



(10) **DE 10 2011 111 613 B4** 2013.03.07

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 111 613.7**

(22) Anmeldetag: **25.08.2011**

(43) Offenlegungstag: **28.02.2013**

(45) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung: **07.03.2013**

(51) Int Cl.: **H01J 37/32 (2011.01)**
C23C 14/34 (2011.01)

Innerhalb von drei 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).

(73) Patentinhaber:

**Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und
Energie GmbH, 14109, Berlin, DE**

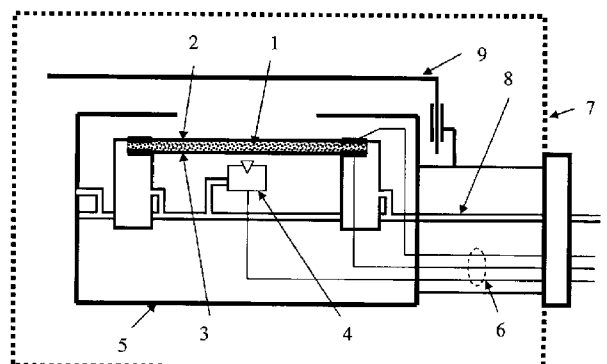
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
siehe Folgeseiten

(72) Erfinder:

**Ellmer, Klaus, Dr. Dipl.-Phys., 12683, Berlin, DE;
Harbauer, Karsten, 14469, Potsdam, DE**

(54) Bezeichnung: **Sensoranordnung zur Charakterisierung von Plasmabeschichtungs-, Plasmaätz- und
Plasmabehandlungsprozessen sowie Verfahren zur Ermittlung von Kenngrößen in diesen Prozessen**

(57) Zusammenfassung: Bei der beanspruchten Sensoranordnung ist die dem Plasmaätz-, Plasmabeschichtungs- oder Plasmabehandlungsprozess ausgesetzte Frontelektrode (2) des Schwingquarzes (1) isoliert gegen das Gehäuse (5) der Anordnung und als planare Langmuir-Sonde ausgebildet und mit einem außerhalb der Plasmaanlage angeordneten Strom-Spannungs-Kennlinien-Messgerät (14) zur Messung der Langmuir-Kennlinie ($I_L(U)$) verbunden, gegenüber der Rückelektrode (3) des Schwingquarzes (1) ist ein pyrometrischer Sensor (4) zur Messung der mittleren Temperatur (T_Q) der Rückelektrode (3) des Schwingquarzes (1) angeordnet und der Schwingquarz (1) mit seiner als planare Langmuir-Sonde ausgebildeten Frontelektrode (2) und der pyrometrische Sensor (4) bilden einen Kombinationssensor (10), der in einem Sensorgehäuse (5) angeordnet ist, das eine der Frontelektrode (2) des Schwingquarzes (1) gegenüber liegende Öffnung aufweist, außerhalb des Sensorgehäuses (5) zwischen dessen Öffnung und der Plasmaquelle in der Plasmaanlage eine schwenkbare Abschirmblende (9) angeordnet ist, der Kombinationssensor (10) verfahrbar ausgebildet und mit Mess- (12, 13, 14) und Auswerteeinheiten und diese mit einem Rechner (15) zur Datenaufnahme, -auswertung und -darstellung verbunden sind, wobei der Schwingquarz (1) mit einer Messeinheit (13) für die Bestimmung der Schwingquarzfrequenz (f_Q) und die planare Langmuir-Sonde (14) mit einer Messeinheit für die Messung ihrer Strom-Spannungs-Kennlinie ($I_L(U)$) und der pyrometrische Sensor (4) mit einem Messverstärker (12) verbunden ist, und der Rechner (15) mittels eines Messprogramms aus diesen Messgrößen die Abscheide- bzw. Ätzrate ($R(t)$), die Plasmadichte (n_e bzw. n_i), die Elektronentemperatur (T_e) und den totalen Energieeintrag (E_{ein}) der Plasmaprozesse ermittelt.



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

US 6 902 646 B2

Coburn, J.: Quartz Crystal Microbalances
for Plasma-Assisted Etching Chapter 7.
Amsterdam : Elsevier, 1984. 221-249. - ISBN -

Ellmer, K., Lichtenberger, D.: Plasma
diagnostics by energy resolved quadrupole
mass spectrometry In: Surface and Coatings
Technology, 74-75, 1995, 586-593.

Ellmer, K.; Mientus, R.: Calorimetric
measurements with a heat flux transducer of
the total power influx onto a substrate during
magnetron sputtering. In: Surface and Coatings
Technology, 116-119, 1999, 1102-1106.

Gardon, R.: An Instrument for the Direct
Measurement of Intense Thermal Radiation. In:
Rev. Sci. Instr., 24, May 1953, 5, 366-70.

Goeckner, M. J. et al.: Laser-induced
fluorescence characterization of ions in a
magnetron plasma. In: J. Vac. Sci. Technol. A, 8,
1990, 6, 3920-4.

Green, K. M. et al: Determination of flux
ionisation fraction In: Rev. of Sci. Instr., 68,
1997, 12, 4555-4560.

Harbauer, K.: Diplomarbeit - Aufbau und
Inbetriebnahme eines Kombinationssensors
zur kombinierten Plasma- und
Schichtdickencharakterisierung während des
Magnetronspüterns. Wildau : TFH Wildau, 2005.
17-61. - ISBN -

Hayderer, G. et al: A highly sensitive quartz-
crystal microbalance In: Rev. Sci. Instr., 70,
1999, 9, 3696-3700.

Hecht, G. et al: Thin Films, Proc. 4th Int. Symp.
Trends in Thin Films TATF'94/11th Conf. High
Vacuum, Interfaces, Thin Films HVITF'94. In: Thin
Films, 1994, 131-134. - ISSN 3883551996

Lee, D.; Hershkowitz, N.: Ion Collection by
Planar Langmuir probes: Sheridan's Model In:
Physic of Plasmas, 14, 2007, 033507 (4 S.).

Lu, Ch.-Sh.; Lewis, O.: Investigation of film-
thickness determination by oscillating quartz
resonators with large mass load. In: J. Appl
Phys., 43, Nov. 1972, 11, 4385-90.

Seeger, S.; Ellmer, K.: Reactive Magnetron
Sputtering of CuInS-Absorbers In: Thin Solid
Films, 517, 2009, 3143-7.

Sittinger, V., Wiese, R. u.a.; "ProbePlas
Sondentechnik in der Plasmatechnik",
Zwischenbericht des INP Greifswald u.
des Fraunhoferinstituts für Schicht- und
Oberflächentechnik, S. 14/15

Stahl, M. et al: A calorimetric probe for plasma
diagnostics. In: Rev. of Sci. Instr., 81, 2010,
023504 (4 S.).

Thornton, John A.: Diagnostic methods for
sputtering plasmas. In: J. Vac. Sci. Technol., 15,
1978, 2, 188-192.

Wendt, R.; Ellmer, K.; Wiesemann, K.: Thermal
power at a substrate during Zn=Al thin film
deposition in a planar magnetron sputtering
system. In: J. Appl. Phys., 82, Sept. 1997, 5, 2115-
22.

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Sensoranordnung zur Charakterisierung von Plasmabeschichtungs-, Plasmaätz- und Plasmabehandlungsprozessen sowie ein Verfahren zur Ermittlung von Kenngrößen in diesen Prozessen. Bei einem Plasmabehandlungsprozess wird ein Plasma benutzt, um eine Oberfläche zu funktionalisieren oder zu aktivieren. Damit werden die Eigenschaften der behandelten Oberfläche in einer Tiefe von ein bis zwei Monolagen beeinflusst.

[0002] Plasmabeschichtungs- und Plasmaätzprozesse werden dem Stand der Technik nach charakterisiert, indem nacheinander die Beschichtungs- oder Ätzrate mittels eines Schwingquarz-Schichtdickenmonitors (s. beispielsweise Applications of Piezoelectric Quartz Crystal Microbalances, Elsevier, Amsterdam, 1984, pp. 221), die Plasmadichte mittels einer zylindrischen oder planaren Langmuirsonde (z. B. beschrieben in Plasma Diagnostics, Academic Press, Boston, 1989, pp. 113) und der totale Energieeintrag mittels einer kalorimetrischen Sonde (J. Vac. Sci. Techn. 15/2 (1978) 188 und Rev. Sci. Instr. 10 (2010) 023504) gemessen werden. In US 6 902 646 B2 wird die Anwendung eines planaren Langmuir-Sondenarrays zur Plasmacharakterisierung beschrieben.

[0003] In der Veröffentlichung Rev. Sci. Instr. 68 (1997) 4555 wurde eine Kombination aus einem Schwingquarz-Schichtdickenmonitor und einem Gegenfeldanalysator beschrieben, um die Beschichtungsrate durch Neutralteilchen und durch Ionen voneinander zu trennen. Über den Einsatz eines speziellen Schwingquarzes für die Untersuchung der Sputterrate von dünnen Schichten durch niederenergetische Ionen ($E_i < 500$ eV) wurde in Rev. Sci. Instr. 70 (1999) 3696 berichtet.

[0004] Die nach den beschriebenen Methoden erfolgten Messungen sind meistens zeitaufwändig, weshalb oftmals nur eine dieser Methoden verwendet wurde.

[0005] Noch aufwändigere Methoden – wie die laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie (LIF), beschrieben in J. Vac. Sci. Techn. A 8 (1990) 3920, oder die Aktinometrie – werden ausschließlich in der Forschung eingesetzt.

[0006] Auf die Möglichkeit der optischen Bestimmung der Sondentemperatur einer Langmuir-Sonde, allerdings nur zum „Glühen“ der Sonde auf Temperaturen von mehreren hundert °C, um Kontaminationen zu entfernen, wird von Sittinger, V., Wiese, R. u. a. in „ProbePlas Sondentechnik in der Plasmatechnik“, Zwischenbericht des INP Greifswald und des Fraunhofer Instituts für Schicht und Oberflächentechnik, S. 14/15 hingewiesen.

[0007] Beim Anmelder wurden in den letzten 20 Jahren Arbeiten zur Charakterisierung von Plasmabeschichtungsprozessen, speziell von Magnetronentladungen, kontinuierlich durchgeführt. Mittels eines Plasmaprozessmonitors (PPM) – einer Kombination aus Massenspektrometer und Energieanalysator – wurden Spezies und deren Energien am Substratort gemessen, wie in Surf. Coat. Techn. 74/75 (1995) 586 und Thin Solid Films 517 (2009) 3143 beschrieben. Die Abhängigkeit der Schichtdicken von gesputterten Metallen, Oxiden und Nitriden von der Entladungsleistung wurde mittels eines Schwingquarz-Schichtdickenmonitors gemessen (s. Thin Films/11th Conf. On High Vacuum, Interfaces and Thin Films, DGM Informationsgesellschaft mbH, Oberursel, Dresden, March, 1994, pp. 131 und Surf. Coat. techn. 116–119 (1999) 1102). Für die Abscheidung von Zinkoxid wurden bereits Messungen mit einem PPM, mit einer Langmuir-Sonde und einer Thermosonde nach Thornton kombiniert, die nacheinander ausgeführt werden mussten (J. Appl. Phys. 82/5 (1997) 2115). Ziel war hierbei die Quantifizierung der verschiedenen Teilchen-Flüsse aus dem Plasma und vom Target auf eine wachsende ZnO-Schicht. Der aus anderen technischen Bereichen bekannte Gardon-Sensor wurde zur Energiestrom-Messung eingesetzt, um verschiedene Magnetronsputterquellen hinsichtlich ihres Energieeintrags zu charakterisieren (K. Ellmer, R. Mientus, Surf. Coat. Techn. 116–119 (1999) 1102).

[0008] Der Stand der Technik, von dem die Erfindung ausgeht, ist in der Diplomarbeit von K. Harbauer (FB Physikalische Technik, Techn. Fachhochschule Wildau, 2005) beschrieben. Es handelt sich um einen Kombinationssensor, der unter anwendungsnahen Bedingungen Magnetronsputterquellen hinsichtlich Abscheiderate, Energieeinstrom und Plasmaparameter quantifizieren soll. Dieser noch wenig kompakte Sensor vereint in einem gekühlten Metallblock fünf verschiedene Einzeldetektoren wie Schwingquarz, Langmuir-Sonde, Gardonsensor, Biegebalkensensor und Schichtwiderstandssensor.

[0009] Aufgabe der Erfindung ist es, eine Sensoranordnung anzugeben, deren Aufbau weniger aufwändig im Vergleich zum Stand der Technik ist und die es gestattet, simultan mehrere Messgrößen zu erfassen. Die Sensoranordnung soll eine im Vergleich zum Stand der Technik schnellere und exaktere Charakterisierung technologischer Plasmaprozesse, beispielsweise zur Herstellung dünner Schichten in der Mikroelektronik, der Optik, bei der Hartstoffbeschichtung, in der Photovoltaik oder bei der Architekturglasbeschichtung, ermöglichen. Ein Verfahren zur Messung von Parametern zur Charakterisierung der genannten Plasmaprozesse soll ebenfalls angegeben werden.

[0010] Die Aufgabe wird durch eine Anordnung der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass erfindungsgemäß die dem Plasmaätz-, Plasmabeschichtungs- oder Plasmabehandlungsprozess ausgesetzte Frontelektrode eines Schwingquarzes isoliert gegen ein Sensorgehäuse der Anordnung und als planare Langmuir-Sonde ausgebildet und mit einem außerhalb der Plasmaanlage angeordneten Strom-Spannungs-Kennlinien-Messgerät zur Messung der Langmuir-Sonden-Kennlinie ($I_L(U)$) verbunden ist, gegenüber der Rückelektrode des Schwingquarzes ein pyrometrischer Sensor zur Messung der mittleren Temperatur (T_Q) der Rückelektrode des Schwingquarzes angeordnet und der Schwingquarz mit seiner Frontelektrode und der pyrometrische Sensor einen Kombinationssensor bilden, der in dem Sensorgehäuse angeordnet ist, das eine der Frontelektrode des Schwingquarzes gegenüber liegende Öffnung aufweist, außerhalb des Sensorgehäuses zwischen dessen Öffnung und der Plasmaquelle in der Plasmaanlage eine schwenkbare Abschirmblende angeordnet ist, der Kombinationssensor verfahrbar ausgebildet und mit Mess- und Auswerteeinheiten und diese mit einem Rechner zur Datenaufnahme, -auswertung und -darstellung verbunden sind, wobei der Schwingquarz mit einer Messeinheit für die Bestimmung der Schwingquarzfrequenz (f_Q) und die planare Langmuir-Sonde mit einer Messeinheit für die Messung ihrer Strom-Spannungs-Kennlinie ($I_L(U)$) und der pyrometrische Sensor mit einem Messverstärker verbunden ist, und der Rechner aus diesen Messgrößen die Abscheide- bzw. Ätzrate ($R(t)$), die Plasmadichte (n_e bzw. n_i), die Elektronentemperatur (T_e) und den totalen Energieeintrag (E_{ein}) des Plasmaprozesses ermittelt.

[0011] Durch die Modifizierung des Schwingquarzes, der gleichzeitig als planare Langmuir-Sonde und als Energiestrommesser benutzt werden kann, ist eine im Vergleich zum Stand der Technik kompaktere Ausbildung der Sensoranordnung möglich. Der erfindungsgemäße Sensor gestattet die simultane Erfassung von vier Messgrößen, wodurch eine schnelle Charakterisierung technologischer Plasmaprozesse ermöglicht wird.

[0012] In einer ersten Ausgestaltung ist vorgesehen, dass der pyrometrische Sensor einen gegen thermische Strahlung abgeschirmten Referenztemperatursensor aufweist.

[0013] Bei einer anderen Ausgestaltung ist die Rückelektrode des Schwingquarzes mit einer Schicht versehen, die eine hohe thermische Emissivität aufweist. Diese Schicht kann beispielsweise aus Ruß, einer nanostrukturierten Metall-Oxid-Mischschicht (Cermet), einer spektral selektiven Absorberschicht für Solar Kollektoren oder einem vakuumtauglichen Thermolack bestehen.

[0014] Der Kombinationssensor ist in einer weiteren Ausgestaltung mit dem Sensorgehäuse thermisch verbunden und weist Mittel zur Kühlung auf, um Sensorgehäuse und Schwingquarz auf eine konstante Temperatur einzustellen.

[0015] Die Erfindung umfasst auch ein Verfahren zur Ermittlung von Kenngrößen von Plasmabeschichtungs- und Plasmaätzprozessen in einer Plasmaanlage für die Herstellung dünner Schichten unter Verwendung der beschriebenen erfindungsgemäßen Sensoranordnung, wobei das Verfahren die folgenden Verfahrensschritte umfasst: gleichzeitiges Messen der Resonanzfrequenz (f_Q) eines Schwingquarzes, der I-U-Kennlinie ($I_L(U)$) einer planaren Langmuir-Sonde sowie der mittleren Temperatur (T_Q) der Rückelektrode des Schwingquarzes an einer Position eines Kombinationssensors in der Plasmakammer mit einer Zeitauflösung im ms- bis s-Bereich, danach Übermitteln der gemessenen Daten (f_Q , $I_L(U)$ und T_Q) an einen Rechner zur Datenaufnahme, -auswertung und -darstellung, anschließend Bestimmen von Parametern des Plasmabeschichtungs- oder Plasmaätzprozesses wie Schichtdicke ($d(t)$) bzw. Abscheide- oder Ätzrate ($R(t)$), Plasmadichte (n_e bzw. n_i), Elektronentemperatur (T_e) und Energieeintrag (E_{ein}) aus den übermittelten Daten mittels eines Rechenprogramms, wobei bei der Bestimmung von Schichtdicke ($d(t)$) bzw. Abscheide- oder Ätzrate ($R(t)$) und Plasmadichte (n_e bzw. n_i) sowie Elektronentemperatur (T_e) die geometrischen Abmessungen von Schwingquarz und Langmuir-Sonde berücksichtigt werden und bei der Bestimmung des totalen Energieeintrags (E_{ein}) ein Energieeintrag-Kalibrierfaktor berücksichtigt wird, wobei der Energieeintrag-Kalibrierfaktor mittels einer kalibrierten Energiequelle, vorzugsweise eines Laserstrahls, vor dem Messen der mittleren Temperatur (T_Q) oder mittels Änderung der Energie von Ionen und Elektronen direkt aus dem Plasma bestimmt wird.

[0016] Der Energieeintrag E_{in} ist nach der Theorie des Gardon-Sensors (R. Gardon, Rev. Sci. Instr. 24/5 (1953) 366.) proportional zur mittleren Temperatur der dem Energiestrom ausgesetzten Membran, in unserem Fall der des Schwingquarzes:

$$E_{\text{in}} = c_{\text{th}} \cdot T_{\text{mittel}} \quad (1),$$

wobei c_{th} der Kalibrierfaktor ist (der in situ oder ex situ bestimmt werden kann, und T_{mittel} ist die mit dem pyrometrischen Sensor gemessene Temperatur des Schwingquarzes.

[0017] Die Schichtdicke des Films d_f (oder der Schichtabtrag) wird aus der Resonanzfrequenz f_r des Schwingquarzes nach einer der bekannten Methode berechnet, siehe z. B. J. Appl. Phys 43 (1972) 4385. Umstellung von Gleichung (9) aus der Arbeit von Lu und Lewis ergibt für die Dicke des Films

$$d_f = \frac{\rho_q d_q}{\rho_f} \left(\frac{f_q}{f_f} - 1 \right) \quad (2),$$

wobei r_q und r_f die Dichte des Schwingquarzes und der Schicht sind, d_q ist die Dicke des Quarzes und f_q und f_f sind die Resonanzfrequenzen des unbeschichteten und des beschichteten Schwingquarzes. Bei Verwendung eines kommerziellen Schwingquarzschichtdickenmessgerätes wird von diesem direkt die Schichtdicke (oder der Schichtabtrag) an das Auswerteprogramm übertragen. Die Analyse der gemessenen I-U-Kennlinien der planaren Langmuirsonde erfolgt durch die in der Literatur angegebenen Auswertalgorithmen, siehe z. B. Phys. Plasmas 14 (2007) 033507.

[0018] Das erwähnte Rechenprogramm kann gleichzeitig für die Ansteuerung der elektrischen oder der Gasversorgung der Plasmaquelle genutzt werden. So können systematische Abhängigkeiten (z. B. von der Entladungsleistung, der Substratvorspannung, dem Entladungsdruck oder von radialen oder axialen Profilen) schnell gemessen werden, wodurch eine umfassende und schnelle quantitative Analyse der Prozesscharakteristiken von Plasmaquellen ermöglicht wird.

[0019] In Ausgestaltung des Verfahrens ist vorgesehen, für Sensorgehäuse und Schwingquarz die gleiche Temperatur einzustellen. Eine andere Ausgestaltung des Verfahrens umfasst auch den Verfahrensschritt der Berechnung des Verhältnisses von Ionenfluss- zu Neutralteilchenfluss im Plasma während des Ätz-, Beschichtungs- bzw. Behandlungsprozesses.

[0020] Für die Bestimmung von räumlichen Profilen der zu ermittelnden Plasmaparameter wird der Kombinationssensor in verschiedene Messpositionen gefahren und die Messung an den einzelnen Komponenten des Kombinationssensors – der Resonanzfrequenz (f_Q) eines Schwingquarzes, der I-U-Kennlinie ($I_L(U)$) einer planaren Langmuir-Sonde sowie der mittleren Temperatur (T_Q) der Rückelektrode des Schwingquarzes – wiederholt.

[0021] Die Erfindung wird in folgendem Ausführungsbeispiel anhand von Figuren näher beschrieben.

[0022] Dabei zeigen die Figuren

[0023] Fig. 1: schematisch den Schnitt durch einen erfindungsgemäßen Kombinationssensor;

[0024] Fig. 2: das elektrische Blockschaltbild des Kombinationssensors mit Auswerteeinheiten und Rechner.

[0025] Der Kombinationssensor, dargestellt in Fig. 1, ist in einer Vakuumpumpe **7** angeordnet und weist einen Schwingquarz **1** auf, dessen Frontelektrode **2** isoliert ist gegen das Sensorgehäuse **5**. Dadurch ist die Messung der Langmuir-Kennlinie möglich, da nun der elektrische Strom I_Q auf diese dem Plasma ausgesetzte Elektrode als Funktion des Potentials Φ_Q relativ zum Plasmapotential Φ_P gemessen werden kann. Auf der Seite der Rückelektrode **3** des Schwingquarzes **1** ist ein pyrometrischer Sensor **4** angeordnet, der mit einem großen Öffnungswinkel – beispielsweise von ca. 64° – die mittlere Temperatur dieser Rückelektrode **3** misst. Die Kontaktfeder (nicht dargestellt) auf der Rückseite des Schwingquarzes **1** ist so konfiguriert, dass sie nicht das Gehäuse des pyrometrischen Sensors **4** kontaktiert und den optischen Strahlengang nicht einschränkt. Der pyrometrische Sensor **4** hat einen gegen thermische Strahlung abgeschirmten Referenztemperatursensor, so dass eine hohe Messgenauigkeit für die Temperatur des Schwingquarzes **1** möglich ist ($\Delta T < 0,02$ K). Um das zu messende Infrarotsignal vom Schwingquarz **1** möglichst groß zu machen, kann die Rückelektrode **3** des Schwingquarzes **1** mit einer speziellen Schicht mit einer hohen thermischen Emissivität ϵ beschichtet werden. Mittels einer Wasserkühlung **8** wird das Sensorgehäuse **5** gemeinsam mit dem Schwingquarz **1** auf konstanter Temperatur gehalten, um die thermische Drift der Schwingquarzfrequenz zu minimieren. Elektrische Zuleitungen **6** führen von den Komponenten des Kombisensors zu den entsprechenden Mess- und Auswerteeinheiten **12**, **13**, **14**. Die schwenkbare Blende **9** vor dem Kombinationssensor dient der Abschirmung des Sensors gegen das Plasma **11** (s. Fig. 2) und damit gegen Beschichtung bzw. Ätzabtrag. Damit ist eine Kontrolle des Nullsignals des Kombinationssensors in regelmäßigen Abständen möglich. Gleichzeitig wird die Dicke der wachsenden Schicht auf der Frontelektrode **2** begrenzt, so dass der Schwingquarz **1** für längere Messserien benutzt werden kann.

[0026] Nach der gleichzeitigen Messung der Resonanzfrequenz (f_Q) des Schwingquarzes **1**, der I-U-Kennlinie ($I_L(U)$) der aus der Frontelektrode **2** des Schwingquarzes **1** gebildeten planaren Langmuir-Sonde sowie der mittleren Temperatur (T_Q) der Rückelektrode **3** des Schwingquarzes **1** an einer Position des Kombinationssensors **10** im Plasmabereich **11** mit einer Zeitauflösung im ms- bis s-Bereich erfolgt die Datenauswertung. Dies ist schematisch in Fig. 2 dargestellt. In einem Rechner **15** läuft ein Messprogramm ab, das die Daten von den Auswerteeinheiten für die Schwingquarzfrequenz **13**, für die Stromspannungs-Kennlinie **14** und vom Messverstärker **12** des pyrometrischen Sensors **4** übernimmt. Während in die Analyse von Abscheide-/Ätzrate bzw. der Plasmaparameter nur die geometrischen Abmessungen von Schwingquarz **1** und Langmuir-Elektrode **2** eingehen, ist für die Messung des totalen Energieein-

stroms eine Kalibrierung notwendig. Die Kalibrierung wird mittels einer bekannten Energiequelle, z. B. eines aufgeweiteten Laserstrahls – wie in Surf. Coat. Techn. 116–119 (1999) 1102 beschrieben – durchgeführt, bevor der Kombinationssensor **10** in die Vakuumapparatur **7** eingesetzt wird. Bedingt durch die Beschichtung der Frontelektrode **2** des Schwingquarzes **1** während der Messungen, ändern sich die Sensoreigenschaften relativ schnell. Eine deshalb notwendige Kalibrierung kann direkt in der Plasmaapparatur erfolgen, indem die Energie von Ionen oder Elektronen aus dem Plasma variiert wird, indem gezielt eine negative oder positive Vorspannung an die Frontelektrode **2** des Schwingquarzes **1** angelegt wird. Dieses Kalibrierverfahren, bei dem sich der Energieeinstrom-Kalibrierfaktor in situ bestimmen lässt, ist in J. Appl. Phys. 82/5 (1997) 2115 beschrieben.

Patentansprüche

1. Sensoranordnung zur Charakterisierung von Plasmabeschichtungs- und Plasmaätzprozessen in einer Plasmaanlage, aufweisend einen Schwingquarz (**1**) mit einer Frontelektrode (**2**) und einer Rückelektrode (**3**),

dadurch gekennzeichnet, dass

– die dem Plasmaätz- oder Plasmabeschichtungsprozess ausgesetzte Frontelektrode (**2**) des Schwingquarzes (**1**) isoliert gegen ein Sensorgehäuse (**5**) der Anordnung und als planare Langmuir-Sonde ausgebildet und mit einem außerhalb der Plasmaanlage angeordneten Strom-Spannungs-Kennlinien-Messgerät (**14**) zur Messung der Langmuir-Kennlinie ($I_L(U)$) verbunden ist,

– gegenüber der Rückelektrode (**3**) des Schwingquarzes (**1**) ein pyrometrischer Sensor (**4**) zur Messung der mittleren Temperatur (T_Q) der Rückelektrode (**3**) des Schwingquarzes (**1**) angeordnet ist und

– der Schwingquarz (**1**) mit seiner Frontelektrode (**2**) und der pyrometrische Sensor (**4**) einen Kombinationssensor (**10**) bilden, der in dem Sensorgehäuse (**5**) angeordnet ist, das eine der Frontelektrode (**2**) des Schwingquarzes (**1**) gegenüber liegende Öffnung aufweist,

– außerhalb des Sensorgehäuses (**5**) zwischen dessen Öffnung und einer Plasmaquelle in der Plasmaanlage eine schwenkbare Abschirmblende (**9**) angeordnet ist,

– der Kombinationssensor (**10**) verfahrbar ausgebildet und mit Mess- (**12**, **13**, **14**) und Auswerteeinheiten verbunden ist und diese mit einem Rechner (**15**) zur Datenaufnahme, -auswertung und -darstellung verbunden sind, wobei der Schwingquarz (**1**) mit einer Messeinheit (**13**) für die Bestimmung der Schwingquarzfrequenz (f_Q) und der pyrometrische Sensor (**4**) mit einem Messverstärker (**12**) verbunden ist, und

– der Rechner (**15**) mittels eines Messprogramms aus diesen Messgrößen die Abscheide- bzw. Ätzrate ($R(t)$), die Plasmadichte (n_e bzw. n_i), die Elektronentem-

peratur (T_e) und den totalen Energieeintrag (E_{ein}) der Plasmaprozesse ermittelt.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der pyrometrische Sensor (**4**) einen gegen thermische Strahlung abgeschirmten Referenztemperatursensor aufweist.

3. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Rückelektrode (**3**) des Schwingquarzes (**1**) mit einer Schicht versehen ist, die eine hohe thermische Emissivität aufweist.

4. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Kombinationssensor (**10**) mit dem Sensorgehäuse (**5**) thermisch verbunden ist und Mittel zur Kühlung (**8**) aufweist und das Sensorgehäuse (**5**) mit dem Schwingquarz (**1**) auf eine konstante Temperatur eingestellt ist.

5. Verfahren zur Ermittlung von Kenngrößen von Plasmabeschichtungs- und Plasmaätzprozessen in einer Plasmaanlage für die Herstellung dünner Schichten unter Verwendung einer Sensoranordnung nach Anspruch 1, wobei das Verfahren die folgenden Verfahrensschritte umfasst:

– gleichzeitiges Messen

1. einer Resonanzfrequenz (f_Q) eines Schwingquarzes,

2. einer I-U-Kennlinie ($I_L(U)$) einer planaren Langmuir-Sonde und

3. einer mittleren Temperatur (T_Q) der Rückelektrode des Schwingquarzes

an einer Position eines Kombinationssensors in der Plasmakammer mit einer Zeitauflösung im ms- bis s-Bereich,

– danach Übermitteln der gemessenen Daten (f_Q , $I_L(U)$ und T_Q) an einen Rechner zur Datenaufnahme, -auswertung und -darstellung und

– Berechnen des Verhältnisses von Ionenfluss zu Neutralteilchenfluss im Plasma während des Ätz- bzw. Beschichtungsprozesses sowie abschließendes Bestimmen der Parameter des Plasmabeschichtungs- oder Plasmaätzprozesses Schichtdicke ($d(t)$) bzw. Abscheide- oder Ätzrate ($R(t)$), Plasmadichte (n_e bzw. n_i), Elektronentemperatur (T_e) und Energieeinstrom (E_{ein}) aus den übermittelten Daten mittels eines Rechenprogramms, wobei bei der Bestimmung von Schichtdicke ($d(t)$) bzw. Abscheide- oder Ätzrate ($R(t)$) und Plasmadichte (n_e bzw. n_i) sowie Elektronentemperatur (T_e) die geometrischen Abmessungen von Schwingquarz und Langmuir-Sonde berücksichtigt werden und bei der Bestimmung des totalen Energieeinstroms (E_{ein}) ein Energieeinstrom-Kalibrierfaktor berücksichtigt wird, wobei dieser mittels einer kalibrierten Energiequelle, vorzugsweise eines Laserstrahls, vor dem Messen der mittleren Temperatur (T_Q) oder mittels Änderung der Energie von Ionen und Elektronen direkt aus dem Plasma bestimmt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die gleiche Temperatur für Sensorgehäuse und Schwingquarz eingestellt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Kombinationssensor in verschiedene Messpositionen verfahren wird.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

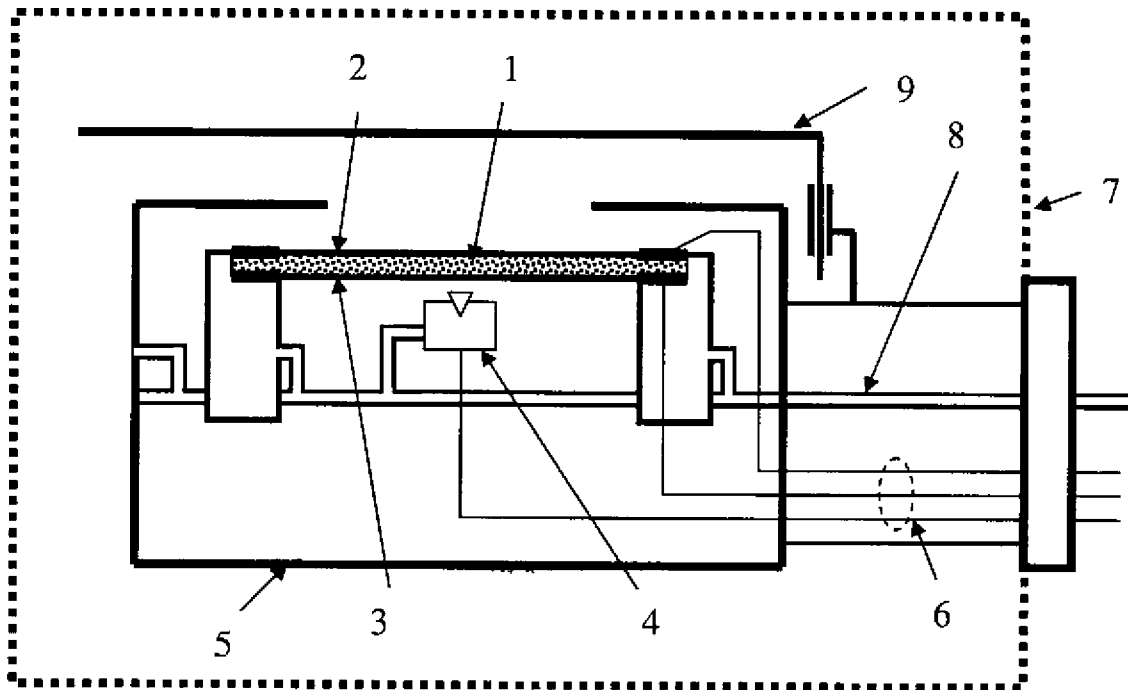


Fig. 1

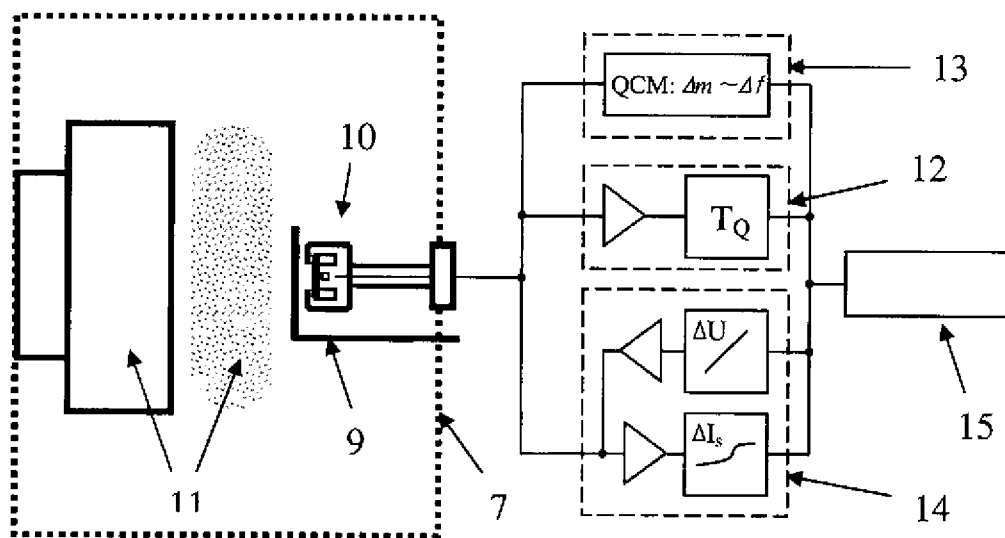


Fig. 2