

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50390/2019  
(22) Anmeldetag: 29.04.2019  
(43) Veröffentlicht am: 15.11.2020

(51) Int. Cl.: **G01N 21/21** (2006.01)

|      |                                                                                       |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| (71) | Patentanmelder:<br>Universität Linz<br>4040 Linz (AT)                                 |
| (72) | Erfinder:<br>Hingerl Kurt<br>4493 Wolfers (AT)<br>Perin Jean Pierre<br>4020 Linz (AT) |
| (74) | Vertreter:<br>Hübscher & Partner Patentanwälte GmbH<br>4020 Linz (AT)                 |

(54) **Verfahren zur ellipsometrischen Erfassung von Proben**

(57) Es wird ein Verfahren zur ellipsometrischen Erfassung von Proben beschrieben, wobei die Polarisationsunterschiede zwischen dem polarisierten einfallenden Lichtstrahl und dem reflektierten oder transmittierten Lichtstrahl für örtliche Messstellen entlang einer Probenoberfläche gemessen und daraus ein Probenbild aufgrund physikalischer Zusammenhänge erstellt wird. Um räumliche Strukturen inhomogener Proben erfassen zu können, wird vorgeschlagen, dass unter Vorgabe einer räumlichen Modellstruktur aus den gemessenen Polarisationsunterschieden dieser Modellstruktur entsprechende Oberflächenstrukturen oder Strukturen von oberflächennahen Einschlüssen oder Ausscheidungen mithilfe der Maxwell-Gleichungen unter Berücksichtigung von aus der Modellstruktur abgeleiteten Randbedingungen errechnet werden.

## Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zur ellipsometrischen Erfassung von Proben beschrieben, wobei die Polarisationsunterschiede zwischen dem polarisierten einfallenden Lichtstrahl und dem reflektierten oder transmittierten Lichtstrahl für örtliche Messstellen entlang einer Probenoberfläche gemessen und daraus ein Probenbild aufgrund physikalischer Zusammenhänge erstellt wird. Um räumliche Strukturen inhomogener Proben erfassen zu können, wird vorgeschlagen, dass unter Vorgabe einer räumlichen Modellstruktur aus den gemessenen Polarisationsunterschieden dieser Modellstruktur entsprechende Oberflächenstrukturen oder Strukturen von oberflächennahen Einschlüssen oder Ausscheidungen mithilfe der Maxwell-Gleichungen unter Berücksichtigung von aus der Modellstruktur abgeleiteten Randbedingungen errechnet werden.

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur ellipsometrischen Erfassung von Proben, wobei die Polarisationsunterschiede zwischen dem polarisierten einfallenden Lichtstrahl und dem reflektierten oder transmittierten Lichtstrahl für örtliche Messstellen entlang einer Probenoberfläche gemessen und daraus ein Probenbild aufgrund physikalischer Zusammenhänge erstellt wird.

Bei ellipsometrischen Verfahren wird ein polarisierter Lichtstrahl unter einem gegenüber einer Probennormalen gemessenen Einfallswinkel an der Probe reflektiert oder transmittiert und der reflektierte oder transmittierte Lichtstrahl hinsichtlich der sich gegenüber dem einfallenden Lichtstrahl geänderten Polarisation untersucht, um dann aufgrund physikalischer Zusammenhänge, wie sie für eine in der Probenebene homogene Struktur durch die Fresnel-Gleichungen beschrieben sind, auf die Dicke und/oder optischen Eigenschaften von Oberflächenschichten der Probe schließen zu können. Um einfache Konstruktionsverhältnisse für ein Ellipsometer zur bildgebenden Erfassung eines Oberflächenbereichs der Probe zu schaffen, ist es bekannt (WO 2005/088271 A1), die Probe gegenüber dem Ellipsometer zu bewegen, sodass der Oberflächenbereich hinsichtlich der Messstellen rasterartig abgetastet wird und aus den örtlich erfassten Einzelbildern ein Gesamtbild zusammengesetzt werden kann. Ein solches ellipsometrisches Gesamtbild kann beispielsweise zur Überprüfung von Mikroarrays oder Biochips dienen. Vorausgesetzt werden allerdings optisch homogene, also translationsinvariante Proben, mit ebenen Oberflächen, weil beispielsweise durch Unebenheiten unerwünschte optische Abweichungen auftreten, die zusätzliche Maßnahmen zur optischen Fehlerkompensation erfordern. Diese bekannten ellipsometrischen Auswerteverfahren sind daher zur Erfassung von

dreidimensionalen Strukturen im Oberflächenbereich einer Probe ungeeignet. Die Erfassung solcher dreidimensionaler Strukturen, seien es Erhebungen oder Vertiefungen der Oberfläche oder Einschlüsse oder Ausscheidungen in einer oberflächennahen Probenschicht, ist jedoch auf verschiedenen Einsatzgebieten von Interesse.

Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, die Vorteile einer ellipsometrischen Messung auch zur räumlichen, hochauflösenden Strukturermassung im Oberflächenbereich einer Probe zu nützen.

Ausgehend von einem Verfahren der eingangs geschilderten Art löst die Erfindung die gestellte Aufgabe dadurch, dass unter Vorgabe einer räumlichen Modellstruktur aus den gemessenen Polarisationsunterschieden dieser Modellstruktur entsprechende Oberflächenstrukturen oder Strukturen von oberflächennahen Einschlüssen oder Ausscheidungen mithilfe der Maxwell-Gleichungen unter Berücksichtigung von aus der Modellstruktur abgeleiteten Randbedingungen errechnet werden.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass die den Fresnel-Gleichungen zugrundeliegenden Voraussetzungen zwar für die Berechnung der Schichtdicken und optischen Konstanten zutreffen, wenn translationsinvariante Proben vorausgesetzt werden, dass diese Voraussetzungen jedoch für das hochauflösende Erfassen von räumlichen Strukturen wegen der dadurch bedingten optischen Inhomogenitäten nicht mehr gelten und die Randbedingungen fehlen, die zur Lösung der dann anzuwendenden allgemeinen Maxwell-Gleichungen erforderlich sind. Da bei der Untersuchung von Proben häufig nach bestimmten, einer geometrischen Modellstruktur entsprechenden Strukturen gesucht wird, können die zur Lösung der Maxwell-Gleichungen erforderlichen Randbedingungen von einer vorgegebenen Modellstruktur abgeleitet werden. Mit diesen Randbedingungen können dann anhand der gemessenen Polarisationsunterschiede zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und dem reflektierten oder transmittierten Lichtstrahl der Modellstruktur entsprechende Oberflächenstrukturen oder Strukturen von

oberflächennahen Einschlüssen oder Ausscheidungen mithilfe der Maxwell-Gleichungen berechnet werden, wobei nicht nur die Struktur erfasst, sondern auch auf der Basis der erfassten Brechungsindizes auf deren Material rückgeschlossen werden kann. Da nicht die Fresnelgleichungen, sondern zur Lösung der Maxwell-Gleichungen entweder Finite Elemente Modelle, oder bei periodischen Proben „Rigorous Coupled Wave Analysis“ Verfahren verwendet werden, kann ein dreidimensionaler, gegebenenfalls komplexer Brechungsindex  $n(x,y,z)$  bestimmt und nachfolgend aus den Brechungsindexsprüngen (zwischen zwei Materialien) die Geometrie der Strukturen oder Einschlüsse errechnet werden.

Als Modellstruktur kann eine Halbleitergrabenstruktur genannt werden, bei der zwischen elektrisch aktiven Gebieten, beispielsweise auf Siliciumbasis, mit einem isolierendem Material, meist Siliciumoxid, gefüllte Gräben vorgesehen sind. Mit dem erfindungsgemäßen ellipsometrischen Messverfahren lassen sich nicht nur die Länge, Höhe und Breite dieser Grabenstrukturen, sondern auch die Neigungswinkel und Schichtdicken sowie das örtliche Mischungsverhältnis zwischen den eingesetzten Materialien bestimmen, sofern diese Materialien mischbar sind.

Werden die Polarisationsunterschiede zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und dem reflektierten oder transmittierten Lichtstrahl mithilfe der ellipsometrischen Winkel  $\psi$  und  $\Delta$  ermittelt, von denen der Winkel  $\psi$  die Amplitudenänderung und der Winkel  $\Delta$  den Phasenunterschied betrifft, so ergeben sich besonders vorteilhafte Voraussetzungen für eine hohe rechnerische Auflösung der zu erkennenden Strukturen. Gleiches gilt für eine Auswertung anhand der Koeffizienten der Müller-Matrix.

Befinden sich innerhalb der Fläche einer örtlichen Messstelle mehrere der Modellstruktur entsprechende Strukturen unterhalb der optischen Auflösungsgrenze, so können diese Strukturen durch abbildende Verfahren nicht voneinander unterschieden werden. Weil sich aufgrund kohärenter Überlagerung nur der Gesamteinfluss dieser Strukturen unterhalb der optischen Auflösungsgrenze bei der ellipsometrischen Messung innerhalb einer Messstelle in den

Polarisationsunterschieden abbildet, liefert das ellipsometrische Messverfahren sich auf die Gesamtfläche bzw. das Gesamtvolumen bezogene Daten. Rückschlüsse auf mehrere Strukturen im Bereich einer Fläche, die einer Messstelle entspricht, können nur getroffen werden, wenn die Größe der Einzelstruktur beispielsweise aus den Messergebnissen unterschiedlicher Messstellen bekannt ist oder Messungen durchgeführt werden, deren Messstellen einander überlappen.

Um die Messempfindlichkeit zu steigern und Messfehler zu verringern, können spektrometrische Messungen, also Messungen mit Lichtstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge bzw. unterschiedlicher Frequenz, vorgenommen werden. Außerdem können die Polarisationsunterschiede in unterschiedlichen Drehstellungen der Probe bezüglich einer Probennormalen und mit unterschiedlichen Einfallswinkeln des Lichtstrahls gemessen werden, was ebenfalls zur Verbesserung der Messgenauigkeit führt.

Wird die örtliche, auf eine quadratische Fläche mit einer höchstens der Wellenlänge des einfallenden Lichts entsprechenden Seitenlänge beschränkte Messstelle durch ein Mikroskopobjektiv erfasst und werden die Änderungen der ellipsometrischen Winkel  $\psi$  und  $\Delta$  mit einer Auflösung von mindestens 0,0002 Radiant bestimmt, so können Strukturen aufgelöst werden, die unterhalb der durch die Wellenlänge  $\lambda$  des einfallenden Lichtstrahls liegen. Selbst bei einer der kleinsten möglichen optischen Auflösung entsprechenden Messstelle in der Größenordnung eines reflektierenden Oberflächenbereichs der Probe im Bereich von  $\lambda/2 \times \lambda/2$  können mithilfe der durch die ellipsometrischen Winkel  $\psi$  und  $\Delta$  erfassbaren Polarisationsunterschiede Strukturen innerhalb dieser Messstellen erkannt werden, wenn Änderungen der ellipsometrischen Winkel  $\psi$  und  $\Delta$  von kleiner 0,0002 Radiant, vorzugsweise von 0,0001 Radiant, erfasst werden.

Geht man von einer vom einfallenden Lichtstrahl einer örtlichen Messstelle beleuchteten Fläche in der Größenordnung von  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  aus, können bei einer erfassbaren Änderung der beiden ellipsometrischen Winkel  $\psi$  und  $\Delta$  um 0,0001 Radiant räumliche Strukturen bis zur Größenordnung von  $10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$

erkannt werden, was einer Längenauflösung in der Größenordnung von  $1/100$  der Wellenlänge des einfallenden Lichtstrahls entspricht. Das erfindungsgemäße Verfahren stellt somit eine nicht durch Beugung begrenzte optische Messung von Längenstrukturen kleiner als die Wellenlänge zur Verfügung.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur ellipsometrischen Erfassung von Proben, wobei die Polarisationsunterschiede zwischen dem polarisierten einfallenden Lichtstrahl und dem reflektierten oder transmittierten Lichtstrahl für örtliche Messstellen entlang einer Probenoberfläche gemessen und daraus ein Probenbild aufgrund physikalischer Zusammenhänge erstellt wird, dadurch gekennzeichnet, dass unter Vorgabe einer räumlichen Modellstruktur aus den gemessenen Polarisationsunterschieden dieser Modellstruktur entsprechende Oberflächenstrukturen oder Strukturen von oberflächennahen Einschlüssen oder Ausscheidungen mithilfe der Maxwell-Gleichungen unter Berücksichtigung von aus der Modellstruktur abgeleiteten Randbedingungen errechnet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsunterschiede mithilfe der ellipsometrischen Winkel  $\psi$  und  $\Delta$  oder der Koeffizienten der Müller-Matrix bestimmt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsunterschiede bei unterschiedlichen Wellenlängen des einfallenden Lichtstrahls gemessen werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsunterschiede in unterschiedlichen Drehstellungen der Probe bezüglich einer Probennormalen gemessen werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die örtliche, auf eine quadratische Fläche mit einer höchstens der Wellenlänge des einfallenden Lichts entsprechenden Seitenlänge beschränkte Messstelle durch ein Mikroskopobjektiv erfasst wird und die Änderungen der ellipsometrischen Winkel  $\psi$  und  $\Delta$  mit einer Auflösung von mindestens 0,0002 Radiant bestimmt werden.