eines beliebigen geeigneten BPR-Systems eingesetzt werden, etwa des Systems von **Fig. 4**. In einer alternativen Ausführungsform schließt das BPR-System ein Beleuchtungssystem ein, das mehrere Wellenlängenbereiche erzeugen kann. In einigen Ausführungsformen der Offenbarung werden Beleuchtungsstrahlen von einer Vielzahl von Beleuchtungsquellen kombiniert, um Beleuchtung bei einer oder mehreren ausgewählten Wellenlängen zum Messkopf zu liefern. Unterschiedliche Wellenlängenbereiche können für unterschiedliche Schicht- oder Substratmaterialien ausgewählt werden, die bei unterschiedlichen Wellenlängenbereichen opak oder transparent werden. Das heißt, die Wellenlängenbereiche, die dazu führen, dass eine oder mehrere der Testbereichsschichten transparent sind, können ausgewählt werden.

[0084] Mehrere Ausführungsformen von Detektoren für mehrere Wellenlängen und mehrere Einfallswinkel, die in den gezeigten Systemen verwendet werden können, werden weiter beschrieben im US-Patent 7,667,841 B2, ausgegeben am 23. Februar 2010, von Jon Opsal und US-Patent 5,596,411, aus-

gegeben am 21. Januar 1997, von Jeffrey T. Fanton et al., welche hierin durch Verweis zur Gänze für alle Zwecke aufgenommen werden. **Fig. 9** zeigt eine Ausführungsform eines Systems 900 zur Bereitstellung von Beleuchtung an einen Messkopf eines BPR-Systems, das eine Vielzahl von Beleuchtungsquellen 902 gemäß einer spezifischen Ausführung der vorliegenden Erfindung verwendet. Von den Beleuchtungsquellen 902 ausgehende Beleuchtung kann kombiniert werden, um entlang eines gemeinsamen Beleuchtungspfads zu laufen, wozu eine Vielzahl von dichroitischen Kombinierern 910 verwendet wird. In einer Ausführungsform sind die dichroitischen Kombinierer 910 dazu ausgebildet, Beleuchtung entlang eines freien Beleuchtungsstrahlengangs zu richten. In einigen Ausführungsformen kann zumindest ein Teil des Beleuchtungsstrahlengangs durch ein oder mehrere optische Elemente gegeben sein, etwa fokussierende Linsen, Strahlteiler, Kombinierer, Spiegel, Koppellinsen, optische Fasern, Abschwächer, Polarisatoren, Kollimierlinsen und dergleichen.

[0085] In einer Ausführungsform beinhaltet das System 900, ohne aber darauf beschränkt zu sein, eine erste Beleuchtungsquelle 902A, eine zweite Beleuchtungsquelle 902B, eine dritte Beleuchtungsquelle 902C, eine vierte Beleuchtungsquelle 902D, eine fünfte Beleuchtungsquelle 902E und eine sechste Beleuchtungsquelle 902F. Jede Beleuchtungsquelle 902 kann dazu ausgebildet sein, Beleuchtung bei einer ausgewählten Wellenlänge oder einem ausgewählten Wellenlängenbereich bereitzustellen. In einem Beispiel einer Ausführungsform können die erste Beleuchtungsquelle 902A, die zweite Beleuchtungsquelle 902B, die dritte Beleuchtungsquelle 902C, die vierte Beleuchtungsquelle 902D, die fünfte Beleuchtungsquelle 902E und die sechste Beleuchtungsquelle 902F dazu ausgebildet sein, Beleuchtung bei einer Wellenlänge von 488 nm, 685 nm, 443 nm, 638 nm, 405 nm beziehungsweise 532 nm bereitzustellen. Das vorstehende Ausführungsbeispiel ist zum Zwecke der Veranschaulichung angeführt und soll nicht als Beschränkung der vorliegenden Offenbarung aufgefasst werden. In anderen Ausführungsformen können Beleuchtungsquellen 902 ausgewählt werden, die dazu ausgebildet sind, Beleuchtung bei einem alternativen Satz von Wellenlängen bereitzustellen.

[0086] Die Beleuchtungsquellen 902 können dazu ausgebildet sein, Beleuchtung durch jeweilige Kollimierlinsen 904 zu einem Führungspfad zu transmittieren, der durch optische Elemente gegeben ist, darunter, ohne aber darauf beschränkt zu sein, Umlenkspiegel 908 und dichroitische Kombinierer 910. Das System 900 kann ferner Verschlüsse 906 beinhalten, die zwischen den Beleuchtungsquellen 902 und dem Führungspfad angeordnet sind. Die Verschlüsse 906 können dazu ausgebildet sein, die Transmission von Beleuchtung von zumindest einer ausgewählten Beleuchtungsquelle 902 zu dem Führungspfad zu ermöglichen, und zugleich Beleuchtung von anderen Beleuchtungsquellen 902 zu blockieren. In einer Ausführungsform kann ein Verschluss 906, der einer Beleuchtungsquelle 902 entspricht, die Beleuchtung bei einer ausgewählten Wellenlänge emittiert, öffnen, um Beleuchtung bei der ausgewählten Wellenlänge durchzulassen, während alle anderen Verschlüsse 906 geschlossen bleiben, um Beleuchtung bei anderen Wellenlängen zu blockieren, die von den anderen Beleuchtungsquellen 902 ausgeht.

[0087] In einer Ausführungsform kann der Führungspfad, ohne aber darauf beschränkt zu sein, zwei Umlenkspiegel und fünf dichroitische Kombinierer in der in **Fig. 9** gezeigten und hierin beschriebenen kompakten Anordnung beinhalten. Ein erster Umlenkspiegel 908A kann dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der ersten Beleuchtungsquelle 902A zu einem ersten dichroitischen Kombinierer 910A zu reflektieren. Ein zweiter Umlenkspiegel 908B kann dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der zweiten Beleuchtungsquelle 902B zu einem zweiten dichroitischen Kombinierer 910B zu reflektieren.

[0088] Ein dichroitischer Kombinierer 910 kann dazu ausgebildet sein, Beleuchtung bei Wellenlängen oberhalb oder unterhalb einer ausgewählten Schwelle zu transmittieren, und Beleuchtung bei anderen Wellenlängen zu reflektieren. Alternativ kann ein dichroitischer Kombinierer 910 dazu ausgebildet sein, Beleuchtung bei Wellenlängen innerhalb oder außerhalb eines ausgewählten Bereichs zu transmittieren, und Beleuchtung bei anderen Wellenlängen zu reflektieren. Der erste dichroitische Kombinierer 910A kann dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der ersten Beleuchtungsquelle 902A zu einem dritten dichroitischen Kombinierer 910C zu transmittieren. Der erste dichroitische Kombinierer 910A kann ferner dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der dritten Beleuchtungsquelle 902C zu dem dritten dichroitischen Kombinierer 910C zu reflektieren.

[0089] Der zweite dichroitische Kombinierer 910B kann dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der zweiten Beleuchtungsquelle 902B zu einem vierten dichroitischen Kombinierer 910D zu transmittieren. Der zweite dichroitische Kombinierer 910B kann ferner dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der vierten Beleuchtungsquelle 902D zu dem vierten dichroitischen Kombinierer 910D zu reflektieren.

[0090] Der dritte dichroitische Kombinierer 910C kann dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der ersten Beleuchtungsquelle 902A und Beleuchtung von der dritten Beleuchtungsquelle 902C zu einem fünften dichroitischen Kombinierer 910E zu transmittieren. Der dritte dichroitische Kombinierer 910C kann ferner dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der fünften Beleuchtungsquelle 902E zu dem fünften dichroitischen Kombinierer 910E zu reflektieren.

[0091] Der vierte dichroitische Kombinierer 910D kann dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der sechsten Beleuchtungsquelle 902F zu dem fünften dichroitischen Kombinierer 910E zu transmittieren. Der vierte dichroitische Kombinierer 910D kann ferner dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der zweiten Beleuchtungsquelle 902B und Beleuchtung von der vierten Beleuchtungsquelle 902D zu dem fünften dichroitischen Kombinierer 910E zu reflektieren.

[0092] Der fünfte dichroitische Kombinierer 910E kann dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der zweiten Beleuchtungsquelle 902B, Beleuchtung von der vierten Beleuchtungsquelle 902D und Beleuchtung von der sechsten Beleuchtungsquelle 902F entlang dem Beleuchtungspfad zu dem Messkopf des optischen Metrologiesystems zu transmittieren. Der fünfte dichroitische Kombinierer 910E kann ferner dazu ausgebildet sein, Beleuchtung von der ersten Beleuchtungsquelle 902A, Beleuchtung von der dritten Beleuchtungsquelle 902C, und Beleuchtung von der fünften Beleuchtungsquelle 902E entlang des Beleuchtungspfades zu dem Messkopf zu reflektieren.

[0093] In einer Ausführungsform kann der Beleuchtungspfad einen oder mehrere polarisierende Strahlteiler 912, 916 beinhalten, die vor und/oder nach einem Intensitätssteuermodul 914 angeordnet sind. Das Intensitätssteuermodul kann ein elektro-optisches Element, etwa eine Pockels-Zelle, beinhalten, das dazu ausgebildet ist, die Intensität der Beleuchtung abzuschwächen, die entlang des Beleuchtungspfades an den Messkopf geliefert wird. Zumindest ein polarisierender Strahlteiler 916 kann dazu ausgebildet sein, einen Anteil der Beleuchtung entlang eines Zuführpfades zu einer optischen Einzelmoden- oder Multimoden-Faser 922 zu richten, die dazu ausgebildet ist, den Anteil der Beleuchtung zu einem Polarisationskanal des Messkopfes zu liefern. Der polarisierende Strahlteiler 916 kann ferner dazu ausgebildet sein, zumindest einen weiteren Anteil der Beleuchtung entlang eines zusätzlichen Zuführpfades zu einer optischen Faser 936 zu richten, die dazu ausgebildet ist, den zusätzlichen Anteil der Beleuchtung zu einem zusätzlichen Polarisationskanal des Messkopfes zu liefern. Die Zuführpfade können zusätzliche optische Elemente beinhalten, um einen Pfad zu definieren und/oder Beleuchtung, die entlang des Pfades verläuft, zu steuern. Beispielsweise kann ein Umlenkspiegel 930 dazu ausgebildet sein, Beleuchtung entlang eines ausgewählten Pfades zu reflektieren. Verschlüsse 918, 932 können dazu ausgebildet sein, zu den optischen Fasern 922, 936 gelieferte Beleuchtung selektiv durchzulassen oder zu blockieren. Koppellinsen 920, 934 können dazu ausgebildet sein, Beleuchtung aus dem freien Raum zu den optischen Fasern 922, 936 zu transferieren. Ein Strahlteiler 924 kann dazu ausgebildet sein, einen kleinen Anteil der Beleuchtung aus dem Beleuchtungsstrahlengang oder Zuführpfad zu einem Wellenlängenmonitor 928 zu richten, durch eine Linse 926, optische Faser und/oder beliebige andere optische Elemente. Die vorstehenden Beispiele sind lediglich zum Zwecke der Erläuterung angeführt. Es ist in Betracht zu ziehen, dass verschiedene optische Elemente eingeschlossen oder ausgeschlossen werden können, ohne vom Wesentlichen der vorliegenden Offenbarung abzuweichen.

[0094] In diesem und anderen Systemen kann ein zweidimensionaler Detektor an Stelle der zwei linearen Arrays oder an Stelle eines jeden linearen Arrays verwendet werden, um mehr detektierte Information zu erfassen um zu einer robusteren Lösung zu gelangen. Ferner können unterschiedliche Achsen eines 2D-Detektors für unterschiedliche Einfallswinkel und unterschiedliche Wellenlängenbereiche verwendet werden. Andere Arten von Detektoren beinhalten Vierzellen-Detektoren, CCD-Arrays, etc.

[0095] Allgemein kann zum Erhalten von Kodierer-Positionsdaten eine Anweisung an das Tischkodierersystem gesendet werden, um xyz-Positionsdaten in einen oder mehrere Kodierer-Puffer aufzuzeichnen, und dann wird eine weitere Anweisung an das Tischkodierersystem gesendet, um die xyz-Positionsdaten aus den Kodierer-Puffern in den Systemspeicher zu entladen oder zu „schreiben“.

[0096] Wenn das xyz-Kodierersystem auch angewiesen werden kann, Echtzeit-xyz-Kodiererpositionsdaten aufzuzeichnen und solche Daten in den Systemspeicher zu schreiben, wenn ein Streifen gescannt wird, kann spezielle Firmware dazu ausgebildet sein, bidirektionale Kommunikation in Echtzeit zu ermöglichen. Alternativ würde auch eine sequenzielle Lese-/Schreib-Technik funktionieren, so dass das System die Scan-Umkehrzeit für das Schreiben und zum Erhalt der xyz-Kodiererpositionsdaten nutzt.

[0097] Unabhängig von der Systemkonfiguration können eine oder mehrere Steuerungen verwendet werden, um verschiedene Aspekte des Systems zu steuern. Beispielsweise können die von jedem Sensor erfassten Signale von einem Steuersystem verarbeitet werden, etwa von einer oder mehreren Signalverarbeitungsvorrichtungen, die jeweils einen Analog-Digital-Wandler beinhalten können, der dazu ausgebildet ist, analoge Signale von jedem Sensor in digitale Signale zur Verarbeitung umzuwandeln. Das Steuersystem kann einen oder mehrere Prozessoren beinhalten, die an Eingabe-/Ausgabe-Ports gekoppelt sind, und an einen oder mehrere Speicher, über geeignete Busse oder andere Kommunikationsmechanismen.

[0098] Das Steuersystem kann auch ein oder mehrere Eingabegeräte (z.B. eine Tastatur, Maus, Joystick) beinhalten, zur Bereitstellung von Benutzereingaben, etwa einer Veränderung des Fokus und anderer Metrologie- und/oder Inspektionsrezeptparameter. Das Steuersystem kann auch mit dem Tischpositionierungsmechanismus verbunden sein, um beispielsweise eine Probenposition zu steuern (z.B. fokussieren und scannen), und kann mit anderen Inspektions-/Metrologiesystemkomponenten verbunden sein, zur Steuerung anderer Inspektionsparameter und von Konfigurationen solcher Komponenten.

[0099] Das Steuersystem kann dazu ausgebildet sein (z.B. mit Programmanweisungen), eine Benutzerschnittstelle (z.B. einen Computerbildschirm) bereitzustellen, um sich ergebende Intensitätswerte, Bilder und andere Inspektions-/Metrologieergebnisse anzuzeigen. Das Steuersystem kann dazu ausgebildet sein, Bilder und/oder andere angezeigte Signale zu erzeugen. Das Steuersystem kann dazu ausgebildet sein (z.B. mit Programmanweisungen), eine Benutzerschnittstelle bereitzustellen (z.B. auf einem Computerbildschirm), um sich ergebende Intensitätswerte, Bilder, Diagramme, Projektionen und andere Inspektions-/Metrologieeigenschaften anzuzeigen. In bestimmten Ausführungsformen ist das Steuersystem dazu ausgebildet, oben erläuterte Metrologie- und/oder Inspektionstechniken auszuführen.

[0100] Da solche Information und Programmanweisungen auf einem speziell ausgebildeten Computersystem implementiert werden können, beinhaltet solch ein System Programmanweisungen/Computercode zur Durchführung verschiedener hierin beschriebener Vorgänge, die auf einem nichtflüchtigen computerlesbaren Medium gespeichert werden können. Beispiele maschinenlesbarer Medien beinhalten, ohne aber darauf beschränkt zu sein, magnetische Medien wie Festplatten, Floppy Disks und Magnetband; optische Medien, etwa CD-ROM-Disks; magnetoptische Medien, etwa optische Disks; und Hardwaregeräte, die speziell dazu ausgebildet sind, Programmanweisungen zu speichern und durchzuführen, etwa Nur-Lese-SpeicherElemente (ROM) und Speicher mit wahlfreiem Zugriff (RAM). Beispiele von Programmanweisungen beinhalten sowohl Maschinencode, etwa wie von einem Compiler erzeugt, und Dateien, die Code auf höherem Level beinhalten, der von dem Computer unter Verwendung eines Interpreters ausgeführt werden kann.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung einer Eigenschaft einer Silizium-Durchkontaktierungsstruktur, im Folgenden TSV-Struktur genannt, das Verfahren umfassend:

Verwenden einer Strahlprofilreflektivitätsvorrichtung, im Folgenden BPR-Vorrichtung genannt, (400) um sich zu einer ersten xy-Position zu bewegen, die eine TSV-Struktur hat;

Verwenden der BPR-Vorrichtung (400), um einen optimalen Fokus bei der ersten xy-Position zu erzielen, indem die z-Position auf eine erste optimale z-Position zum Erhalt von Messdaten bei der ersten xy-Position eingestellt wird;

Erhalten von Reflektivitätsmessdaten über die BPR-Vorrichtung (400), für eine Vielzahl von Einfallswinkeln bei der ersten xy-Position; und

Bestimmen einer oder mehrerer Schichtdicken für die TSV-Struktur auf Grundlage der Reflektivitätsmessdaten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, ferner umfassend:

Aufzeichnen der ersten optimalen z-Position von einem Kodierer des Tisches der BPR-Vorrichtung (400);

Verwenden der BPR-Vorrichtung (400), um sich zu einer zweiten xy-Position, welche neben der TSV-Struktur liegt, zu bewegen;

Verwenden der BPR-Vorrichtung (400), um einen optimalen Fokus bei der zweiten xy-Position zu erzielen, indem die z-Position auf eine zweite optimale z-Position zum Erhalt von Messdaten bei der zweiten xy-Position eingestellt wird;

Aufzeichnen der zweiten optimalen z-Position von dem Kodierer des Tisches der BPR-Vorrichtung (400);

Erhalten von Reflektivitätsmessdaten über die BPR-Vorrichtung (400), für eine Vielzahl von Einfallswinkeln bei der zweiten xy-Position;

Bestimmen einer oder mehrerer Schichtdicken für die zweite xy-Position, welche neben der TSV-Struktur

liegt, auf Grundlage der Reflektivitätsmessdaten; und Bestimmen eines Höhenunterschieds zwischen der TSV-Struktur und der zweiten xy-Position auf Grundlage der aufgezeichneten ersten und zweiten optimalen z-Position und der für die erste und zweite xy-Position bestimmten Schichtdicken.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Messdaten für die erste und zweite xy-Position für s- und p-Polarisation gewonnen werden.

4. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Schichtdicken für die erste und zweite xy-Position bestimmt werden, indem in einem Satz Fresnel-Gleichungen, von denen jede Reflektivität, Einfallswinkel und Dicke in Beziehung setzt, nach einem Satz von Fresnel-Koeffizienten gelöst wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die Lösung nach dem Satz Fresnel-Koeffizienten es beinhaltet, eine Anpassroutine nach der Methode der kleinsten Quadrate auf den Satz Fresnel-Gleichungen anzuwenden, und eine Korrektur wegen der Absorptionseigenschaften einer oder mehrerer Schichten bei der ersten und zweiten xy-Position vorzunehmen.

6. Verfahren nach Anspruch 4, ferner umfassend, die Vorgänge des Verwendens der BPR-Vorrichtung (400) zum Bewegen, des Verwendens der BPR-Vorrichtung (400) zum Erhalten eines optimalen Fokus, des Aufzeichnens einer optimalen z-Position, des Erhaltens von Reflektivitätsmessdaten, des Bestimmens einer oder mehrerer Schichtdicken, und des Bestimmens von Höhenunterschieden für eine Vielzahl benachbarter xy-Positionen zu wiederholen, um eine Rauigkeitsmetrik für die Vielzahl der benachbarten xy-Positionen zu erhalten.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei die benachbarten xy-Positionen eine Fläche von ungefähr 5-10 Mikrometer auf 5-10 Mikrometer oder mehr bedecken.

8. Strahlprofilreflektivitäts-System, im Folgenden BPR-System genannt, (400) zur Messung einer Eigenschaft einer Silizium-Durchkontaktierungsstruktur, im Folgenden TSV-Struktur genannt, umfassend: ein Beleuchtungsoptik-Modul zum Erzeugen und Richten eines einfallenden Strahls auf eine Probe (410) unter einer Vielzahl von Einfallswinkeln; ein Erfassungsoptik-Modul zum Erhalten von Reflektivitätsmessdaten von der Probe (410) in Antwort auf den einfallenden Strahl; und eine Steuerung (412), die dazu ausgebildet ist, die folgenden Vorgänge durchzuführen: Bewegen zu einer ersten xy-Position, die eine TSV-Struktur hat; Erzielen eines optimalen Fokus bei der ersten xy-Position, indem die z-Position auf eine erste optimale z-Position zum Erhalt von Messdaten bei der ersten xy-Position eingestellt wird; Erhalten von Reflektivitätsmessdaten für eine Vielzahl von Einfallswinkeln bei der ersten xy-Position; und Bestimmen einer oder mehrerer Schichtdicken für die TSV-Struktur auf Grundlage der Reflektivitätsmessdaten.

9. System (400) nach Anspruch 8, wobei die Steuerung (412) ferner ausgebildet ist zum Aufzeichnen der ersten optimalen z-Position von einem Kodierer des Tisches der BPR-Vorrichtung; Bewegen zu einer zweiten xy-Position, welche neben der TSV-Struktur liegt; Erzielen eines optimalen Fokus bei der zweiten xy-Position, indem die z-Position auf eine zweite optimale z-Position zum Erhalt von Messdaten bei der zweiten xy-Position eingestellt wird; Aufzeichnen der zweiten optimalen z-Position von dem Kodierer des Tisches der BPR-Vorrichtung (400); Erhalten von Reflektivitätsmessdaten für eine Vielzahl von Einfallswinkeln bei der zweiten xy-Position; Bestimmen einer oder mehrerer Schichtdicken für die zweite xy-Position, welche neben der TSV-Struktur liegt, auf Grundlage der Reflektivitätsmessdaten; und Bestimmen eines Höhenunterschieds zwischen der TSV-Struktur und der zweiten xy-Position auf Grundlage der aufgezeichneten ersten und zweiten optimalen z-Position und der für die erste und zweite xy-Position bestimmten Schichtdicken.

10. System (400) nach Anspruch 9, wobei die Messdaten für die erste und zweite xy-Position für s- und p-Polarisation gewonnen werden.

11. System (400) nach Anspruch 9, wobei die Schichtdicken für die erste und zweite xy-Position bestimmt werden, indem in einem Satz Fresnel-Gleichungen, von denen jede Reflektivität, Einfallswinkel und Dicke in Beziehung setzt, nach einem Satz von Fresnel-Koeffizienten gelöst wird.

12. System (400) nach Anspruch 11, wobei die Lösung nach dem Satz Fresnel-Koeffizienten es beinhaltet, eine Anpassroutine nach der Methode der kleinsten Quadrate auf den Satz Fresnel-Gleichungen anzuwenden, und eine Korrektur wegen der Absorptionseigenschaften einer oder mehrerer Schichten bei der ersten und zweiten xy-Position vorzunehmen.

13. System (400) nach Anspruch 11, wobei die Steuerung (412) ferner dazu ausgebildet ist, die Vorgänge des Verwendens der BPR-Vorrichtung (400) zum Bewegen, des Verwendens der BPR-Vorrichtung (400) zum Erhalten eines optimalen Fokus, des Aufzeichnens einer optimalen z-Position, des Erhaltens von Reflektivitätsmessdaten, des Bestimmens einer oder mehrerer Schichtdicken, und des Bestimmens von Höhenunterschieden für eine Vielzahl benachbarter xy-Positionen zu wiederholen, um eine Rauigkeitsmetrik für die Vielzahl der benachbarten xy-Positionen zu erhalten.

14. System (400) nach Anspruch 13, wobei die benachbarten xy-Positionen eine Fläche von ungefähr 5-10 Mikrometer auf 5-10 Mikrometer oder mehr bedecken.

15. System (400) nach Anspruch 8, wobei das Beleuchtungsoptik-Modul dazu ausgebildet ist, den einfallenden Strahl bei einer Vielzahl von Wellenlängenbereichen zu erzeugen, und die Steuerung (412) ferner dazu ausgebildet ist, einen Wellenlängenbereich für bestimmte Schichtarten auszuwählen.

16. Cluster-System zur Durchführung von Metrologie und Inspektion an einer Probe (410), umfassend: eine Inspektionsvorrichtung (806) zur Inspektion einer Probe (410) auf Defekte; das BPR-System (400) nach Anspruch 8; und ein Wafer-Handhabungssystem (802), um eine oder mehrere Proben (410) zwischen der Inspektionsvorrichtung (806) und dem BPR-System (400) zu bewegen.

17. Cluster-System zur Durchführung von Metrologie und Bearbeitung an einer Probe (410), umfassend: eine Bearbeitungsvorrichtung zum Durchführen eines Herstellungsprozesses an einer Probe (410); das BPR-System (400) nach Anspruch 8; und ein Wafer-Handhabungssystem (802), um eine oder mehrere Proben (410) zwischen der Bearbeitungsvorrichtung und dem BPR-System (400) zu bewegen.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

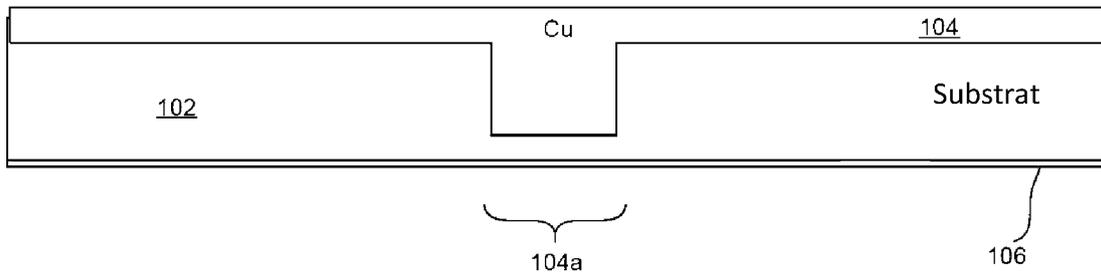


Fig. 1A

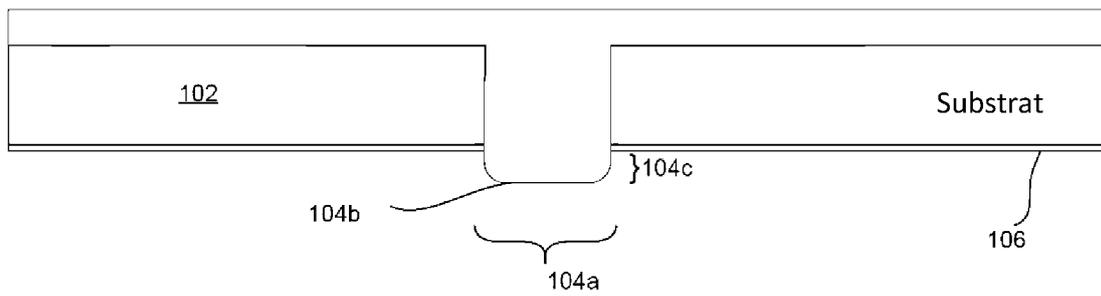


Fig. 1B

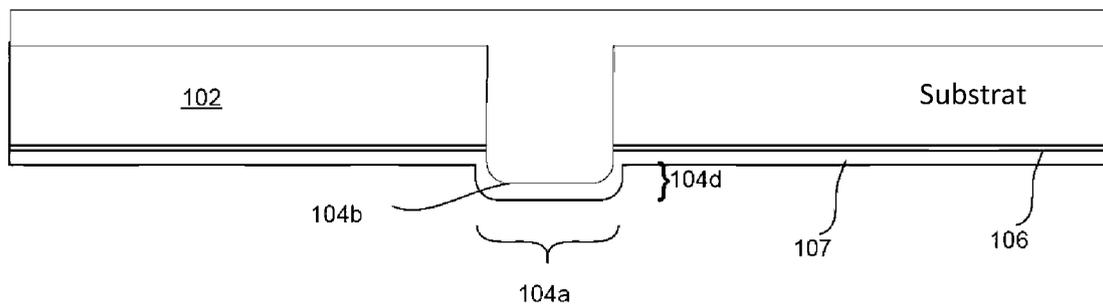


Fig. 1C

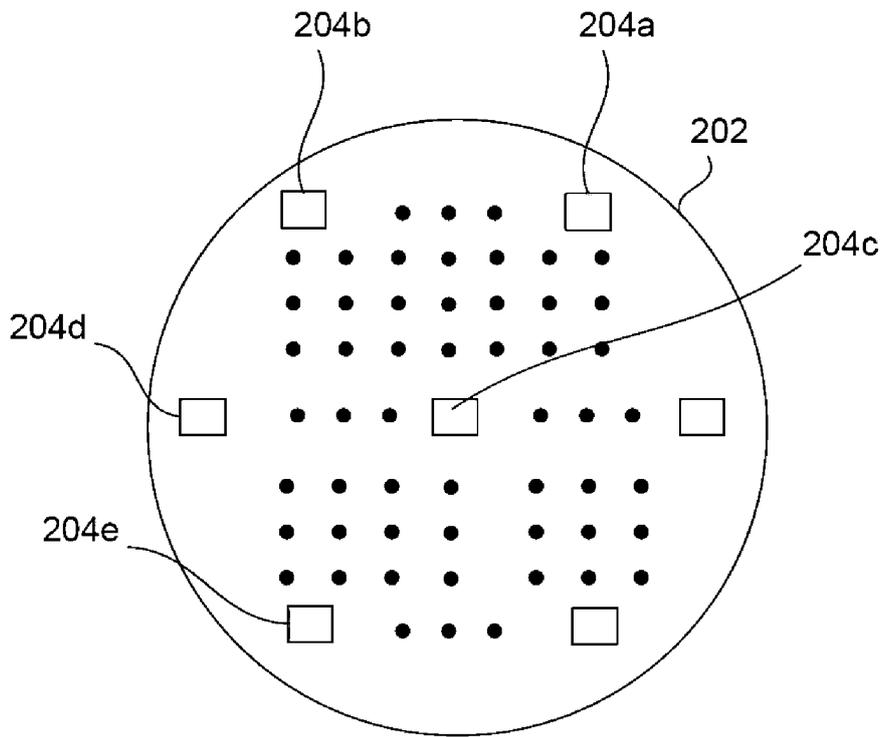


Fig. 2

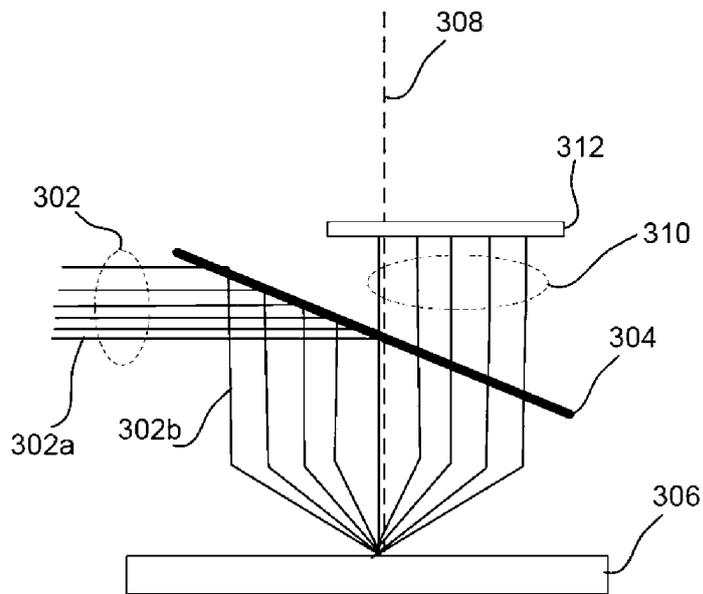


Fig. 3

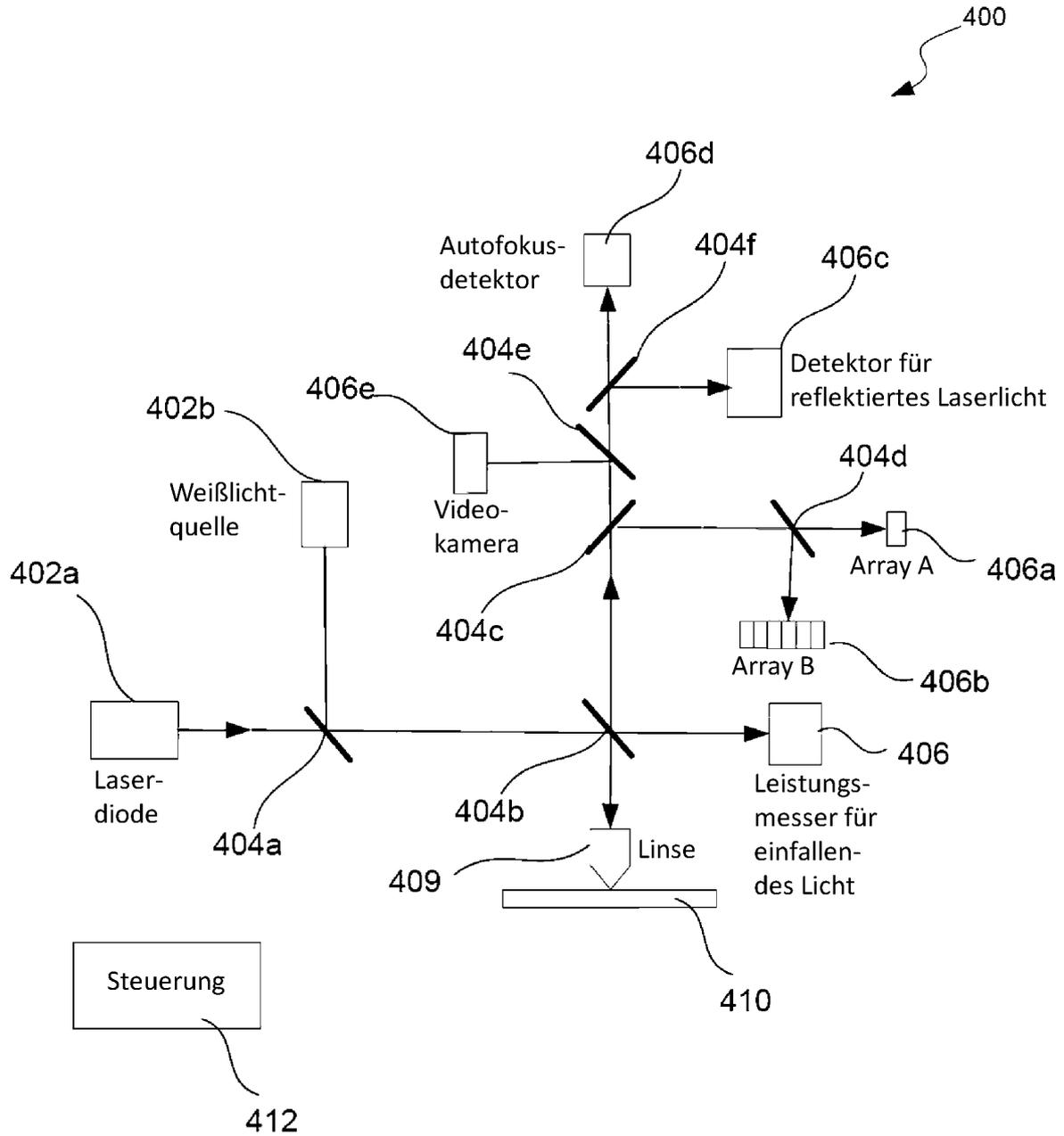


Fig. 4

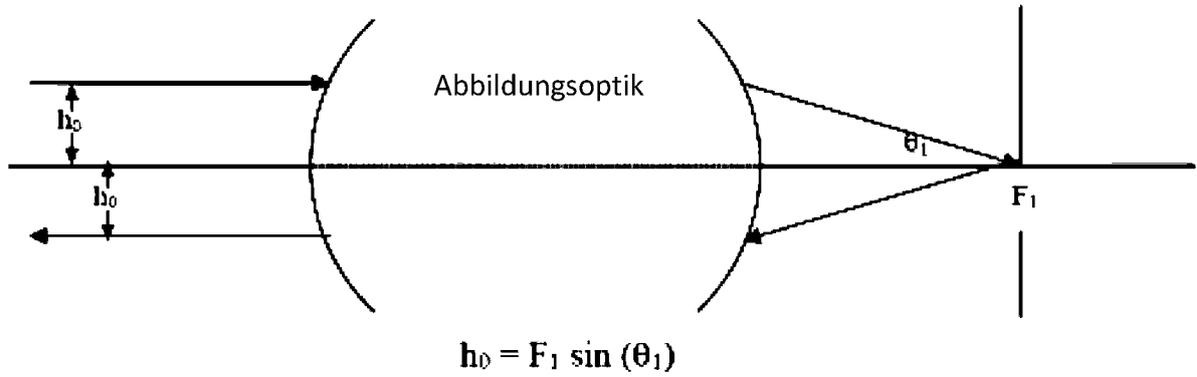


Fig. 5

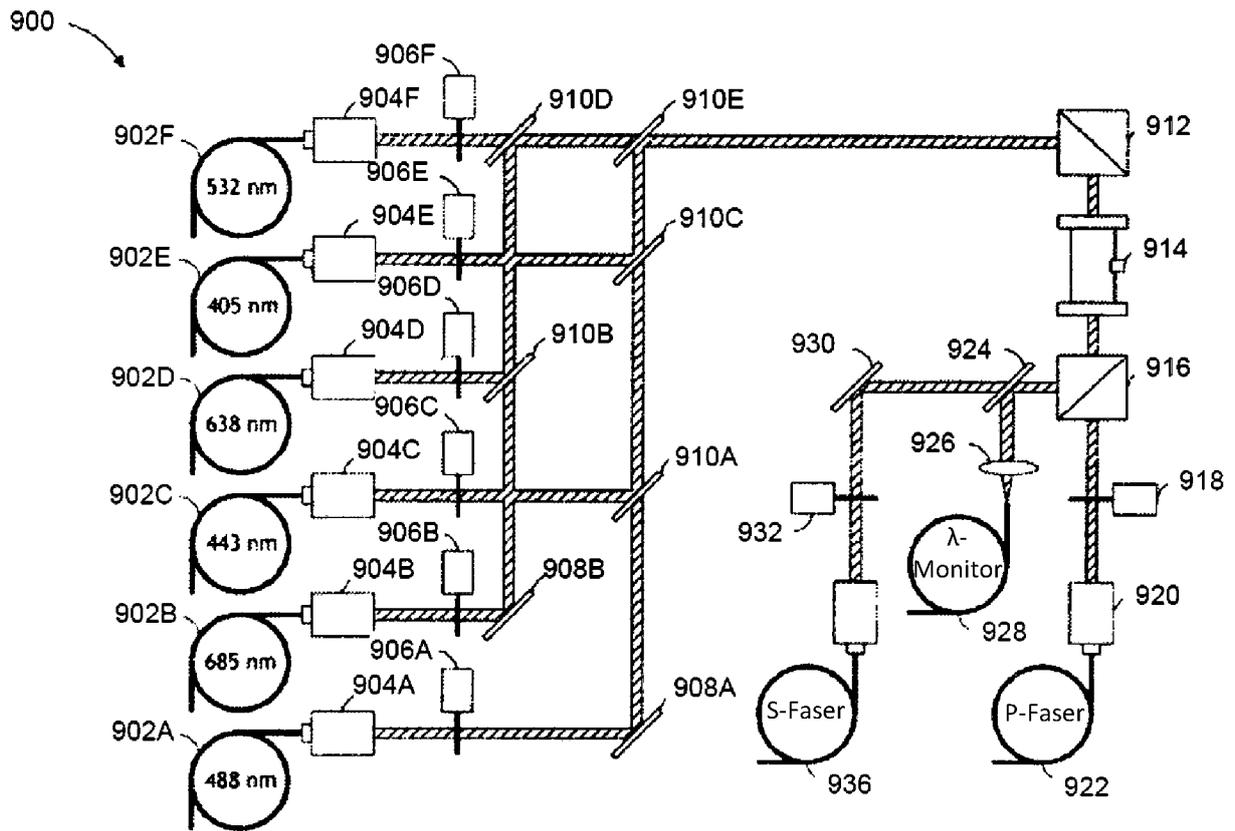


Fig. 9

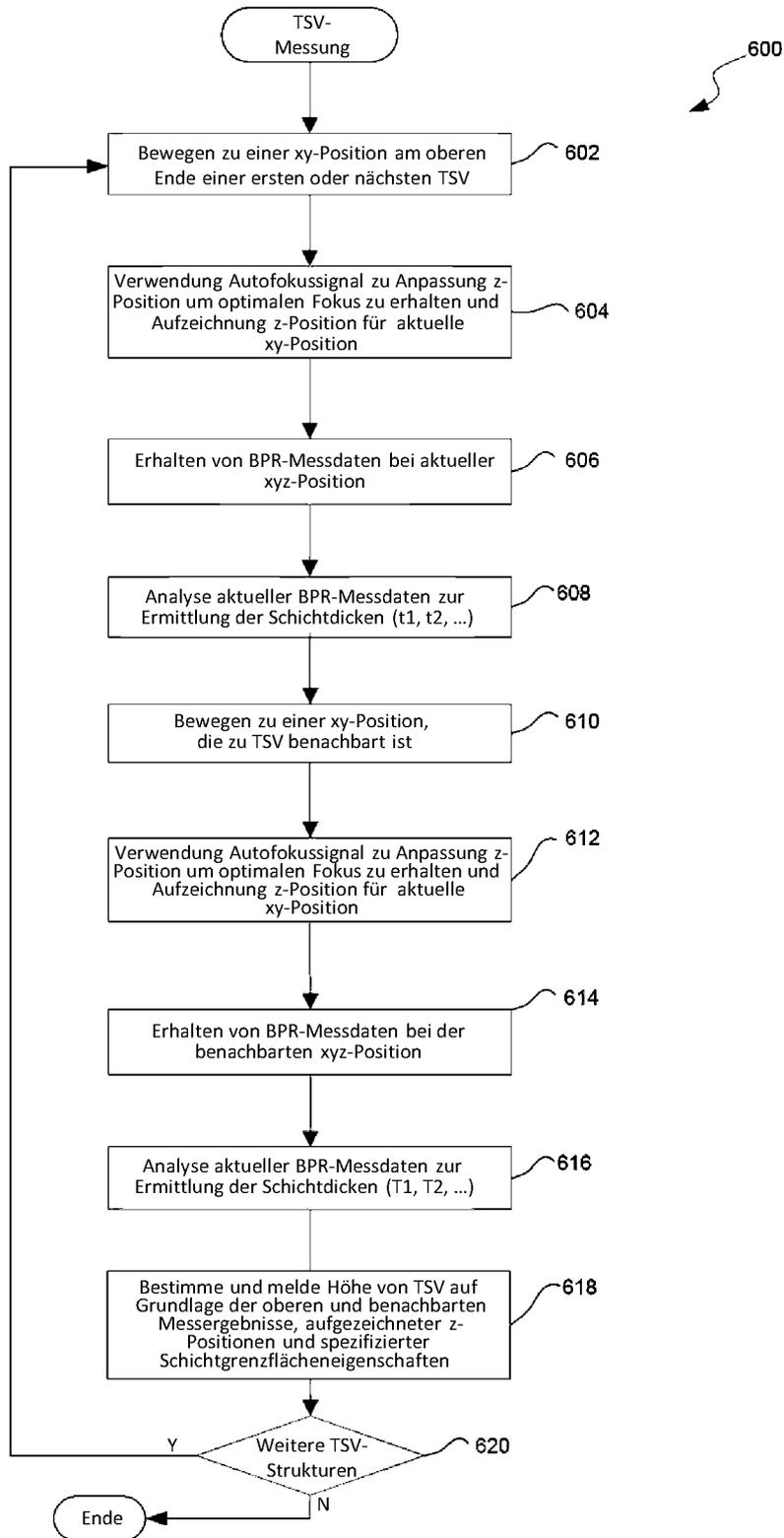


Fig. 6

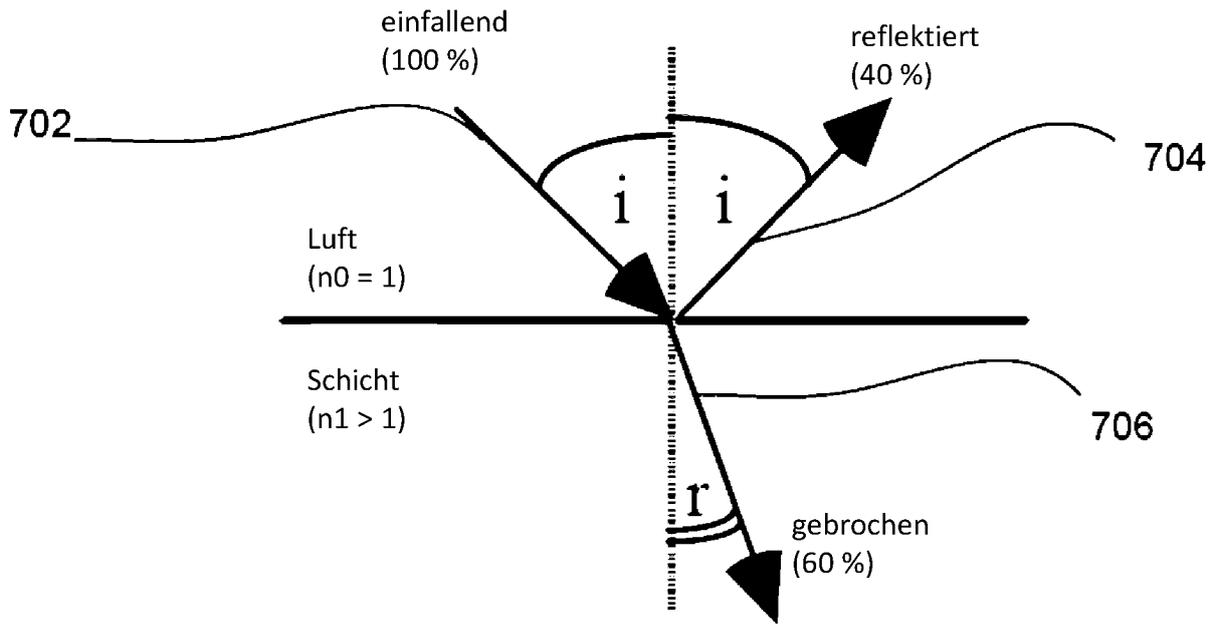


Fig. 7A

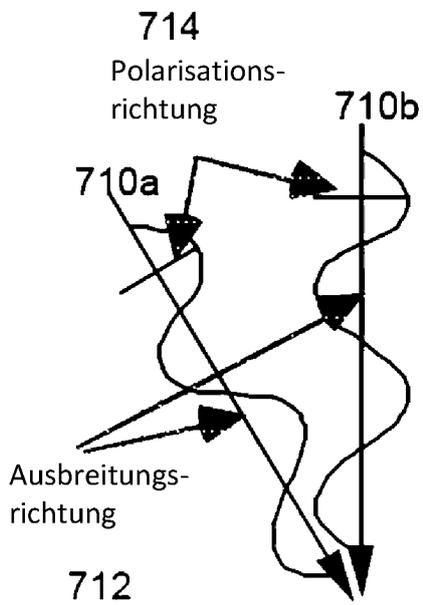


Fig. 7B

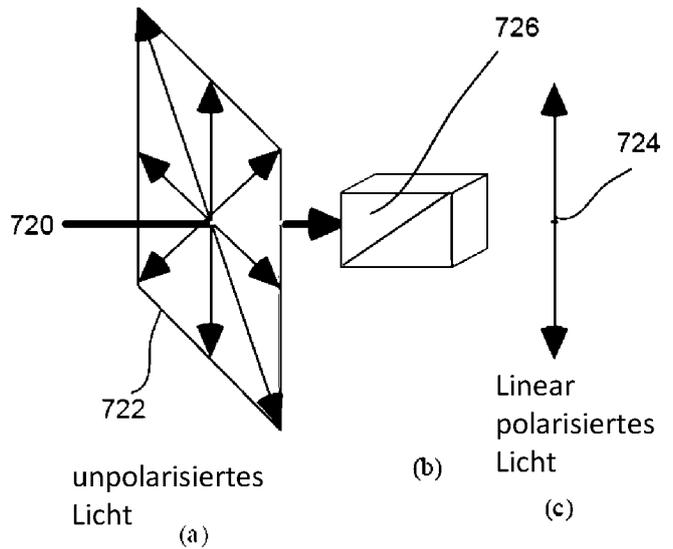
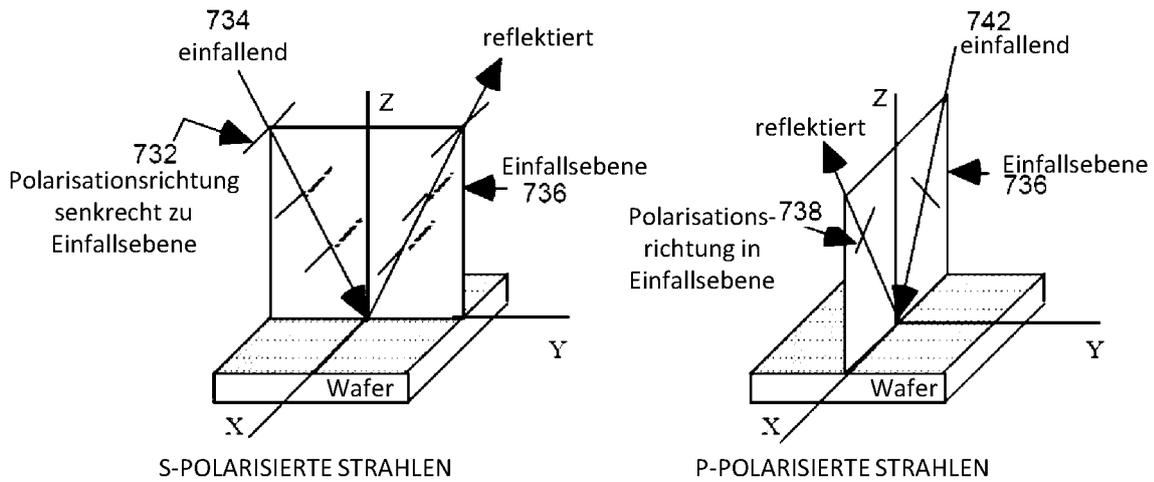


Fig. 7C



Die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts ist in der X-Z-Ebene oder parallel zu der X-Z-Ebene

Fig. 7D

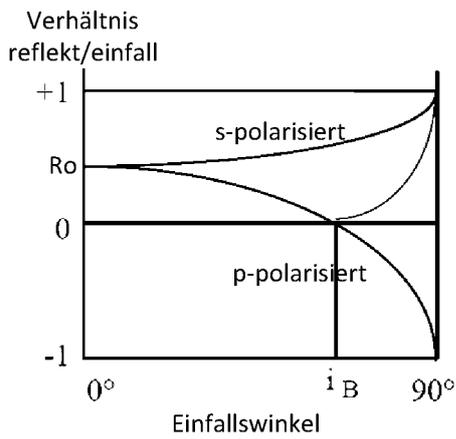


Fig. 7E

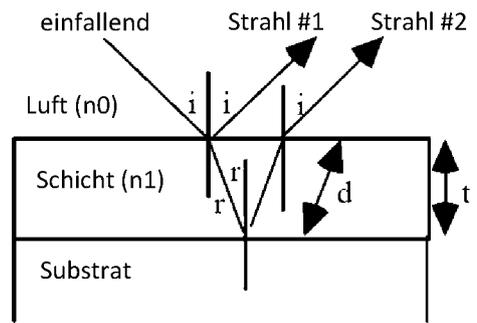


Fig. 7F

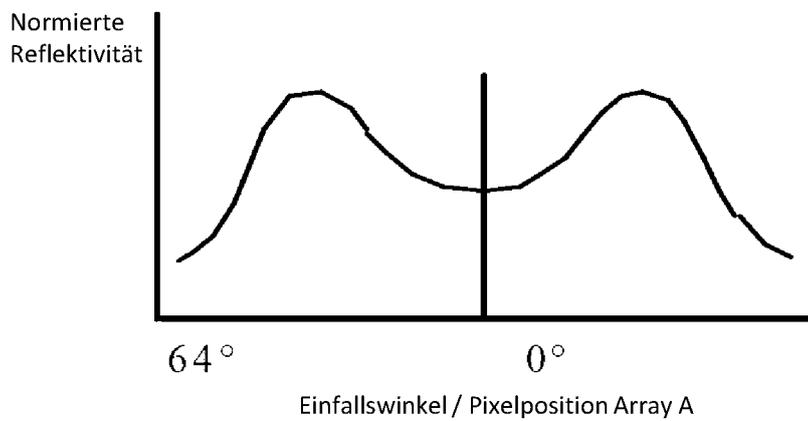


Fig. 7G

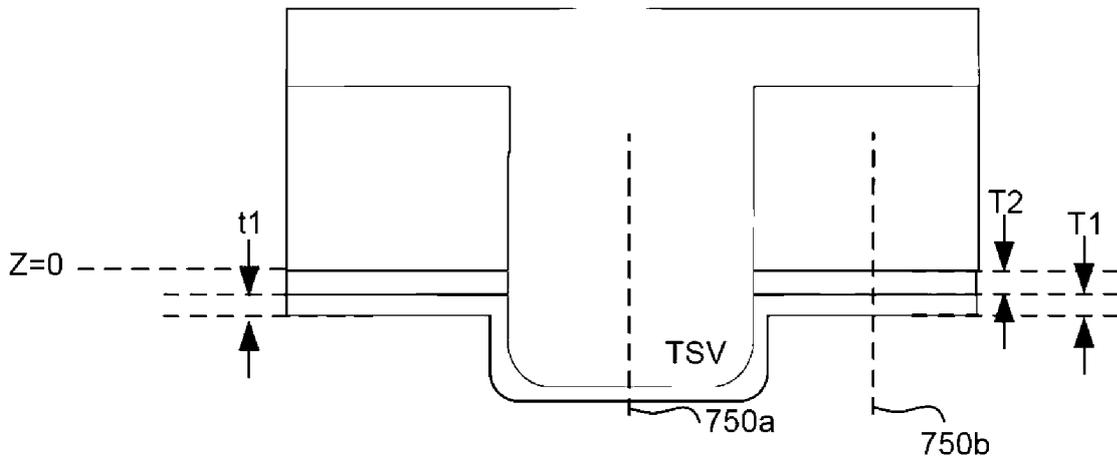


Fig. 7H

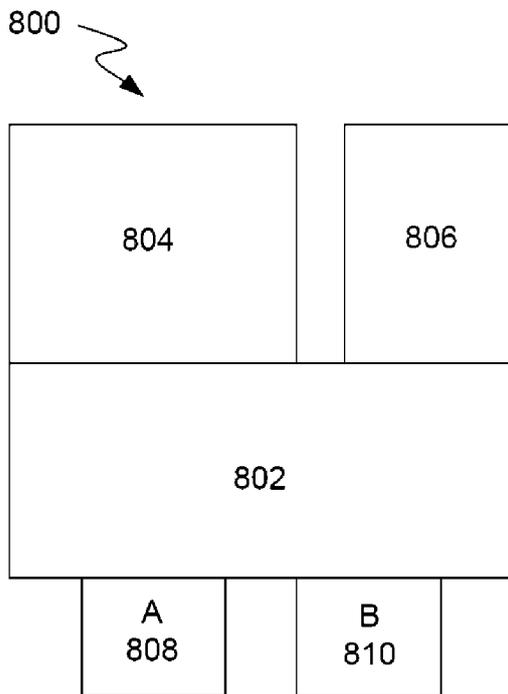


Fig. 8A

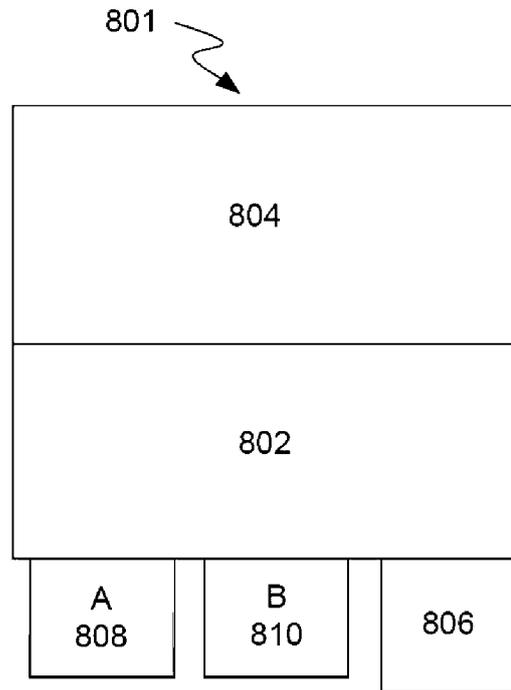


Fig. 8B