(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2011 001 190 A1** 2011.12.15

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 001 190.0**
(22) Anmeldetag: **10.03.2011**
(43) Offenlegungstag: **15.12.2011**

(51) Int Cl.: ***G01N 21/55*** (2006.01)

(30) Unionspriorität:
12/725,664 17.03.2010 US

(71) Anmelder:
General Electric Company, Schenectady, N.Y., US

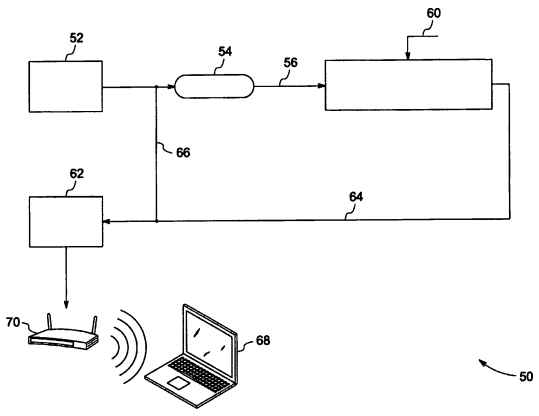
(74) Vertreter:
Rüger, Barthelt & Abel, 73728, Esslingen, DE

(72) Erfinder:
Xia, Hua, Niskayuna, N.Y., US; Khandavalli, Shashank Nath, Atlanta, Ga., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Faseroptischer Wasserstoffreinheits-Sensor und System**

(57) Zusammenfassung: Ein Wasserstoffreinheits-Messystem (50) enthält eine Lichtquelle (52), welche ein optisches Signal durch ein faseroptisches Kabel (56) liefert. Ein Wasserstoffreinheits-Sensor (60) wird in dem System bereitgestellt, welcher einen mehrlagigen Nanostrukturfilm (122) mit Materialien mit hohem Brechungsindex (124) und niedrigem Brechungsindex (126) zum Empfangen des optischen Signals aufweist. Das System enthält ferner einen Photodetektor (62) zum Empfangen eines reflektierten optischen Signals aus dem Wasserstoffreinheits-Sensor und eine mit dem Photodetektor gekoppelte Verarbeitungsschaltung (68) zum Analysieren des reflektierten optischen Signals.



Beschreibung

Hintergrund

[0001] Die Erfindung betrifft im Wesentlichen Wasserstoffreinheitsdetektion und faseroptische Wasserstoffreinheits-Sensoren.

[0002] Der globale Bedarf an Wasserstoff nimmt aufgrund seines viele Industrien überspannenden weiten Anwendungsbereiches, wie z. B. Brennstoffzellen, Transport und Energieerzeugung, deutlich zu. Die Reinheitsanforderung an Wasserstoff variiert mit der Anwendung. Beispielsweise erfordert eine Protonenelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) eine hohe Wasserstoffreinheit, um eine Katalysatorvergiftung zu verhindern.

[0003] Bestehende Wasserstoffreinheits-Überwachungsinstrumente basieren typischerweise auf einer Wärmeleitfähigkeitsdetektion (TCD). TCD ist ein Vielzweck-Gasanalyseverfahren mit nicht-spezifischen und nicht-destruktiven Eigenschaften und ist weniger empfindlich als Flammenionisations-Detektionsverfahren. Die Auflösung und Genauigkeit von TCD ist eingeschränkt. Weitere Verfahren zur Überwachung von Wasserstoffreinheit beinhalten die Verwendung von Gasdichte- und Differenzdruck-basierenden Messungen. Diese Verfahren unterliegen jedoch Umgebungs- und Gastemperatur-induzierten Schwankungen.

[0004] Daher besteht ein Bedarf nach einem verbesserten Wasserstoffreinheits-Messsensor und Systemen, um eines oder mehrere der vorstehend genannte Probleme anzugeben.

Kurzbeschreibung

[0005] Gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird ein Wasserstoffreinheits-Messsystem bereitgestellt. Das System enthält eine Lichtquelle, welche ein optisches Signal über ein faseroptisches Kabel liefert. Ein Wasserstoffreinheits-Sensor, der einen mehrlagigen Nanostruktur-Film mit Materialien mit hohen und niedrigen Brechungsindizes aufweist, wird in dem System bereitgestellt, um das optische Signal zu empfangen. Das System enthält ferner einen Photodetektor zum Empfangen eines reflektierten optischen Signals aus dem Wasserstoffreinheits-Sensor und eine mit dem Photodetektor gekoppelte Verarbeitungsschaltung zum Analysieren des reflektierten optischen Signals.

[0006] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird ein Wasserstoffreinheits-Sensor mit einem Faserkern und einer Gitterstruktur mit periodisch moduliertem Brechungsindex bereitgestellt, die um den Kern herum vorgesehen ist. Der Sensor enthält ferner eine die Gitterstruktur mit periodisch moduliertem Brechungsindex umgebenden Fasermantel und einen um den Fasermantel herum positionierten mehrlagigen Messfilm. Der Messfilm enthält eine modulierte Struktur aus mehreren Materiallagen mit hohem Brechungsindex und niedrigem Brechungsindex.

[0007] Gemäß noch einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird eine Wasserstoffreinheits-Sensorbaugruppe bereitgestellt. Die Sensorbaugruppe enthält einen mehrlagigen Nanostrukturfilm aus hydrierbaren und nicht-hydrierbaren Materialien und wenigstens zwei Faser-Bragg-Gittern, die in einer wärmeunempfindlichen Kammer auf der Basis von Quarzmaterial eingebaut sind.

Zeichnungen

[0008] Diese und weitere Merkmale, Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden besser verständlich, wenn die nachstehende detaillierte Beschreibung unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen gelesen wird, in welchen gleiche Bezugszeichen gleiche Teile durchgängig durch die Zeichnungen bezeichnen, wobei:

[0009] Fig. 1 eine schematische Ansicht eines Wasserstoffreinheits-Messsystems mit einer faseroptischen Wasserstoffreinheits-Sensor-(FGHPS)-Baugruppe gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0010] Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Intensitäts-basierenden Glasfaser-Wasserstoffreinheits-Sensors gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0011] Fig. 3 eine schematische Darstellung eines weiteren Intensitäts-basierenden Glasfaser-Wasserstoffreinheits-Sensors gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0012] Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Multiplexverfahrens mit Intensitäts-basierenden Glasfaser-Wasserstoffreinheits-Sensoren gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0013] Fig. 5 eine graphische Darstellung einer Veränderung der reflektierten Signalamplitude in Abhängigkeit von der Abstandsstrecke der Fasermesssonde von dem Messchip ist;

[0014] Fig. 6 eine schematische Darstellung eines mehrlagigen Messchips gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0015] Fig. 7 ein schematisches Beispiel eines mit hohem und niedrigem Brechungsindex modulierten Messfilms mit PdOx und Au als Basisblöcken ist;

[0016] Fig. 8 eine graphische Darstellung von simulierten Reflexions- und Transmissions-Eigenschaften von verschiedenen mehrlagigen Messfilmen ist;

[0017] Fig. 9 eine graphische Darstellung von simulierten Absorptions-Eigenschaften von verschiedenen mehrlagigen Messfilmen ist;

[0018] Fig. 10 eine schematische Ansicht eines Messmaterials und eines Glasfaser-Wasserstoffreinheits-Sensors mit integriertem gekipptem und apodisisertem Fasergitter gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0019] Fig. 11 eine schematische Darstellung einer auf einem Fasergitter-Array basierenden Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor-Baugruppe gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0020] Fig. 12 eine graphische Darstellung einer Faser-Gasreinheitssensor-Antwort gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist; und

[0021] Fig. 13 eine graphische Darstellung von Empfindlichkeitsantworten von Faser-Gasreinheitssensoren gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist.

Detaillierte Beschreibung

[0022] Wenn Elemente verschiedener Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung eingeführt werden, sollen die Artikel ”einer, eines, eine”, ”der, die, das” und ”besagter, besagte, besagtes” die Bedeutung haben, dass eines oder mehrere von den Elementen vorhanden sein können. Die Begriffe ”aufweisend”, ”enthaltend” und ”habend” sollen einschließend sein und die Bedeutung haben, dass zusätzliche weitere Elemente außer den aufgelisteten Elementen vorhanden sein können.

[0023] Fig. 1 ist eine schematische Darstellung eines Wasserstoffreinheits-Messsystems **50** gemäß einer Ausführungsform der Erfindung. Im Wesentlichen enthält das Messsystem **50** eine Lichtquelle **52**, wie z. B. eine abstimmbare Breitbandlichtquelle, in Lichtverbindung mit einem optischen Koppler oder Zirkulator **54**. Der optische Koppler **54** empfängt das von der Lichtquelle **52** ausgesendete Licht und überträgt einen Teil des Lichtes durch ein faseroptisches Kabel **56**. Das das faseroptische Kabel **56** passierende Licht tritt in einen oder mehrere Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensoren **60** ein. In einer Ausführungsform ist eine Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor-Baugruppe in einer Vorrichtung zur Wasserstoffgasreinheits-Detektion eingebaut. In einer weiteren Ausführungsform sind mehrere Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensoren an mehreren Stellen zur gleichzeitigen Mehrpunkt-Wasserstoffgasreinheits-Detektion eingebaut. Ein stromabwärts von den Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensoren **60** positionierter Photodetektor **62** empfängt das von den Gassensoren **60** durchgelassene Licht über ein faseroptisches Kabel **64**. Ein Teil des von dem optischen Koppler **54** reflektierten Lichtes wird auch von dem Photodetektor **62** über ein faseroptisches Kabel **66** empfangen. Das von dem Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor **60** erzeugte umgewandelte Lichtsignal wird an einen Computer **68** übertragen. In einer Ausführungsform überträgt eine drahtlose Schnittstelle **70** elektrische Signale an den Computer **68**, und der Computer **68** verwendet die gesendeten Signale zum Überwachen der Reinheit des Wasserstoffgases. In einer weiteren Ausführungsform wird ein Ethernet-Kabel zum Übertragen der elektrischen Signale zu dem Computer **68** verwendet, und der Computer **68** verwendet die gesendeten Signale zum Analysieren der Wasserstoffreinheit aus einer Abtastquelle oder einer Zielumgebung.

[0024] Fig. 2 stellt einen Intensitäts-basierenden Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor **80** gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung dar. Der Sensor **80** weist mehrfach gegabelte Faserreflexionssonden als ein gebündeltes Faserbündel **82** zusammengefasst mit einem mehrlagigen Nanostruktur-Messchip **84** auf. In einer Ausführungsform ist der Messchip **84** in einem Messsondenspitzengehäuse oder einer Kammer **86** eingebaut, welche thermisch unempfindlich ist. An einem Ende der Messsondenspitzengehäuses **86** ist das Faserbündel **82** fixiert und an dem zweiten Ende des Messsondenspitzengehäuses **86** ist ein Filter **88** befestigt, um gefiltertem Wasserstoffgas innerhalb des Gehäuses **86** zu ermöglichen, mit dem Messchip in Wechselwirkung zu treten. In dieser Ausführungsform liegt der Messchip der Faserbündelspitze **94** gegenüber und grenzt an sein benachbartes Filter **88** an.

[0025] Fig. 3 stellt einen weiteren Intensitäts-basierenden Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor **95** gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung dar. In dieser Ausführungsform wurden zwei Löcher **96** und **97** mit Filtern verwendet, um H_2-Gas in das Gehäuse **86** von einem Loch **96** diffundieren und das Gehäuse **86** aus einem anderen Loch **97** austreten zu lassen. Die Filter von Fig. 2 und Fig. 3 können ein Material wie z. B. Polytetrafluorethylen (PTFE) als eine Membrane aufweisen, um Verschmutzungen, Ölnebel, und/oder Staub zu blockieren. In einer Ausführungsform liegt die Porengröße des Membranmaterials zwischen 0,1 μm und 2 μm. In einer Ausführungsform fällt ein Lichtsignal **90** auf den Messchip ein und das reflektierte Signal **92** aus dem Chip wird gemessen. Die reflektierte Signalamplitude hängt von den Oberflächeneigenschaften des Messchips ab, welche sich in Abhängigkeit von der Wasserstoffreinheit verändern. Die Hydridbildung in den mehrlagigen Nanostruktur-Messchips wandelt eine Oberfläche, welche lichtun-

durchlässig und spiegelartig ist, wenn kein Wasserstoff vorhanden ist, in eine lichtdurchlässigere Oberfläche bei Vorhandensein von Wasserstoff um, und somit kann die Oberflächenreflexion oder Absorption zur Bestimmung der Wasserstoffkonzentration oder Wasserstoffreinheit genutzt werden. In einer Ausführungsform kann das Lichtsignal oder Transmissionssignal von einer Laserquelle stammen und das reflektierte Signal oder das Reflexionslicht kann durch eine Si-basierende Photodiode oder ein Photodioden-Array detektiert werden.

[0026] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird ein Faserbündel von sieben Fasern mit einer zentralen Faser für die Emission von Licht und sechs Fasern für die Aufnahme der Reflexion aus der Zieloberfläche verwendet. Die Faserbündelsonde kann beispielsweise eine Länge von 10,16–20,32 cm (4 bis 8 Inches) und einen Durchmesser von 6, 35 bis 12,7 mm (0,25 bis 0,5 Inches) haben. Die reflektierte Signalamplitude hängt von dem Abstand D zwischen der Faserbündelspitze oder Sondenspitze **94** und dem Messchip **84** ab.

[0027] Fig. 4 veranschaulicht ein Multiplexverfahren **100**, das für mehrere Wasserstoffreinheits-Sensoren gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung verwendet wird. Das Verfahren **100** beinhaltet eine Laserquelle **101**, einen ersten optischen Splitter **102**, einen optischen Koppler **103** und ein Photodetektor-Array **104**. Das Verfahren beinhaltet ferner mehrere Wasserstoffsensorgehäuse **106** ähnlich denen von Fig. 2 oder Fig. 3 und eine Verarbeitungsschaltung **105** mit einem Digital/Analog-Wandler und einem Datenerfassungsmodul. In einer Ausführungsform für nur eine Fasermesssonde kann eine direkte Lichtkopplung aus der Laserquelle **101** an ein Faserbündel unter Verwendung von FC/UPC oder SMA 905 Verbindern realisiert werden. Eine Lichtquelle kann in mehrere Unterlichtquellen zum Beleuchten mehrerer Fasermesssonden **107** unter Verwendung eines zweiten optischen Splitters **108** aufgesplittet werden. Der erste optische Splitter **102** splittet das Lichtsignal aus der Laserquelle in zwei Signale mit einem Signal als ein Referenzsignal an das Photodetektor-Array **104** und ein weiteres Signal an den zweiten optischen Splitter **108** durch den Koppler **103** auf. In einer Ausführungsform reicht das Splittverhältnis der zwei Lichtstrahlen von 1/99 bis 5/95. Der zweite optische Splitter **108** hat eine Länge 1 × N, wobei N die Anzahl der Sensorgehäuse ist. Der zweite optische Splitter splittet das Lichtsignal gleichmäßig in N Splittlichtsignale und jedes Splittlichtsignal wird an eine Fasermesssonde gesendet und das reflektierte Signal dann an das Photodetektor-Array **104** zurückgesendet. Die Intensitäts-basierenden reflektierten analogen Signale werden in digitale Signale mit einem Bezugssignal aus dem ersten optischen Splitter zum Unterdrücken von Drift und Lichtquellendegradation umgewandelt.

[0028] Fig. 5 zeigt eine graphische Darstellung **110** einer Veränderung der reflektierten Signalamplitude in Bezug auf den (in den Fig. 2, Fig. 3 dargestellten) Abstand D zwischen der Sondenspitze und dem Messchip. Zur Gasmessung in einer Schwingungsumgebung sollte der Abstandspunkt der Faserbündelspitze von dem Messchip eine verschiebungsunempfindliche Position sein. Eine maximale reflektierte Signalamplitude R_o tritt bei einer Abstandsstrecke d_o auf. Man kann aus der graphischen Darstellung sehen, dass die Signalamplitude durch Wählen einer unterschiedlichen Abstandsstrecke verändert werden kann. Bei der maximalen Signalamplitude hat das Signal keine Empfindlichkeit gegenüber einer kleinen Streckenveränderung und jede Signalveränderung kann einer Messmaterialreflektivität oder einer Absorptionsänderung zugerechnet werden.

[0029] Fig. 6 stellt einen mehrlagigen Wasserstoffreinheits-Messchip **120** gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung dar. Eine zweidimensionale Ansicht des Messchips wird durch das Bezugszeichen **121** dargestellt und eine dreidimensionale Ansicht wird durch das Bezugszeichen **123** dargestellt. Der Chip **120** weist einen mehrlagigen Messfilm **122** aus einem Material **124** mit hohem Brechungsindex und einem Material **126** mit niedrigem Brechungsindex auf. Das Material mit hohem Brechungsindex bezieht sich auf ein Material, welches einen höheren Brechungsindex im Vergleich zu dem Brechungsindex des Fasermantels des optischen Faserkabels besitzt. Ebenso bezieht sich das Material mit niedrigem Brechungsindex bezieht sich auf ein Material, welches einen niedrigeren Brechungsindex im Vergleich zu dem Brechungsindex des Fasermantels des optischen Faserkabels besitzt. In einer Ausführungsform ist der Brechungsindex des Fasermantels etwa 1,45, und somit kann der Brechungsindex des Materials mit hohem Brechungsindex 2 sein und der des Materials mit niedrigem Brechungsindex kann 0,8 sein. In einer weiteren Ausführungsform weist das Material mit hohem Brechungsindex ein hydrierbares Material, wie z. B. Palladium und sein Legierungsmaterial auf, und das Material mit niedrigem Brechungsindex weist ein nicht-hydrierbares Material, wie z. B. Edelmetalle auf, die von einem Substrat unterstützt werden, welches in einer Ausführungsform eine Quarzplatte **128** aufweist. Der Fachmann erkennt, dass hydrierbares Material mit Wasserstoffatomen in Wechselwirkung tritt, wenn die Wasserstoffatome zur Verfügung stehen, während nicht-hydrierbares Material nicht mit den Wasserstoffatomen in Wechselwirkung tritt. In einer Ausführungsform kann die hydrierbare Lage eine Dicke im Bereich von 1 bis 5 nm haben und die nicht-hydrierbare Lage kann eine Dicke im Bereich von 1 bis 3 nm haben. Eine Doppellage wird aufgebaut, indem eine hydrierbare Lage und eine nicht-hydrierbare Lage als ein Grundbaublock kombiniert werden. Der Film **122** kann hergestellt werden, indem derartige Baublöcke Lage für

Lage unter Anwendung eines computergesteuerten Filmabscheidungsprozesses hergestellt werden.

[0030] In einer Ausführungsform weist das hydrierbare Material Palladium oder eine Palladiumlegierung (Pd(x)M(1 – x), wobei M = Ag, Au, Cu, Ni ist, auf) oder Palladiumoxide (PdOx) und das nicht-hydrierbare Material weist Edelmetalle wie z. B. Gold (Au), Silber (Ag), Kupfer (Cu) oder Nickel (Ni) auf, welche dazu genutzt werden, um die Löslichkeit der Wasserstoffatome zu steigern, um dadurch eine elektrische Leitfähigkeitssättigung zu vermeiden und eine Detektierbarkeit von Wasserstoffatomen einerseits zu steigern und andererseits die Brechungsindexmodulation in dem mehrlagigen Messmaterial zu erhöhen.

[0031] Fig. 7 stellt ein Beispiel eines mehrlagigen Messfilms **140** mit hohem und niedrigem Brechungsindex zusammen mit einer graphischen Darstellung **142** des Brechungsindex dar. In dieser Ausführungsform weist der mehrlagige Messfilm PdOx- und Au-Unterlagen als Materialien mit hohem bzw. niedrigem Brechungsindex auf. Der periodisch PdOx/Au-modulierte Messfilm wird entweder in einem Ar+O2-Abscheidungszustand, in welchem die O2-Konzentration von 10–20% reicht, oder in einem Ar-Abscheidungszustand, welcher einem nachthermischen Behandlungsprozess in einer O2-reichen Umgebung folgt, erzeugt. Jede Schicht hat eine spezifische Dicke gemäß Darstellung auf der horizontalen Achse und einen Brechungsindex gemäß Darstellung auf der vertikalen Achse. Durch Verwendung unterschiedlicher Dicken ermöglicht die kohärente mehrlagige Messstruktur eine Modulation des Brechungsindexprofils, die zu einer deutlichen optischen Eigenschaftsveränderung für die Transmission, Absorption oder Reflexion von Licht führt.

[0032] Wenn der mehrlagige Messfilm **140** mit Wasserstoffmolekülen in Wechselwirkung tritt, zerlegt die erste Pd-Deckschicht (dargestellt in Fig. 8 mit einer Dicke von 1 nm) Wasserstoffmoleküle in Wasserstoffatome. Die Diffusion der H-Atome durchquert rückwärtsgerichtet die Nanopartikelgrenzen in der Einzellage und durchquert alle Nanopartikelgrenzen und Schnittstellengrenzen in den restlichen Lagen. Pd-Nanopartikel werden an H-Atome unter Ausbildung von Hydriden gebunden, während partielle Pd-O-Bindungen zu H-Pd-O-H in der hydrierbaren PdOx-Schicht werden, und sich partielle H-Pd-O-A-Bindungsgruppen in H-Pd und in -OH-Hydroxylionen aufsplitten. Die nicht-hydrierbaren Lagen des Au in dem mehrlagigen Messfilm stellen Schnittstellengrenzen bereit und wirken als H-Atom-Diffusionskanäle. Der hohe Kontrast in tatsächlichem Brechungsindex zwischen Pd (N ca. 2,0) und Au (ca. 0,2) moduliert effektiv die Lichtausbreitungseigenschaften, und der Imaginäranteil der Brechungsindizes der zwei Materialien beeinflusst nur die Absorptionseigenschaften. Der Fachmann erkennt, dass sich der Brechungsindex auf das Verhältnis der Lichtwellenlängen in Vakuum zur Lichtwellenlänge in einem Medium bezieht, für welches der Brechungsindex zu messen ist. Der Brechungsindex entlang der senkrechten Achse des mehrlagigen Messfilms n(z) ist gegeben durch:

$$n(z) = [\frac{d(PdOx)}{d}\cdot n(Pd) + \frac{d(Au)}{d}\cdot n(Au)] + \sum^{I} A_l \cdot e^{-i\cdot k\cdot z} \qquad (1)$$

wobei d = d(PdOx) + d(Au) als die Modulationslänge des mehrlagigen Messfilms definiert ist. In der vorstehenden Gleichung sind d(PdOx) und d(Au) die Modulationslängen von PdOx bzw. Au und n(Pd) und n (Au) sind die Brechungsindizes von PdOx bzw. Au. Der zweite Term in der vorstehenden Gleichung repräsentiert die Brechungsindexmodulation mit A_l als Modulationsamplitude und der exponentielle Term als kohärenten Modulationsbeitrag über das gesamte mehrlagige Material hinweg. Da die Lichtübertragung und Absorption von der einfallenden Lichtwellenlänge und dem Materialunterscheidungskoeffizienten oder Imaginäranteil der dielektrischen Funktion abhängt, kann eine derartige mehrlagige Struktur so ausgelegt werden, dass sie eine gleichmäßige Reflexion und Absorption bei einer spezifischen Messfilmdicke und Sub-Lagenbrechungsindex hat. Beispielsweise ist in der in Fig. 7 dargestellten Ausführungsform, in welcher eine Au-Nanostruktur-Sublage mit 1, 7 nm Dicke verwendet wird, das Verhältnis der Au-Sublage zu der Modulationslänge etwa 0,33. Dieses Verhältnis kann bezüglich Empfindlichkeit gegenüber kleinen Wasserstoffkonzentrationsänderungen abgestimmt werden und jede kleine Veränderung im Brechungsindex kann während Absorptionsmechanismen gemessen werden, wenn eine hohe Wasserstoffkonzentration vorliegt. Ferner kann eine derartige Kombination von Reflexions- und Absorptionseigenschaften beispielsweise mit unterschiedlichen nicht-hydrierbaren Materialien, wie z. B. Au, Ag, Ni und Cu, verändert werden.

[0033] In einer Ausführungsform hat das mehrlagige Messmaterial eine Nanostruktur-Oberflächenmorphologie, um die Diffusion von H-Ionen zu ermöglichen. In einer weiteren Ausführungsform hat das Messmaterial eine nanoporöse Struktur mit Ni als nicht-hydrierbarer Lage. In einer weiteren Ausführungsform hat das Messmaterial eine Nanopartikelstruktur mit Au als nicht-hydrierbarer Lage. Es ist anzumerken, dass jedes andere Edelmetall, wie z. B. Silber oder Kupfer oder Nickel, für die nicht-hydrierbare Schicht verwendet werden kann. Die nicht-hydrierbaren Lagen werden dazu genutzt, um eine Wechselwirkung von H-Ionen mit Palladium-Nanopartikeln sicherzustellen. In einer Ausführungsform reicht die Nanopartikelgröße von 5 nm bis 15 nm. In einer weiteren Ausführungsform wird eine säulenartige Oberflächenmorphologie für einen schnellen Hydridbildungsprozess in dem Messmaterial genutzt. In einer spezifischen Ausführungsform wird die säulen-

artige Oberflächenmorphologie zusammen mit einer Pd-Lage von 1 nm als Abdecklage genutzt, um somit schnell Wasserstoffmoleküle in H+Ionen zur Diffusion nach innen zu zerlegen.

[0034] Fig. 8 zeigt eine graphische Darstellung **160** simulierter optischer Reflexions- und Transmissionseigenschaften von drei mehrlagigen PdOx/Au-Messfilmen in Bezug auf Lichtwellenlänge. Die horizontale Achse **162** stellt die Lichtwellenlänge in nm dar, und die vertikale Achse **164** stellt die Reflexions- und Transmissions-Eigenschaften des Films in Prozent dar. Die graphische Darstellung **160** stellt drei Reflexionskurven **166**, **168**, **170** und drei Transmissionskurven **172**, **174** und **176** für drei unterschiedliche mehrlagige PdOx/Au-Filme dar. Die Kurven **166** und **172** beziehen sich auf einen 4-Doppellagenfilm mit einer Dicke von 19 nm. Die Kurven **168** und **174** beziehen sich auf einen 7-Doppellagenfilm mit einer Dicke von 32,5 nm und die Kurven **170** und **176** beziehen sich auf einen 10-Doppellagenfilm mit einer Dicke von 45 nm. Man kann aus der graphischen Darstellung **160** sehen, dass ein Bereich hoher Empfindlichkeit in dem Wellenlängenbereich von 500 bis 800 nm vorliegt. Mit anderen Worten, die Reflexion und Transmission haben einen minimalen Wert in dem Wellenlängenbereich von 500 bis 800 nm. Ferner zeigen sowohl die Reflexion als auch Transmission eine deutliche Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge. Bei etwa 550 nm ist die Reflexion aus dem Film mit 19 nm Dicke etwa 45%, während die Filme mit 32,5 nm und 45 nm eine Reflektivität von 60% bis 67% haben. Ferner kann man sehen, dass die Transmissionskurven in dem sichtbaren optischen Wellenlängenbereich weniger empfindlich sind. Man kann auch sehen, dass bei Wellenlängen größer als 500 nm dickere Filme eine höhere Reflexion und niedrigere Transmission haben. In einer weiteren Ausführungsform erfordert eine optimierte H_2-Reinheitsdetektion eine Lichtquelle mit einem Wellenlängenbereich von 500 nm bis 800 nm und eine Gesamtdicke des mehrlagigen Messmaterials im Bereich von 10 bis 40 nm oder eine nominelle Dicke von etwa 25 nm.

[0035] Fig. 9 eine graphische Darstellung **180** simulierter optischer Absorptionseigenschaften aus denselben drei mehrlagigen PdOx/Au-Filmen gemäß Beschreibung in Fig. 8 in Bezug auf die Lichtwellenlänge. Die horizontale Achse **182** stellt die Lichtwellenlänge in nm dar, und die vertikale Achse **184** stellt die Absorptions-Eigenschaften des Films in Prozent dar. Die graphische Darstellung **180** stellt drei Kurven **186**, **188**, **190** für die drei Filme von 19 nm, 32,5 nm bzw. 45 nm dar. Wie man aus der graphischen Darstellung sehen kann, hat der dünnere Film für Wellenlängen höher als 500 nm eine höhere Absorption als die dickeren Filme, und für Wellenlängen kleiner als 500 nm hat der dickere Film eine höhere Absorption im Vergleich zu den dünneren Filmen. Somit kann man aus den Fig. 8 und Fig. 9 ersehen, dass für Wellenlängen größer als 500 nm ein dünnerer Film nützlicher ist, während für Wellenlängen niedriger als 500 nm ein dickerer Film nützlicher ist. Da die Absorption stark von dem Messmaterial und der Hydridkonzentration abhängig ist, trägt sie dazu bei, künstlich die H_2-Reinheits-Detektionsfähigkeit durch Hydridbildungs-induzierte Reflexion und Transmission künstlich zu modulieren. Ferner ist die Absorption auch von den mehrlagigen Materialien oder Aufbauparametern abhängig.

[0036] Fig. 10 stellt einen weiteren Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor **200** gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung dar. In einer Ausführungsform ist der Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor **200** eine Zusammenfassung des Fasergitters und eines mittels eines Sputter-Prozesses erzeugten Messchipmaterials. Der Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor **200** enthält einen zentralen Faserkern **202**, der sich entlang einer Achse **204** erstreckt, und enthält ein Gitter mit periodisch moduliertem Brechungsindex. In einer Ausführungsform weist der zentrale Faserkern gleichzeitig mit GeO_2 und F dotiertes Siliziumdioxid auf und hat einen Durchmesser in einem Bereich von 5 µm bis etwa 9 µm. Die periodische Modulation kann eine apodisierte, geblazte oder geblazte und apodisierte Modulation aufweisen, um beispielsweise die geführte Kernmode-Kopplung zu den Mantelmodi zu erhöhen, indem eine Feldenergie eines geführten Mode an den Fasermantel abgegeben wird. In einer Ausführungsform weist das Gitter mit periodischem Brechungsindex eine Langperioden-Fasergitter-(LPG)-Struktur **206** auf, die den Faserkern **202** umgebend positioniert ist.

[0037] Ein Fasermantel **208** ist in Umfangsrichtung um den Faserkern **202** herum angeordnet und hat in einer Ausführungsform einen aus reinem Siliziumdioxid bestehenden Außendurchmesser von etwa 125 µm. In einer Ausführungsform ist der Fasermantel **208** dafür konfiguriert, als ein Wellenleiter für die Lichtausbreitung durch den Faserkern **202** zu wirken. Eine (nicht dargestellte) breitbandig abstimmbare Lichtquelle ist in Lichtverbindung mit dem optischen Faserkabel positioniert und emittiert Licht im nahen Infrarot, das sich durch den Faserkern **202** ausbreitet.

[0038] Eine mehrlagige Nanostrukturmesslage **210** ist über dem Fasermantel **208** der LPG-Struktur **206** angeordnet. Die Messlage **210** ist dafür konfiguriert, effektiv die Kopplung des Mode des Fasermantels **208** mit dem Grundmode des Faserkerns über eine Brechungsindexveränderung, eine optische Absorptionsänderung, eine Messmaterial-Oberflächenspannungsänderung oder eine Kombination davon beispielsweise zu unterstützen. Die Messschicht **210** ist empfindlich gegenüber und/oder wird durch Wechselwirkungen mit einem Wasserstoffgas aktiviert, das die Brechungsindexveränderung, die Absorptionsän-

derung, die Messmaterial-Oberflächenspannungsänderung oder andere Änderung induziert. In einer Ausführungsform wird der mehrlagige Nanostruktur-Messfilm **140** unter Bezugnahme auf Fig. 7 beschrieben. Wie vorstehend beschrieben, wandelt eine Hydridbildung auf dem mehrlagigen Nanostruktur-Messfilm dessen umgebende lichtundurchlässige spiegelartige Oberfläche in eine durchlässigere Oberfläche um. Die Bildung des Hydrids verändert die Mantelmode-Grenzfläche und den Kopplungswirkungsgrad, sodass die Übertragungswellenlänge und deren Leistungsverlust in dem Fasergitter-basierenden Wasserstoffreinheits-Sensor moduliert werden.

[0039] In einer speziellen Ausführungsform hat der Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor **200** eine Länge entlang einer Längsachse **204** des optischen Faserkerns **202** von etwa 10 mm bis etwa 50 mm. Die LPG-Struktur **206** hat eine Länge entlang der Längsachse **204** von etwa 10 mm bis etwa 30 mm mit einem Manteldurchmesser von etwa 0,05 mm bis etwa 0,125 mm. Die LPG-Struktur **206** hat eine Modulation entlang der Längsachse **204** mit einer Rastergröße von etwa 100 µm bis etwa 600 µm. Die LPG-Struktur **206** ist dafür konfiguriert, Fundamentalmode-Energie auf die Moden des Fasermantels **208** mit einem apodisierten oder geblazten Brechungsindexmodulationsprofil zu verteilen. Wenn der Brechungsindex des Messmaterials der Messlage **210** geringer als der des Fasermantels **208** ist, werden die Moden des Fasermantels **208** durch Messmaterial/Mantel- und Faserkern-Schnittstellen geführt. Teillichtenergie dissipiert durch ein abklingendes Feld in das Messmaterial, während die Mantelmoden teilweise die Energie als Strahlungsmoden in die Messbeschichtungslage dissipieren.

[0040] Fig. 11 stellt eine auf einem Fasergitter-Array basierende Baugruppe **220** eines Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensors gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung dar. Die Baugruppe **220** des Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensors enthält einen Gaseinlass **222**, einen Gasauslass **224**, ein Einlassventil **226** und ein Drucksteuerungsventil **228**. Das Einlassventil **226** steuert die Menge des in ein Quarzrohr **230** eingelassenen Gases, und das Drucksteuerungsventil **228** steuert den Gasdruck im Inneren des Rohres **230**. In einer Ausführungsform tritt das Probegas oder Wasserstoff in das Quarzrohr **230** von dem Gaseinlass **222** ein, wandert durch das Rohr **230** und tritt durch den Gasauslass **224** aus. Eine Messfaser **232** ist im Inneren des Rohres **230** angeordnet, welche in der dargestellten Ausführungsform drei Fasersensoren **234**, **236** und **238** enthält. In einer Ausführungsform sind ein Langperioden-Fasergitter-(LPG)-Struktur und ein Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor mit integriertem Messmaterial (FGHPS) **234** in der Mitte der Quarzrohr-Baugruppe **230** positioniert. In einer weiteren Ausführungsform sind zwei Faser-Bragg-Gitter-(FBG)-Strukturen **236** (FBG 1), **238** (FBG 2) an jeder Seite des FGHPS **234** installiert, um lokale Temperaturen zum Korrigieren der Gassensor-Wellenlängenverschiebung zu messen, die durch eine Strömungsratenschwankung zu einem beliebigen Zeitpunkt induziert wird. Die Differenz $\Delta\lambda(t)$ zwischen Wellenlängenverschiebungen ($\lambda1(t)$ und ($\lambda2(t)$ von zwei FBGs ist direkt proportional zur Gasströmungsveränderung oder Temperaturschwankung und ist gegeben durch:

$$\Delta\lambda(t) = \lambda1(t) - \lambda2(t) \propto \text{Gasströmungsrate oder} \quad (2)$$

$$\Delta\lambda(t) = \lambda1(t) - \lambda2(t) \propto \text{Temperaturschwankung} \quad (3)$$

[0041] Die Gleichungen 2 und 3 zeigen, dass, wenn die Gasströmungsrate konstant gehalten wird, $\Delta\lambda(t)$ die lokalen Temperaturschwankungen widerspiegelt.

[0042] Da das Wasserstoffgas eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt, um die Wärmenergie aus dem Fasergassensor abzuführen, kann die Verwendung eines Faser-Bragg-Gitters direkt die Wellenlängenverschiebung aufgrund des Warmeverlustes messen, durch:

$$\Delta\lambda1(t) = \lambda1(t1) - \lambda1(t2) \propto H2 \text{ Gaskonzentration,} \quad (4)$$

$$\Delta\lambda2(t) = \lambda2(t1) - \lambda2(t2) \propto H2 \text{ Gaskonzentration.} \quad (5)$$

[0043] Zu jeder Zeit werden sowohl die Durchflussrate als auch die Wasserstoffkonzentration gleichzeitig überwacht, um eine genaue H_2-Reinheitsdetektion zu erzeugen.

[0044] Fig. 2 stellt zwei Antworten **250** und **252** von Faser-Gasreinheitssensoren für unterschiedliche Wasserstoffreinheiten dar. Die Antwort **250** stammt von einem Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor mit 15 Doppellagen aus 2,8 nm PdOx und 1,7 nm Au. Die Dicke jeder Doppellage ist etwa 4, 5 nm und die Gesamtdicke ist 67,5 nm für 15 Doppellagen oder 31 Mehrfachlagen. Es sollte beachtet werden, dass zum schnellen Erhöhen des Umwandlungswirkungsgrades von molekularem Wasserstoff (H_2) in Wasserstoffionen (H+) Pd von 1 nm Dicke als eine Abdeckungsschicht auf dem mehrlagigen Messfilm verwendet wird. Ebenso ist die Antwort **252** von einem Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor mit 5 Doppellagen von 3 nm PdOx und 1,0 nm Au. Die nominelle Dicke jeder Doppellage ist etwa 4,0 nm und die Gesamtdicke ist 205 nm für 5 Doppellagen oder 11 Mehrfachlagen. Die Vorrichtung, für welche die Wasserstoffreinheit gemessen wird, enthielt zuerst 100 & H_2, worauf die H_2-Reinheit in Schritten von 5% reduziert wurde. Zur Verdünnung des Wasserstoffs wurde N_2-Gas in die Vorrichtung einge-

führt. Die Wechselwirkung zwischen dem Messmaterial und dem verdünnten H_2-Gas bildet Hydride in dem Messmaterial. Die Spitzenwellenlänge des Fasergassensors nimmt mit erhöhter N_2-Konzentration oder verringerter N_2-Konzentration zu bzw. ab. Man kann aus beiden Antworten sehen, dass beide Fasersensorprototypen eine Empfindlichkeit gegenüber einer H_2-Reinheitsveränderung haben. Ferner kann man sehen, dass der Reinheitssensor mit integriertem dickerem Messfilm eine größere Antwortamplitude im Vergleich zu dem Reinheitssensor mit dünnerem integriertem Messfilm hat.

[0045] Fig. 13 stellt Empfindlichkeitsantworten **260**, **262** für unter Bezugnahme auf Fig. 12 beschriebene Faser-Gasreinheitssensoren mit integriertem dünnerem und dickerem Messmaterial dar. In beiden Antworten wurden zwei lineare Empfindlichkeiten identifiziert. Für die Antwort **260** liegt der erste lineare Bereich zwischen niedrigem H_2 bis 80% H_2, für welchen die Empfindlichkeit etwa 6,4 pm/Prozent für die H_2-Konzentration beträgt, während der zweite lineare Bereich von 80% bis 100% H_2-Reinheit mit einer Empfindlichkeit 27,3 pm/Prozent reicht. Für die Antwort **262** hat der erste lineare Bereich etwa 2,3 pm/Prozent Empfindlichkeit für eine H_2-Konzentration zwischen 70% bis 85% H_2, während der zweite lineare Bereich von ca. 80% bis 100% H_2-Reinheit mit einer Empfindlichkeit von 15,4 pm/Prozent reicht. Da die Fasersignal-Abfrageeinheit eine Genauigkeit von ±5 pm hat, ist die geschätzte Gasdetektionsauflösung etwa 1% für den Messbereich von niedrigem H_2 und etwa 0,2% für den Bereich von 80 bis 100% H_2-Reinheit für den Fasergassensor mit integriertem dickeren Messmaterial. Man kann auch sehen, dass die Empfindlichkeit deutlich bei dem Fasergassensor-Prototyp mit dem integrierten dünneren Messmaterial um einen Faktor von ca. 1,5 bis 2,5 aufgrund der hohen Absorption bei 1500 µm gemäß Darstellung in Fig. 9 abnimmt.

[0046] Einer der Vorteile der vorstehend beschriebenen Wasserstoffreinheits-Sensoren ist die hohe Empfindlichkeit und Genauigkeit, wenn Wasserstoff hoher Reinheit gemessen wird. Das FBG 1-FBHPS-FBG 2-Mess-Array ist in der Lage, die Wasserstoffreinheit in dem Bereich von 70 Prozent bis 100 Prozent zu messen, hat eine geringe Komplexität und kann sicher überall eingesetzt werden. Somit werden Sicherheitsmaßnahmen für die Vorrichtungen, bei denen diese Sensoren eingebaut werden, weniger komplex und teuer.

[0047] Obwohl nur bestimmte Merkmale der Erfindung hierin dargestellt und beschrieben wurden, werden viele Modifikationen und Änderungen für den Fachmann ersichtlich sein. Es dürfte sich daher verstehen, dass die beigefügten Ansprüche alle derartigen Modifikationen und Änderungen, soweit sie in den tatsächlichen Erfindungsgedanken der Erfindung fallen, abdecken sollen.

[0048] Ein Wasserstoffreinheits-Messystem **50** enthält eine Lichtquelle **52**, welche ein optisches Signal durch ein faseroptisches Kabel **56** liefert. Ein Wasserstoffreinheits-Sensor **60** wird in dem System bereitgestellt, welcher einen mehrlagigen Nanostrukturfilm **122** mit Materialien mit hohem Brechungsindex **124** und niedrigem Brechungsindex **126** zum Empfangen des optischen Signals aufweist. Das System enthält ferner einen Photodetektor **62** zum Empfangen eines reflektierten optischen Signals aus dem Wasserstoffreinheits-Sensor und eine mit dem Photodetektor gekoppelte Verarbeitungsschaltung **68** zum Analysieren des reflektierten optischen Signals.

Bezugszeichenliste

50	Wasserstoffreinheits-Messsystem
52	Lichtquelle
54	Optischer Koppler
60	Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor
62	Photodetektor
64, 66	faseroptisches Kabel
68	Computer
70	drahtlose Schnittstelle
80	Intensitäts-basierender Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor
82	kombiniertes Faserbündel
84	mehrlagiger Nanostruktur-Messchip
86	Baugruppe der Messsondenspitze
88	Filter
90	Lichtsignal
92	reflektiertes Signal
94	Faserbündelspitze
95	Intensitäts-basierender Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor
96, 97	Löcher
100	Multiplexverfahren
101	Laserquelle
102	erster optischer Splitter
103	optischer Koppler
104	Photodetektor-Array
105	Verarbeitungsschaltung
106	Wasserstoffsensorbaugruppe
107	Fasermesssonden
108	zweiter optischer Splitter
110	graphische Darstellung der Variation der reflektierten Signalamplitude in Bezug auf den Abstand D

120	mehrlagiger Wasserstoffreinheits-Messchip
121	zweidimensionale Ansicht des Messchips
122	mehrlagiger Messfilm
123	dreidimensionale Ansicht des Messchips
124	Material mit hohem Brechungsindex
126	Material mit niedrigem Brechungsindex
128	Quarzglasplatte
140	mehrlagiger Messfilm mit hohem und niedrigem Brechungsindex
142	graphische Darstellung des Brechungsindex
160	graphische Darstellung simulierter optischer Reflexions- und Transmissionseigenschaften
162	horizontale Achse
164	vertikale Achse
166, 168, 170	Reflexionskurven
172, 174, 176	Transmissionskurven
180	graphische Darstellung simulierter optischer Absorptionseigenschaften
182	horizontale Achse
184	vertikale Achse
186, 188, 190	Absorptionskurven
200	Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor
202	Faserkern
204	Achse
206	Langperioden-Fasergitter-(LPG)-Struktur
208	Fasermantel
210	mehrlagige Nanostrukturmesslage
220	Fasergitter-Array-basierende Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensor-Baugruppe
222	Gaseinlass
224	Gasauslass
226	Einlassventil
228	Druckregelventil
230	Quarzrohr
232	Messfaser
234, 236, 238	Fasersensoren
250, 252	Faser-Wasserstoffgasreinheits-Sensorantworten
260	Empfindlichkeitsantworten

Patentansprüche

1. System (**50**) zum Messen von Wasserstoffreinheit, aufweisend:
eine Lichtquelle (**52**) zum Liefern eines optischen Signals durch ein faseroptisches Kabel (**56**);
einen Wasserstoffreinheits-Sensor (**60**) zum Empfangen des optischen Signals, wobei der Wasserstoffreinheits-Sensor einen mehrlagigen Nanostrukturfilm (**122**) mit Materialien mit hohem Brechungsindex (**124**) und niedrigem Brechungsindex (**126**) aufweist;
einen Photodetektor (**62**) zum Empfangen eines reflektierten optischen Signals aus dem Wasserstoffreinheits-Sensor; und
eine Verarbeitungsschaltung (**68**), die mit dem Photodetektor (**62**) zum Analysieren des reflektierten optischen Signals gekoppelt ist.

2. Wasserstoffreinheits-Sensor nach Anspruch 1, wobei das Material mit hohem Brechungsindex ein hydrierbares Material aufweist und das Material mit niedrigem Brechungsindex ein nicht-hydrierbares Material aufweist.

3. System nach Anspruch 2, wobei das hydrierbare Material ein Palladium oder eine Palladiumlegierung aufweist.

4. System nach Anspruch 2, wobei das nicht-hydrierbare Material Gold, Silber, Nickel, Kupfer oder eine Kombination davon aufweist.

5. System nach Anspruch 1, wobei die Dicke des mehrlagigen Nanostrukturfilms in dem Bereich von 10 bis 100 nm liegt, und wobei der mehrlagige Nanostrukturfilm eine maximale Empfindlichkeit in Reflexion und Absorption in dem Lichtwellenlängenbereich von 500 bis 800 nm hat.

6. Wasserstoffreinheits-Sensor (**200**), aufweisend:
einen Faserkern (**202**);
eine periodisch im Brechungsindex modulierte Gitterstruktur (**206**), die um den Faserkern (**202**) herum angeordnet ist;
einen Fasermantel (**208**), der die periodisch im Brechungsindex modulierte Gitterstruktur (**206**) umgebend positioniert ist; und
einen um den Fasermantel (**208**) herum positionierten mehrlagigen Messfilm (**210**), der eine modulierte Struktur aus mehreren Materiallagen mit hohem Brechungsindex und niedrigem Brechungsindex aufweist.

7. Wasserstoffreinheits-Sensor nach Anspruch 6, wobei das Material mit hohem Brechungsindex ein hydrierbares Material aufweist und das Material mit niedrigem Brechungsindex ein nicht-hydrierbares Material aufweist.

8. System nach Anspruch 6, wobei der mehrlagige Messfilm wenigstens eine von einer nanoporösen Struktur und einer Nanopartikelstruktur aufweist.

9. System nach Anspruch 6, wobei der mehrlagige Messfilm eine säulenartige Oberflächenmorphologie aufweist.

10. Wasserstoffreinheits-Sensor-Baugruppe (**220**) mit einem mehrlagigen Nanostrukturfilm (**234**) aus hydrierbaren und nicht-hydrierbaren Materialien und wenigstens zwei Faser-Bragg-Gittern (**236**, **238**), die in einer wärmeunempfindlichen Kammer auf der Basis von Quarzmaterial eingebaut sind.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

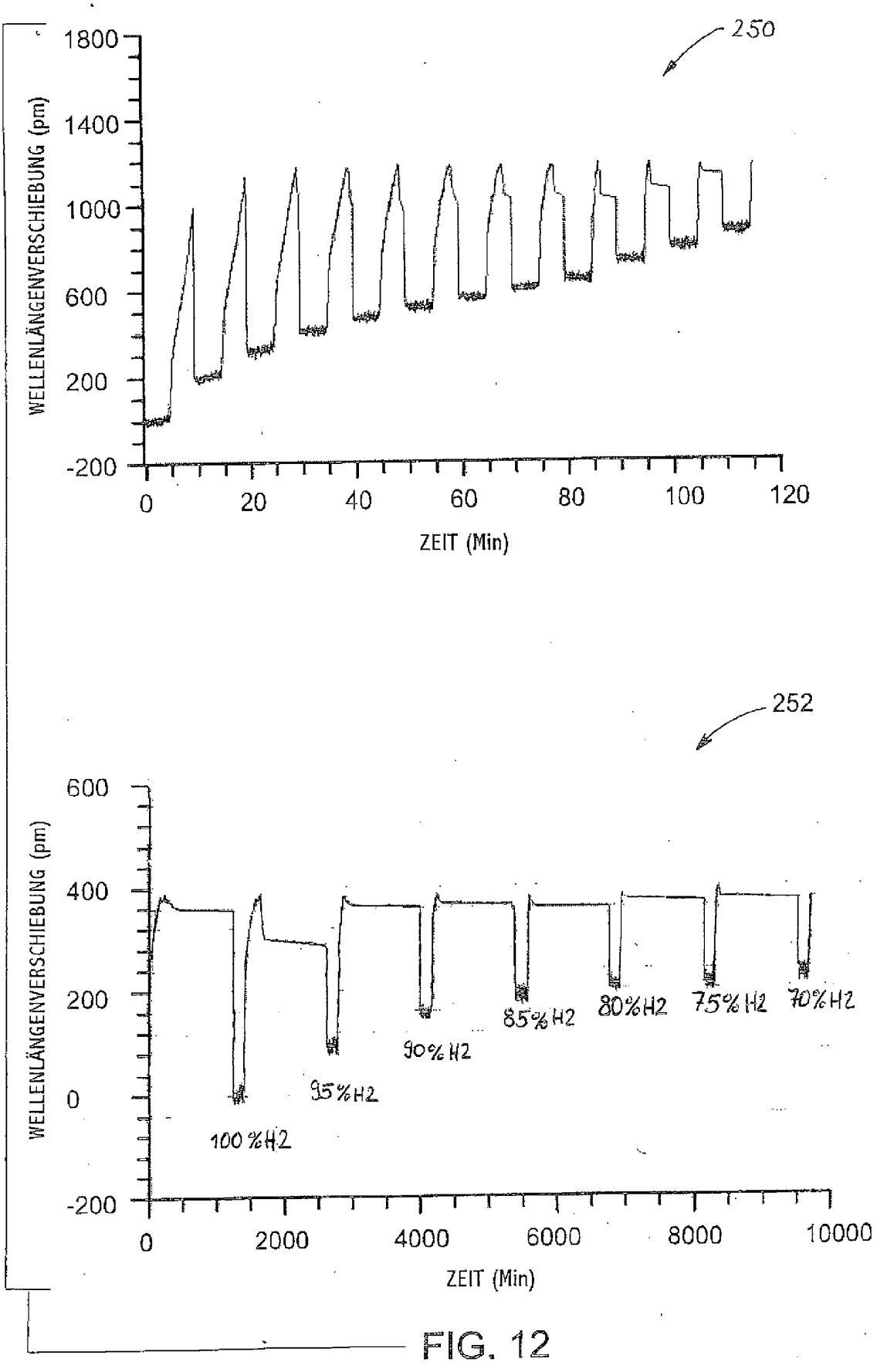


FIG. 12

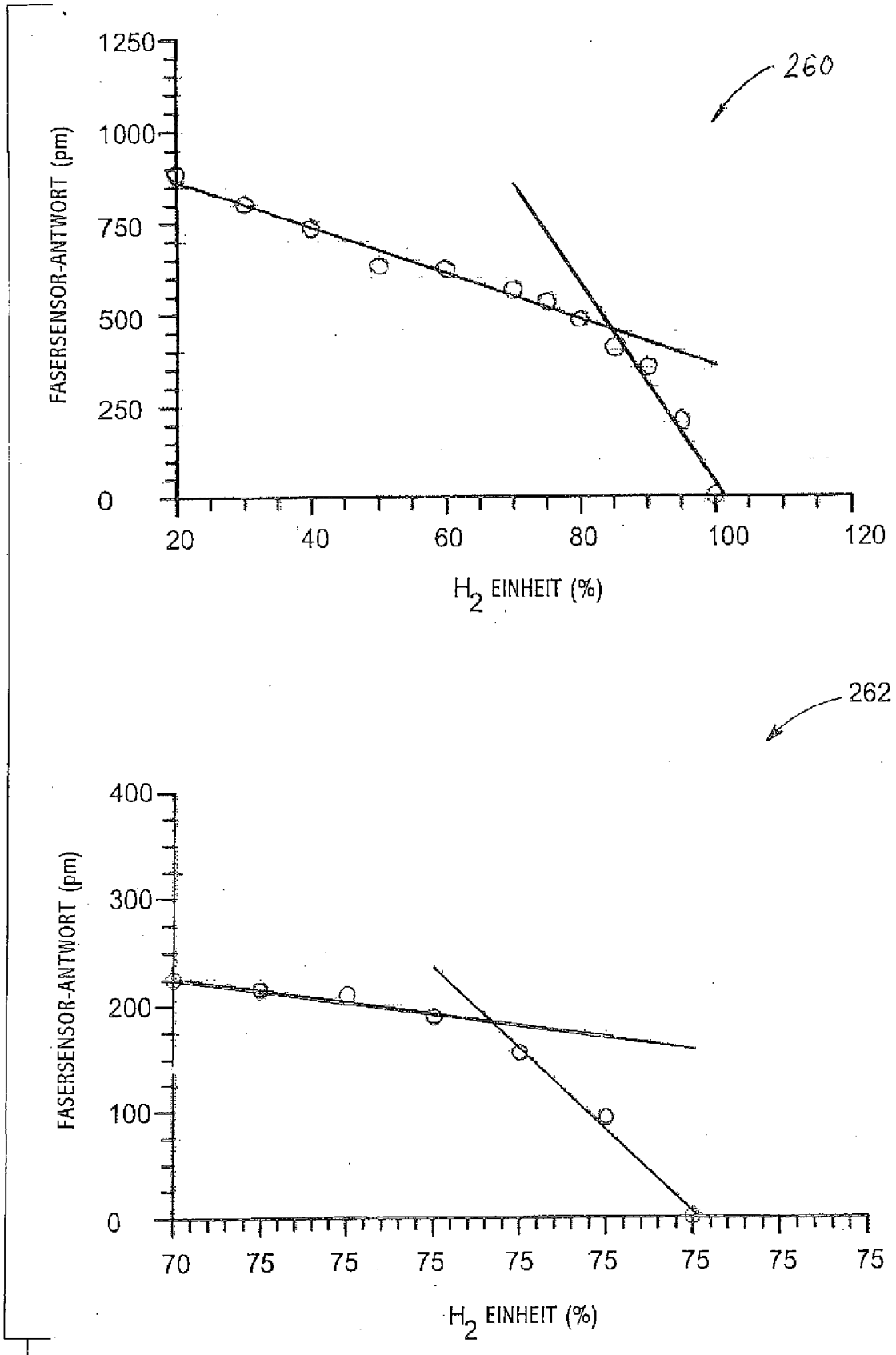

260
1250
1000
750
500
250
0
FASERSENSOR-ANTWORT (pm)
20
40
60
80
100
120
H_2 EINHEIT (%)
262
400
300
200
100
0
FASERSENSOR-ANTWORT (pm)
70
75
75
75
75
75
75
75
75
H_2 EINHEIT (%)

FIG. 13

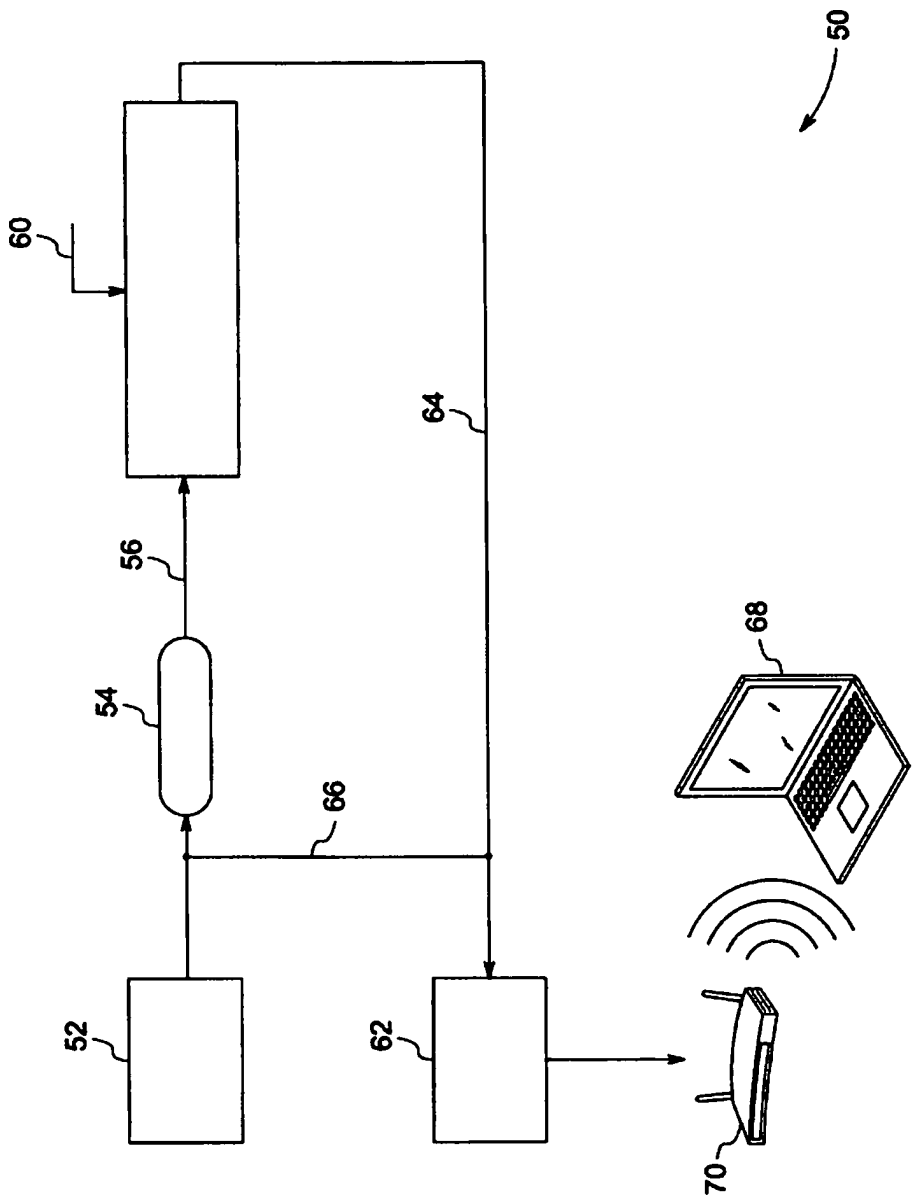


FIG. 1

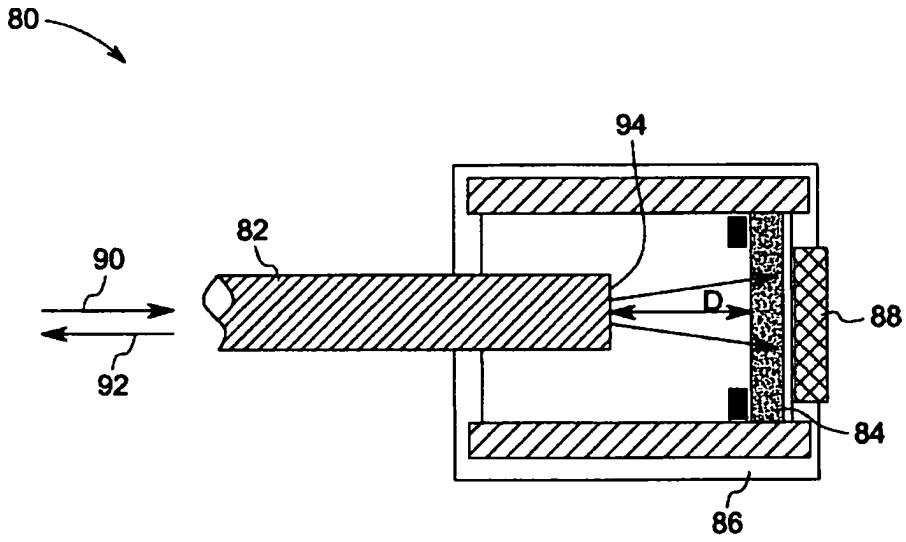


FIG. 2

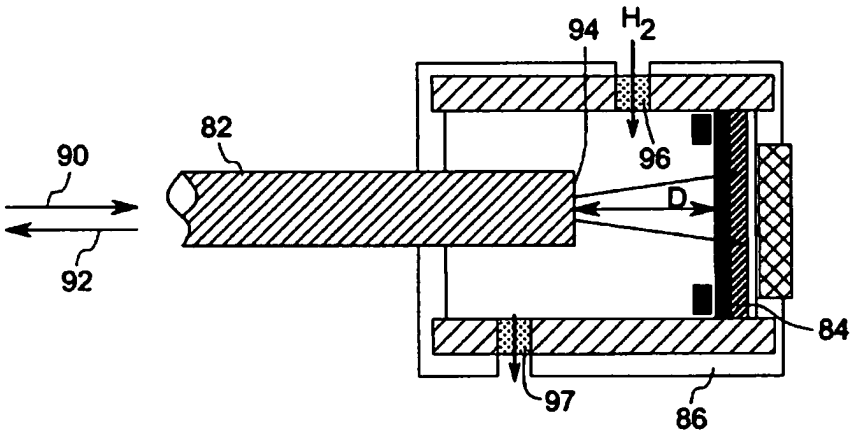


FIG. 3

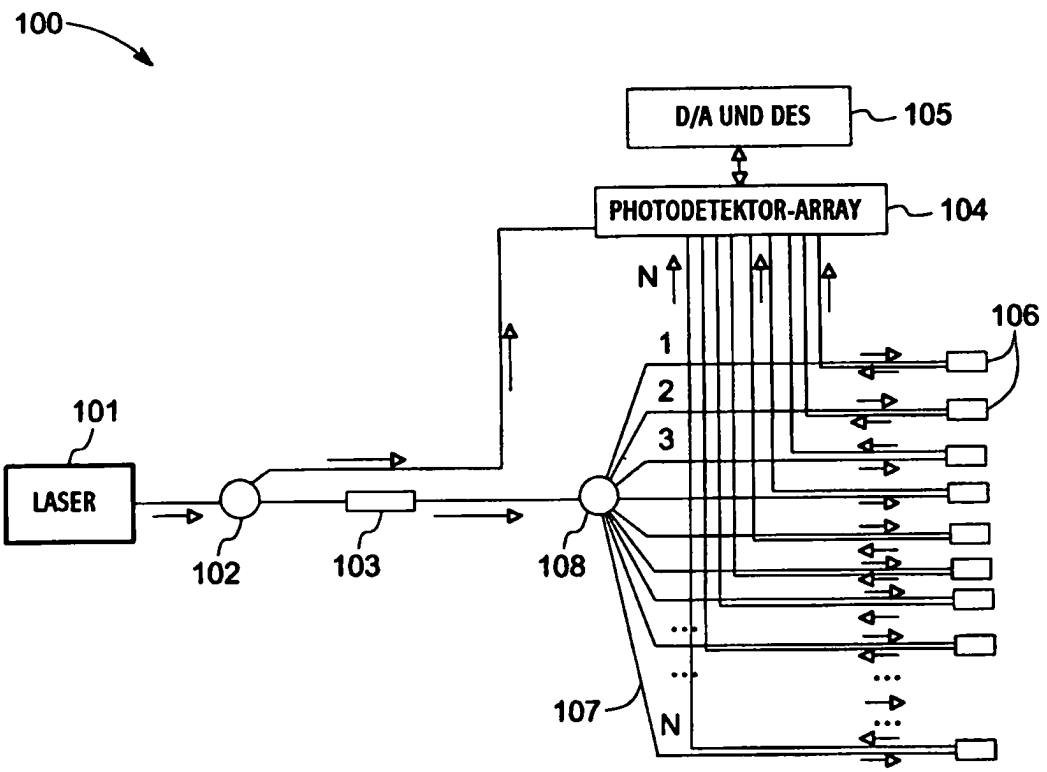

100
D/A UND DES
105
PHOTODETEKTOR-ARRAY
104
N
1
2
3
106
101
LASER
102
103
108
107
N

FIG. 4

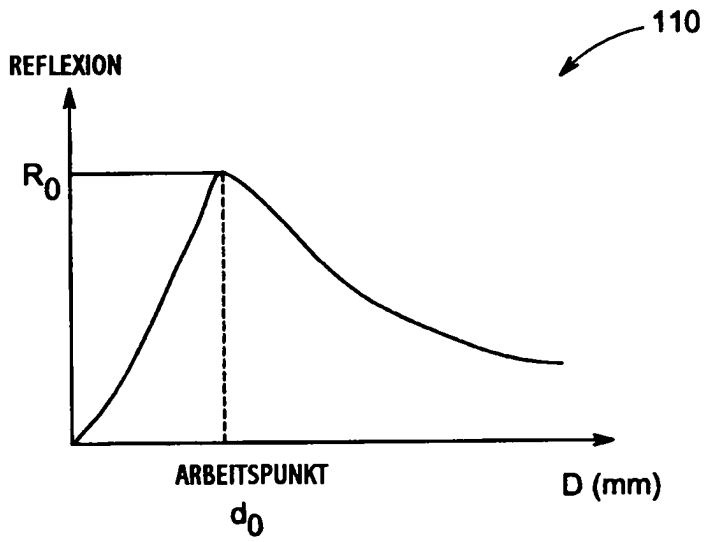

110
REFLEXION
R_0
ARBEITSPUNKT
d_0
D (mm)

FIG. 5

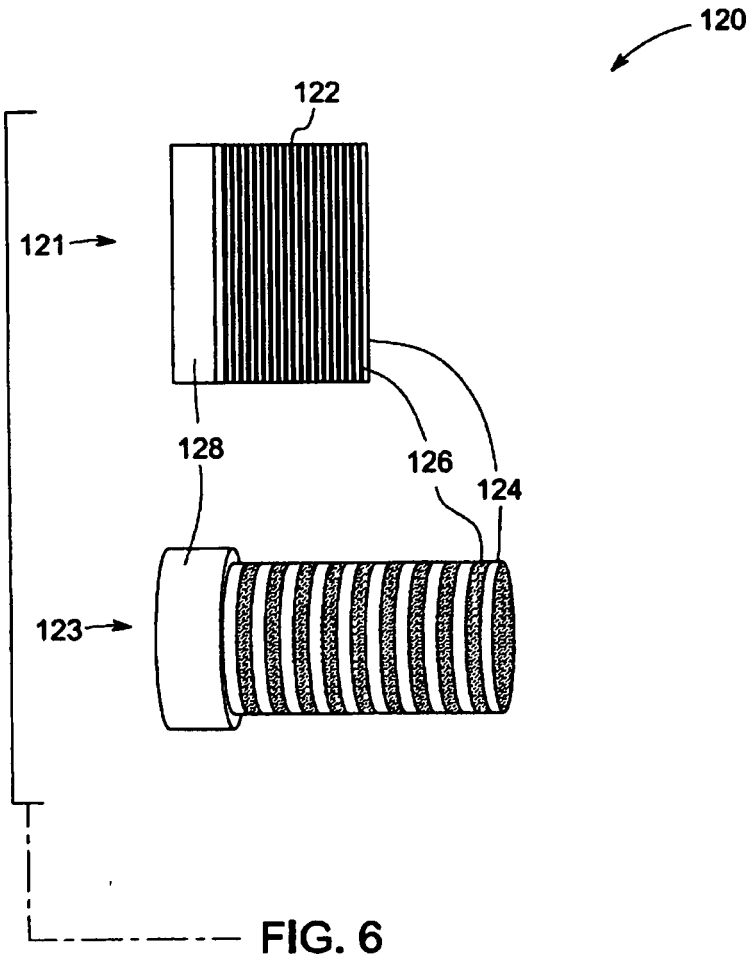


FIG. 6

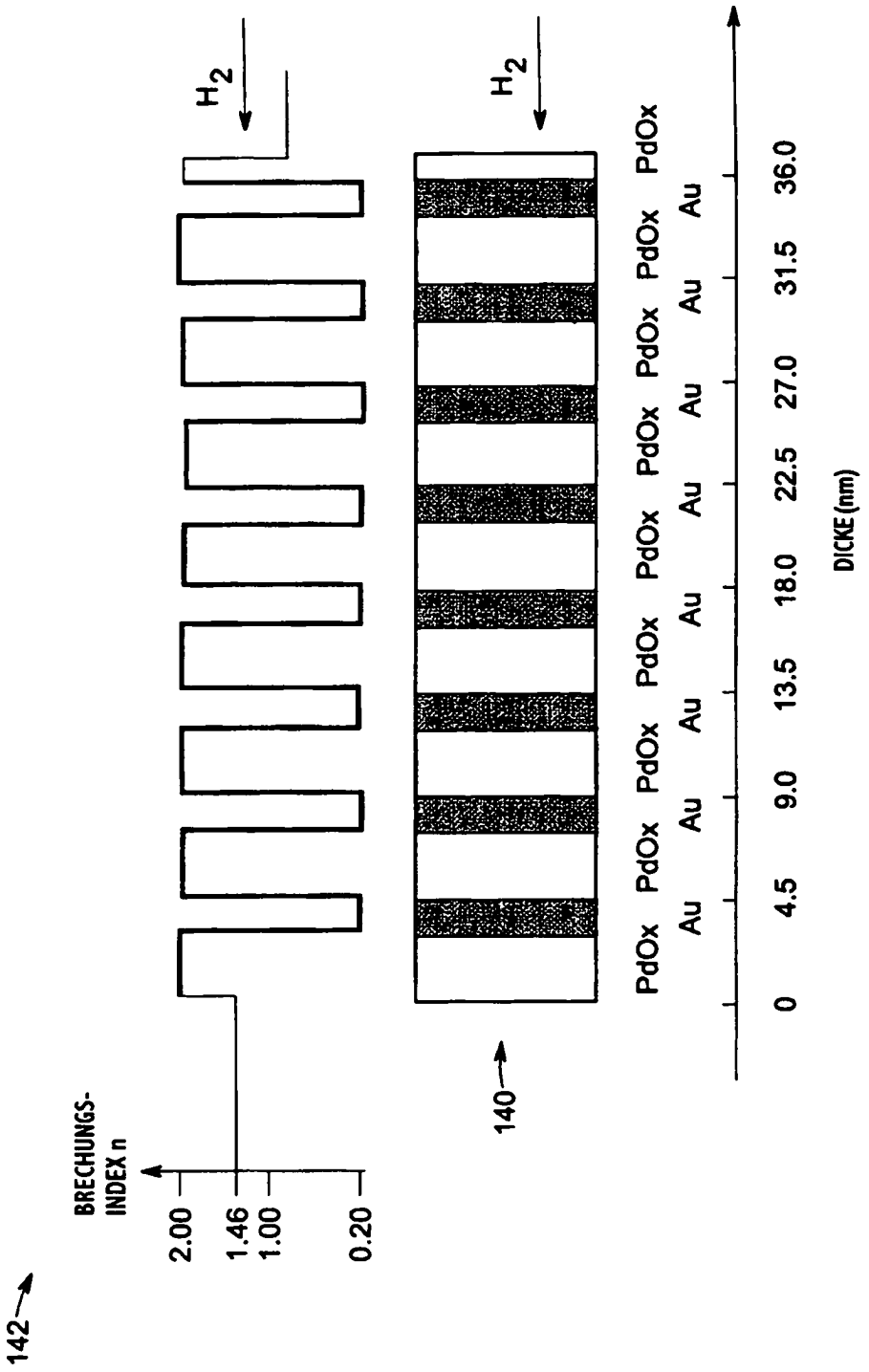

142
BRECHUNGS-INDEX n
2.00
1.46
1.00
0.20
H_2
H_2
140
PdOx
Au
0
4.5
9.0
13.5
18.0
22.5
27.0
31.5
36.0
DICKE (nm)

FIG. 7

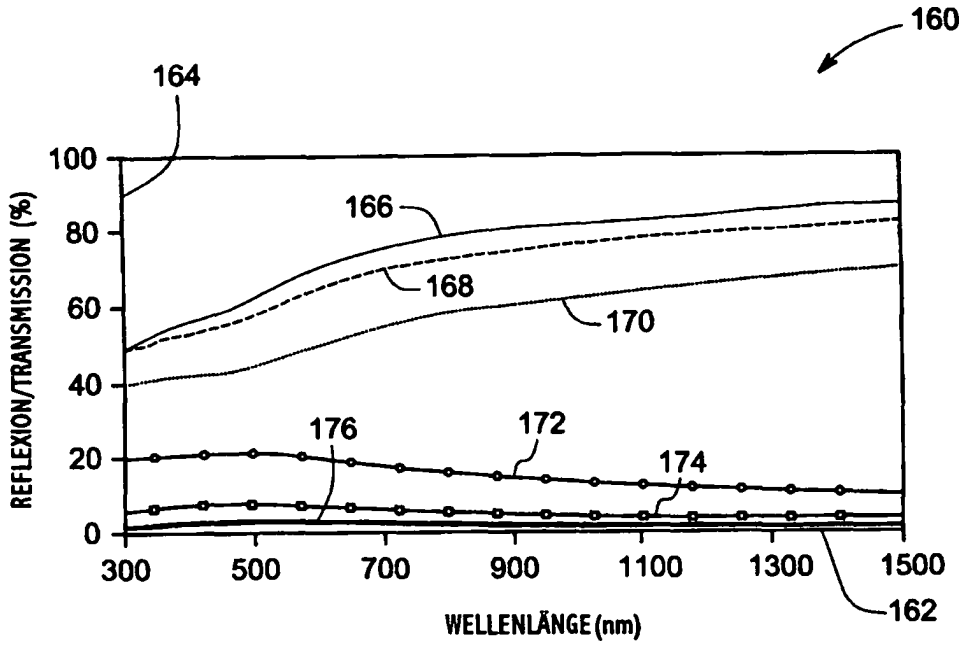

160
164
100
80
60
40
20
0
REFLEXION/TRANSMISSION (%)
166
168
170
176
172
174
300
500
700
900
1100
1300
1500
WELLENLÄNGE (nm)
162

FIG. 8

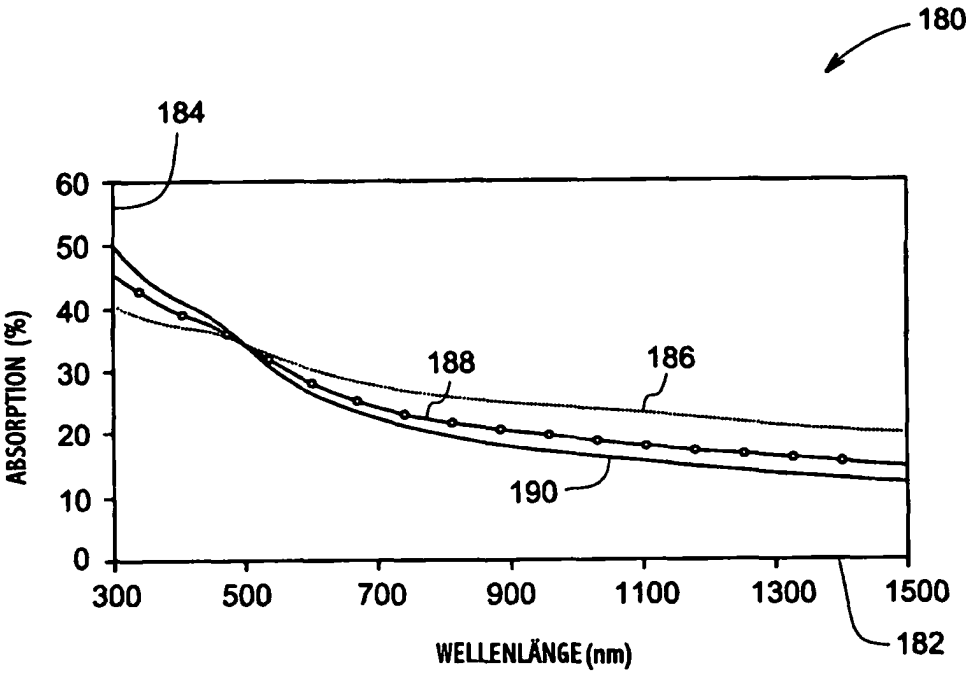

180
184
60
50
40
30
20
10
0
ABSORPTION (%)
188
186
190
300
500
700
900
1100
1300
1500
WELLENLÄNGE (nm)
182

FIG. 9

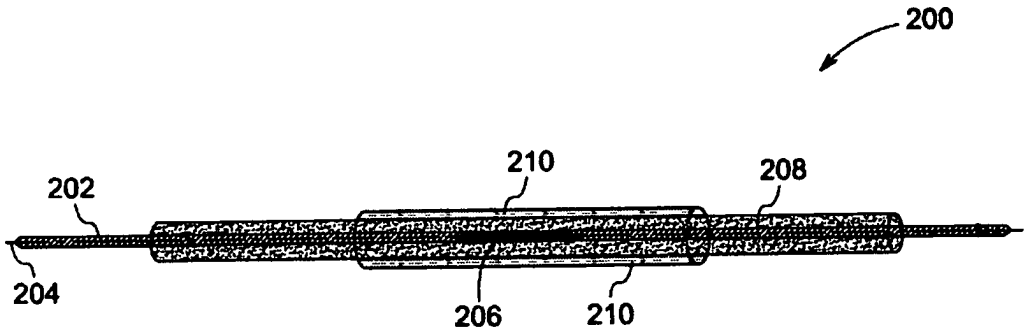

200
202
210
208
204
206
210

FIG. 10

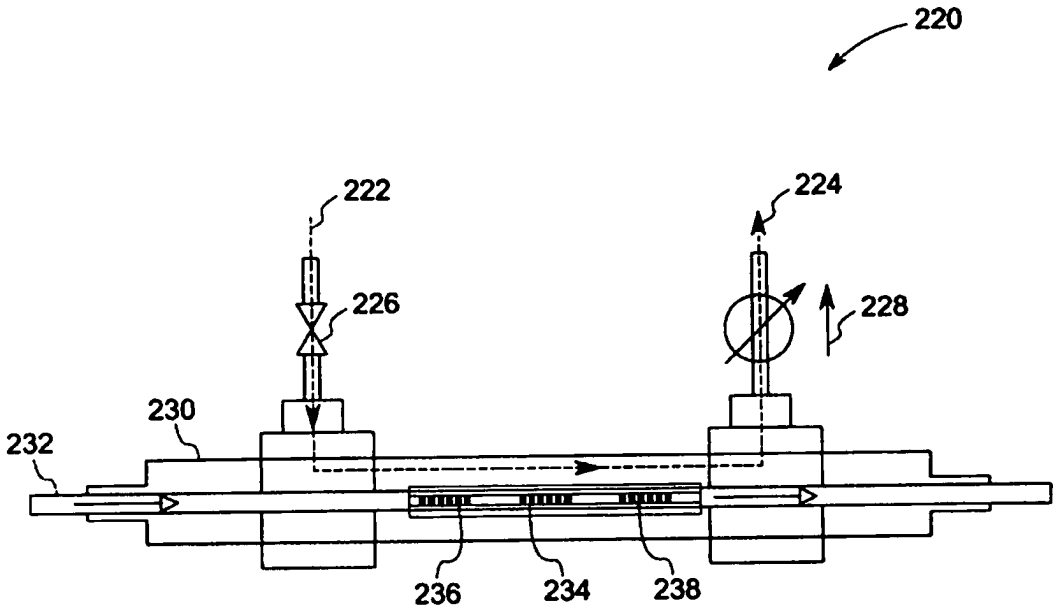

220
222
224
226
228
230
232
236
234
238

FIG. 11