



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 42 11 741 B4 2006.09.21**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **P 42 11 741.0**
 (22) Anmeldetag: **03.04.1992**
 (43) Offenlegungstag: **08.10.1992**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **21.09.2006**

(51) Int Cl.⁸: **G01J 3/447 (2006.01)**
G01N 21/21 (2006.01)
G01N 21/43 (2006.01)
G01J 4/00 (2006.01)

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. 2 Patentkostengesetz).

(66) Innere Priorität:
P 41 11 561.9 05.04.1991

(73) Patentinhaber:
Hahn-Meitner-Institut Berlin GmbH, 14109 Berlin, DE

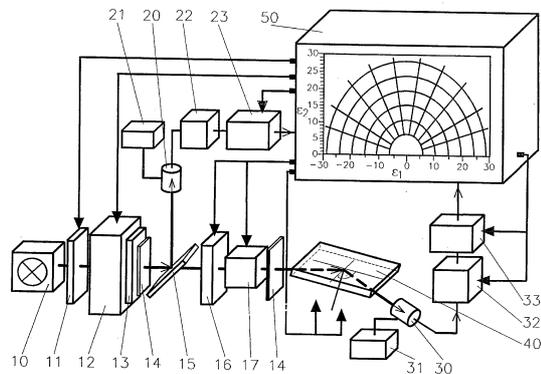
(72) Erfinder:
Lewerenz, Hans-Joachim, Dr.rer.nat. Priv.-Doz, 14109 Berlin, DE; Dietz, Nikolaus, Dr.rer.nat., 10587 Berlin, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
US 36 23 818 A
US 34 02 631 A
EP 04 22 780 A2
EP 02 37 415 B1
FEDOSEJEVS, R. et.al.: Appl.Phys. B 50, (1990), 79-99;

(54) Bezeichnung: **Spektroskopische Untersuchungsmethode für einen Stoff im Energiebereich geringer Absorption**

(57) Hauptanspruch: Spektroskopische Untersuchungsmethode für einen Stoff im Energiebereich geringer Photonenabsorption (Energilücke) unter Ausnutzung der Tatsache, dass die Reflektivität für einfallendes Licht, das parallel zur Einfallsebene polarisiert ist, im Brewsterwinkel ein stark ausgeprägtes Minimum aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass zur kontaktfrei und bei Umgebungstemperatur durchführbaren Ermittlung der Störstellencharakteristik von Prüflingen (40) in einem Regelkreis

- mit einer Monochromator-Regelschleife zur Veränderung der Wellenlänge von Sondenlicht in einem Wellenlängenbereich von Ultraviolett bis Infrarot mit einer Auflösung von besser als 0,1 nm iterativ eine punktweise Abtastung der Oberfläche des Prüflings (40) durchgeführt wird und
- mit einer Goniometer-Regelschleife zur Veränderung des Einfallswinkels des zum Prüfling (40) gelangenden Sondenlichts mit einer Winkelauflösung von besser als 0,002 Grad, wobei der Einfallswinkel vornehmlich im Bereich des Brewsterwinkels verstellt und derjenige Einfallswinkel hochgenau bestimmt wird, bei dem das vom Prüfling (40) reflektierte, mit hoher Empfindlichkeit detektierte Licht sein Intensitätsminimum aufweist,
- aus dem absoluten Wert...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine spektroskopische Untersuchungsmethode für einen Stoff im Energiebereich geringer Photonenabsorption (Energilücke) unter Ausnutzung der Tatsache, dass die Reflektivität für einfallendes Licht, das parallel zur Einfallsebene polarisiert ist, im Brewsterwinkel ein stark ausgeprägtes Minimum aufweist.

Stand der Technik

[0002] Aus dem Artikel von S.A. Ahmed et al: „Optical refractive and reflective properties of resonantly absorbing media" in "J. Chem. Phys." Bd. 91, Nr. 7 (1. Oktober 1989) Seiten 3838 bis 3845 ist bekannt, dass durch Untersuchungen mit einem gebündelten Strahl von polarisiertem monochromatischem Licht an der Grenzfläche zwischen einem absorbierenden isotropen Medium und Luft über die Messung der Reflektivität bei beliebigen Einfallswinkeln oder Wellenlängen Aussagen zum Absorptionskoeffizienten und aus der Kenntnis des Brewsterwinkels Angaben zur Brechzahl des Mediums gemacht werden können. Der dazu verwendete Messaufbau enthält z.B. einen Laser, von dem polarisiertes gebündeltes Licht unter veränderbarem Einfallswinkel zum Prüfling gelangt, und Detektoren zum Messen der Intensitäten des einfallenden und des reflektierten Lichts.

[0003] Mit dem in US 3 402 631 A beschriebenen Reflektometer mit sehr ähnlicher Grundausstattung wie das oben erwähnte wird an spiegelnden Grenzflächen das Verhältnis der Intensitäten der parallel und der senkrecht polarisierten Komponenten von reflektiertem monochromatischem Licht in Abhängigkeit vom Einfallswinkel detektiert. Von wesentlicher Bedeutung für dieses bekannte Reflektometer ist dessen Aufbau, der eine Beweglichkeit für die Änderung des Einfallswinkels nur beim Prüfling und einer Spiegelanordnung erfordert.

[0004] In der US-Zeitschrift "Anal. Biochem." Bd. 145, Nr. 1 (1985) Seiten 106 bis 112 (H. Arwin et al: „A Reflectance Method for Quantification of Immunological Reactions on Surfaces") wird erwähnt, zur Quantifizierung der Schichtdicke eines organischen Materials auf einer reflektierenden Siliziumfläche die Tatsache auszunutzen, dass die Reflektivität für einfallendes Licht, das parallel zur Einfallsebene polarisiert ist, bei Stoffen mit geringer Absorption beim so genannten Brewsterwinkel ein stark ausgeprägtes Minimum aufweist. Dabei liegen die absoluten Werte des Reflexionskoeffizienten in den Minima der Reflektivität zwischen 0 und etwa 0,01 für Schichtdicken d von 0 nm bis 10 nm. Die Ausprägung dieser Minima ist deutlich für Änderungen des Einfallswinkels im Bereich von etwa 10 Grad zu erkennen.

[0005] Die aus EP 0 422 780 A2 bekannte Untersuchungsmethode dient der quantitativen Erfassung einer speziellen Verunreinigung ausschließlich in einem kristallinen Halbleiterwafer, speziell der Messung des interstitiellen Sauerstoffgehalts in Silizium, durch Bestrahlen der bekannten Verunreinigungsstelle mit einem Lichtstrahl einer solchen vorbekannten Wellenlänge, die von der Verunreinigung absorbiert wird. Die Untersuchungsmethode nutzt p-polarisiertes Licht des infraroten Spektralbereiches, um bei der festen, nicht variierten Wellenlänge, das Reflexionsvermögen der Probe sowie einer als Normal dienenden Referenzprobe mit bekanntem Anteil von Sauerstoffatomen gleichzeitig im Brewsterwinkel zu messen. Der Vergleich der Werte dient zur absoluten Angabe dieser Fremdatomkonzentration. Die bekannte Untersuchungsmethode ermittelt somit keine energetischen Defektniveaus. Sie kann nicht zur Charakterisierung unbekannter Materialien oder bekannter Materialien mit unbekanntem Verunreinigungen verwendet werden. Die bekannte Untersuchungsmethode setzt vielmehr die genaue Kenntnis der energetischen Lage einer speziellen Verunreinigungsstelle im Infrarotbereich voraus. Ohne die Verwendung der Referenzprobe, über die aus anderen, zuvor angewendeten Untersuchungsmethoden Zusatzinformationen gewonnen wurden, liefert die bekannte Untersuchungsmethode keine Aussage. Insbesondere ist nicht erkennbar, ob über die beschriebene Messung vibronischer Anregungen des kompletten Sauerstoffatoms hinaus auch elektronische Anregungen zwischen den Halbleiterbändern und den energetisch innerhalb der Bandlücke lokalisierten Defektniveaus von Fremdatomen messbar wären. Die bekannte Untersuchungsmethode ermittelt keine optischen Konstanten. Als absolut messende Methode ist sie extrem empfindlich gegenüber Störungen der Oberflächenqualität, was nahe legt, dass diese Empfindlichkeit einen negativen Einfluss auf länger andauernde spektrale Messungen haben würde.

[0006] Grundlage für spektroskopische Untersuchungen bilden somit die aus der klassischen Lichttheorie bekannten optischen Erscheinungen wie Reflexion, Brechung, Polarisation und dgl. von Licht bestimmter Wellenlänge und deren Zusammenhang über z.B. Brechungsindex und Absorptionskoeffizient als jeweils spezifische Stoffeigenschaften.

Aufgabenstellung

[0007] Das technische Problem, das der Erfindung zugrunde liegt, besteht darin, derartige optische Erscheinungen an Materialien für Festkörper-, besonders für Halbleiter-Bauelemente, z.B. für optoelektronische Anwendungen bei deren Entwicklung, Herstellung, Behandlung und Optimierung nutzbar zu machen, um kontaktfrei und bei Umgebungstemperatur mit hoher Empfindlichkeit und hoher Auflösung Untersuchungen durchführen zu können, die eine eindeutige, präzise Materialcharakterisierung ermöglichen. Es ist also eine zuverlässige, einfach handhabbare und leicht auswertbare spektroskopische Untersuchungsmethode erwünscht, durch die Informationen vornehmlich zur Störstellencharakterisierung in Halbleitern, also über Unregelmäßigkeiten im Gitteraufbau und Verunreinigungen, d.h. über Defektzustände, deren energetische Lage und Dichte sowie ggf. auch über deren räumliche Verteilung und Häufigkeit zu erhalten sind.

[0008] Hochempfindliche Gerätschaften, mit denen solche Untersuchungen durchgeführt werden können, finden Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit bezüglich der Auflösung bei mechanischen, optischen und elektronischen Komponenten und deren Stabilität sowie auch Rauschen usw.

[0009] Die Aufgabe wird durch eine spektroskopische Untersuchungsmethode der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass erfindungsgemäß zur kontaktfrei und bei Umgebungstemperatur durchführbaren Ermittlung der Störstellencharakteristik von Prüflingen in einem Regelkreis

- mit einer Monochromator-Regelschleife zur Veränderung der Wellenlänge von Sondenlicht in einem Wellenlängenbereich von Ultraviolett bis Infrarot mit einer Auflösung von besser als 0,1 nm iterativ eine punktweise Abtastung der Oberfläche des Prüflings durchgeführt wird und
- mit einer Goniometer-Regelschleife zur Veränderung des Einfallswinkels des zum Prüfling gelangenden Sondenlichts mit einer Winkelauflösung von besser als 0,002 Grad, wobei der Einfallswinkel vornehmlich im Bereich des Brewsterwinkels verstellt und derjenige Einfallswinkel hochgenau bestimmt wird, bei dem das vom Prüfling reflektierte, mit hoher Empfindlichkeit detektierte Licht sein Intensitätsminimum aufweist,
- aus dem absoluten Wert eines solchen Intensitätsminimums unter Bezugnahme auf eine als Referenz gemessene Intensität des zum Prüfling gelangten Sondenlichts unmittelbar der Wert der Reflektivität ermittelt wird und
- aus dem ermittelten Einfallswinkel und der ermittelten Reflektivität in diesem Winkel über deren lichttheoretischen Zusammenhang mit dem Real- und Imaginärteil der dielektrischen Funktion ϵ der Brechungsindex n und der Extinktionskoeffizient k als optische Konstanten für die spezifischen Stoffeigenschaften des Prüflings an der Abtaststelle analytisch bestimmt werden, wobei von im Prüfling auftretenden Störstellen verursachte Änderungen der optischen Konstanten mit hoher Empfindlichkeit und Auflösung energetisch nachweisbar sind.

[0010] Auf diese Weise kann selbsttätig in iterativen Suchläufen jeweils bei einer diskreten Wellenlänge des Sondenlichts der Brewsterwinkel, also derjenige Einfallswinkel hochgenau bestimmt werden, bei dem das vom Prüfling reflektierte, mit hoher Empfindlichkeit detektierte Licht sein Minimum aufweist. Der absolute Wert eines solchen Minimums führt unter Bezugnahme auf die als Referenz gemessene Intensität des zum Prüfling gelangten Sondenlichts unmittelbar auf den Wert der Reflektivität. Vom Prozessrechner werden außerdem die bei jedem Suchlauf zum Brewsterwinkel und zur Reflektivität ermittelten Werte für die Bestimmung der Ausgangslage für den Suchlauf bei einer nächsten diskreten Wellenlänge des Sondenlichts verwendet und schließlich durch Vergleich mit Werten, die nach Art eines Nomogramms als Tabelle abgespeichert sind, Daten zu Stoffeigenschaften – Brechungsindex und Absorptionskoeffizient – ausgegeben, mit denen ein Material eindeutig definiert wird. Den Zusammenhang zwischen den phänomenologisch bei der Beschreibung der Wellenausbreitung in einem Material eingeführten Größen n (Brechungsindex) und k (Extinktionskoeffizient) liefern dabei die in der mikroskopischen Theorie der optischen Eigenschaften berechneten Real- und Imaginärteile der komplexen Dielektrizitätskonstanten.

[0011] Von wesentlicher Bedeutung ist dabei, dass bei jedem Suchlauf der Brewsterwinkel hochgenau bestimmt wird. Das Kriterium hierfür bildet das absolute, mit hoher Empfindlichkeit detektierte Minimum der Intensität des vom Prüfling reflektierten, parallel zur Einfallsebene polarisierten Lichts. Im absorptionsfreien Fall verschwindet diese Reflexionskomponente vollständig. Das heißt aber, dass bereits eine geringfügige Abweichung von der Brewsterbedingung, z.B. durch Absorption an Störstellen, zu einem von Null verschiedenen Reflexionsanteil führt, der mit hoher Empfindlichkeit nachweisbar ist. Elektrische Untersuchungsmethoden wären für derartige Defektanalysen in Bereichen hoher Dotierstoffkonzentrationen und hoher Defektdichten nicht mehr anwendbar.

[0012] In einer Ausführungsform der Erfindung wird als Prüfling ein Halbleiter verwendet.

[0013] Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung, die sich auf Maßnahmen zu einer weiteren Erhöhung der Empfindlichkeit beziehen, sehen z.B. eine Beeinflussung der Polarisation des Sondenlichts vor. Dazu kann in einer Regelschleife – bei dem im Suchlauf ermittelten Minimum des vom Prüfling reflektierten Lichts – die Polarisationsrichtung des einfallenden Sondenlichts bezüglich der Einfallsebene geprüft und präzise nachgestellt werden. Außerdem kann mittels eines Polarisationsmodulators die Polarisationsrichtung in geringem Maß im Bereich des vorhandenen Istwerts variiert werden; ergibt sich dabei für das Minimum der Intensität des reflektierten Lichts ein geringerer Absolutwert als zuvor, lässt sich auf diese Weise der für die Reflektivität ermittelte Wert präzisieren.

[0014] Zur Eliminierung von Störeinflüssen ist in einer anderen Ausführungsform der Erfindung vorgesehen, das zum Prüfling gelangende Sondenlicht zu choppen. Dies kann zweckmäßig durch Einsatz eines Lichtchoppers im Strahlengang des zum Prüfling gelangenden Sondenlichts und von Lock-In-Verstärkern in den Signalleitungen für die zum Prozessrechner geführten Ausgangssignale der beiden Detektoren erfolgen.

[0015] Rauschen mit seinen nachteiligen Auswirkungen bei der Messung der an sich geringen Intensität des vom Prüfling reflektierten, parallel zur Einfallsebene polarisierten Lichts lässt sich vorteilhaft durch Kühlung der Detektoren gering halten. Es können dazu herkömmliche Temperaturregler für die Detektoren vorgesehen werden, mit denen photoelektrische Detektoren z.B. auf Siliziumbasis auf ca. – 15 °C, auf Germanium- oder Bleisulfid-Basis auf ca. – 30 °C gehalten werden.

[0016] Mittels eines Messtisches, auf dem der Prüfling deponiert wird, kann eine orts aufgelöste Untersuchung auf einfache Weise durch Verschieben des Prüflings in zwei Richtungen, senkrecht zur Normalen und zueinander, durchgeführt werden.

[0017] Bei Ausführungsformen der Erfindung ist außerdem die Möglichkeit gegeben, dass der Prüfling auf unterschiedliche Temperaturen eingestellt wird. Untersuchungen über das Verhalten einer elektromagnetischen Welle optischer Frequenzen in einem Material mit der Temperatur als Parameter liefern zusätzliche Informationen zur Materialcharakterisierung und erleichtern z.B. auch die Vergleichbarkeit von Ergebnissen, die mit anderen Untersuchungsmethoden gewonnen wurden.

Ausführungsbeispiel

[0018] Im folgenden Ausführungsbeispiel wird die erfindungsgemäße Lösung anhand von Zeichnungen näher beschrieben. Dabei zeigen:

[0019] **Fig. 1:** ein Reflektometer, mit dem die erfindungsgemäße spektroskopische Untersuchungsmethode durchgeführt werden kann, in einer Art Blockschaltbild;

[0020] **Fig. 2:** ein Schaubild für den Verlauf messbarer und daraus bestimmbarer Größen zur Materialcharakterisierung;

[0021] **Fig. 3:** ein Nomogramm zum Bestimmen von Materialkonstanten aus gemessenen optischen Materialeigenschaften;

[0022] **Fig. 4:** eine Prinzipskizze für den Strahlenverlauf und die strahlengeometrische gegenseitige Orientierung von Lichtquelle, Prüfling und hochempfindlichem Detektor und

[0023] **Fig. 5:** eine Prinzipskizze für den Strahlenverlauf bei fester Position von Lichtquelle, Prüfling und hochempfindlichem Detektor, mit einer längs verschiebbaren und zwei in der Winkelstellung veränderbaren Strahlentlenkungs-Bauteilen.

[0024] Bei einem Reflektometer für spektroskopische Untersuchungen gemäß **Fig. 1** ist eine Lichtquelle **10** für Sondenlicht im Wellenlängenbereich z.B. von Ultraviolett bis Infrarot vorgesehen. Im Strahlengang des Sondenlichts folgt ein Lichtchopper **11**, ein Monochromator **12**, ein optisches System **13** für dispersionskorrigierte Abbildung, ein erster optischer Spalt **14** zur Ausblendung eines parallelen Strahlenbündels, ein Strahlteiler **15**, ein Polarisator **16**, ein Polarisationsmodulator **17** und ein zweiter optischer Spalt **14**. Der vom Strahlteiler **15** abgespaltene Anteil des Sondenlichts gelangt zu einem Referenz-Detektor **20**.

[0025] Auf den Prüfling **40** – in **Fig. 1** als ein Plättchen dargestellt, dessen Einfallsebene die untere Oberflä-

che sein soll, deren Normale also nach unten weist – trifft das eingestrahlte Sondenlicht unter veränderbarem Einfallswinkel auf (hierzu siehe weiter unten im Zusammenhang mit den Erläuterungen zu [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#)). Das dort reflektierte Licht gelangt zu einem hochempfindlichen Detektor **30**.

[0026] Die Detektoren **20**, **30** können mit Temperaturreglern **21**, **31** ausgerüstet sein. Die Ausgangssignale der Detektoren **20**, **30** gelangen über Vorverstärker **22**, **32** und Lock-In-Verstärker **23**, **24** zu einem Prozessrechner **50**. Dieser dient zur Steuerung der mechanischen, optischen und elektronischen Komponenten und zur Auswertung der ermittelten Daten.

[0027] Eine erste Steuerschleife bewirkt die Verstellung des Einfallswinkels des Sondenlichts. Hierzu sind goniometrische Verstellungen z.B. von zwei der drei im Strahlengang gegenseitig aufeinander orientierten Systeme, dem für den einfallenden Lichtstrahl, dem Prüfling und dem zum Detektieren des reflektierten Lichtstrahls, erforderlich. Wird z.B. der einfallende Lichtstrahl nicht in seiner Richtung verändert und der Prüfling geschwenkt, muss der Detektor um den doppelten Winkel nachgeführt werden. Bleibt der Prüfling in seiner Lage fest stehen, sind die Systeme für den einfallenden und den reflektierten Strahl spiegelbildlich um gleichgroße Winkelbeträge zu schwenken.

[0028] Derartige goniometrische Verstelleinrichtungen müssen bei Ausführungsformen der Erfindung Winkelverstellungen von 0,002 Grad oder noch höher auflösend zulassen. Dazu sind herkömmliche Schrittmotoren sowie für Feineinstellungen auch piezoelektrische Bauelemente geeignet.

[0029] Eine zweite Regelschleife dient dazu, das Ausgangssignal des hochempfindlichen Detektors **30** durch stufenweise einstellbare Verstärkung des Vorverstärkers **32** im Bereich von mehreren Zehnerpotenzen hochgenau bestimmen zu können.

[0030] Die beiden erwähnten Regelschleifen wirken bei den Suchläufen zur exakten Bestimmung des Brewsterwinkels nach dem nachstehend skizzierten Programmablauf zusammen.

A: Vorgabe des vermuteten Brewsterwinkels – BW – und Vorgabe einer ersten diskreten Wellenlänge I_0 ($j = 0$); Suchlauf $i = 0$

B: Bestimmung der reflektierten Intensität I_{Rp} in einem Winkelbereich von ± 10 Grad mit einer Auflösung von besser als 0,1 Grad; dabei wird die Verstärkung V am Vorverstärker **32** automatisch auf Maximum ausgeregt (Verstärkungsstufe V_i). Ergebnis: Verlauf von I_{Rp0} im Bereich ± 10 Grad vom vermuteten BW;
– automatische Bestimmung des Minimums von I_{Rp0} ;

Ergebnis: auf 0,1 Grad genaue Angabe des Minimums von I_{Rp1} bezüglich BW.

C: Suchläufe $i = i + 1$

– Bestimmung des Winkelintervalls W_i derart, dass $I_{Rpi} \max. = I_{Rp(i-1)} \max./10$;

– Goniometerpositionierung auf $BW - W_i/2$;

– Verstärkungsstufe $V_i = V_{i-1} \times 10$;

– Bestimmung von I_{Rpi} im Winkelintervall $\pm W_i$; mit einer einstellbaren Winkelauflösung von etwa $W_i/50$;

– automatische Bestimmung von BW aus $I_{Rpi} = \text{Min.}$ und R_p aus $I_{Rp \min}$ und I_{Referenz}

– Vergleich: Ist $I_{Rp \min} \times 10$ kleiner als 10:

wenn ja: neuer Suchlauf $i = i + 1$;

wenn nein: weiter bei D:

D: Die größtmögliche Empfindlichkeitsstufe, mit der BW aufgelöst werden kann, ist erreicht; aus dem Nogramm ergeben sich

$$(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = f(BW, R_p)$$

$$R_p = \frac{I_{Rp \text{ bei BW}}}{I_{\text{Referenz}}}$$

bei erster diskreter Wellenlänge.

E: Suchläufe bei zweiter, ... diskreter Wellenlänge

($j = j + 1$) mit einer Wellenlängenänderung um 1 nm oder besser:

aus D werden bestimmt: $W = W_j$; $V = V_j$.

– Monochromator: Einstellung auf neue diskrete Wellenlänge;

– Goniometerpositionierung auf $BW - W_j/2$;

– Bestimmung von I_{Rp} im Intervall $BW \pm W_j/2$;

– Abfrage: Ist Detektorsignal übersteuert

wenn ja: neue Einstellung $V_i = V_i/3$ und erneut Bestimmung von I_{Rp}
wenn nein: Abfrage: Ist Detektorsignal I_{Rp} max kleiner $1/3$ des
Gesamtbereichs:
wenn ja: neue Einstellung $V_i = V_i \cdot 3$ und
erneute Bestimmung von I_{Rp} ;
wenn nein: Suchlauf bei "C" mit Bestimmung von
 I_{Rp} und BW bis "D".
– Vergleich: Ist Wellenlängenbereich vollständig durchlaufen:
wenn ja: Programmende
wenn nein:
– Vergleich: Ist $B_{Wneu} = BW_{alt}$
wenn ja: neuer Suchlauf "E"
wenn nein: Verschiebung des Winkelintervalls um

$$|BW_{alt} - BW_{neu}|$$

und neuer Suchlauf "E".

[0031] Die Funktionsweise der weiter oben bereits erwähnten Komponenten, z.B. des Polarisators **16**, des Polarisations-Modulators **17**, des Lichtchoppers **11** zusammen mit den Lock-In-Verstärkern **23**, **33** und der Temperaturregler **21**, **31** für die Detektoren **20**, **30** bedarf bezüglich der hochgenauen Bestimmung des Brewsterwinkels bei Ausführungsformen der Erfindung ebenso wie die eines Messtisches zur orts aufgelösten Untersuchung des Prüflings **40** und von Einrichtungen zum Einstellen unterschiedlicher Temperaturen am Prüfling **40** hier wohl keiner näheren Erläuterung.

[0032] Das in [Fig. 2](#) gezeigte Schaubild soll den Zusammenhang von optischen Größen im Energiebereich von 0,6 eV bis 1,8 eV verdeutlichen. Die optische Funktion ϵ folgt aus theoretischen Lorentzfunktionen. Im vorliegenden Beispiel kennzeichnet die Lage der Lorentzlinien ein Material mit einer Energielücke von 1,56 eV und einer Störstelle bei 0,75 eV.

[0033] Aus den Kurvenverläufen a und b ist zu entnehmen, dass die von der Störstelle verursachte Änderung der optischen Größen bei a – dem Brewsterwinkel – deutlicher in Erscheinung tritt als bei b – der Reflektivität -. Zur Identifizierung einer Absorptionsstelle ist es deshalb vorteilhaft, die Änderung des Brewsterwinkels – a – genauer zu untersuchen. Es zeigt sich, dass die energetische Lage der Lorentzlinie über den Wendepunkt in der zweiten Ableitung des Brewsterwinkels nach der Energie – Kurve c – genau zu bestimmen ist. Liegen größere Defektstrukturen vor, so kann es ausreichend sein, nur die Änderungen der reflektierten Intensität im Bereich des Brewsterwinkels als Funktion der eingestrahlten Lichtenergie zu betrachten.

[0034] Für diese energetische Lage der Störstelle lassen sich aus dem Kurvenverlauf d der Realteil und aus dem Kurvenverlauf e der Imaginärteil der dielektrischen Funktion ϵ ablesen.

[0035] Die sich aus der klassischen Lichttheorie ergebenden Zusammenhänge zwischen Brewsterwinkel, Reflektivität und Real- und Imaginärteil der dielektrischen Funktion sind analytisch bestimmbar und in [Fig. 3](#) in Form eines Nomogramms dargestellt. Aus den Dispersionsrelationen

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \text{ und } \epsilon_2 = 2nk$$

$$\text{bzw. } k = \frac{c \times \alpha}{2\omega}$$

ergeben sich Brechungsindex n und Extinktionskoeffizient k bzw. Absorptionskoeffizient α .

[0036] Die [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) zeigen schematisch zwei Möglichkeiten für die Anordnung der Komponenten, die im Strahlenverlauf des einfallenden und des reflektierten Lichts bei veränderbarem Einfallswinkel aufeinander auszurichten sind.

[0037] Bei der in [Fig. 4](#) gezeigten Anordnung liegen der von der Lichtquelle **1** unter veränderbarem Einfallswinkel zum Prüfling **4** gelangende und der dort unter sich entsprechend änderndem Winkel reflektierte und zum Detektor **3** gelangende Lichtstrahl in der Einfallsebene. Diese liegt parallel zur X-Y-Ebene und enthält auch die Normale, die senkrecht zur X-Z-Ebene verläuft. Bezogen auf die Lage des Prüflings **4** sind die Lichtquelle **1** und der Detektor **3** in der Einfallsebene gegenüber der Richtung der Normalen um gleiche Winkelbeträge auf

die Normale zu bzw. von ihr weg zu schwenken, wenn sich der Einfallswinkel und damit auch der Reflexionswinkel ändern sollen.

[0038] In der Anordnung gemäß [Fig. 5](#) sind sowohl der Prüfling **4** als auch die Lichtquelle **1** und der Detektor **3** in ihren Winkelstellungen nicht veränderbar. Änderungen des Einfallswinkels und Reflexionswinkels werden hier mittels einer Einrichtung herbeigeführt, die zwei sich gegensinnig in ihren Winkelstellungen simultan bewegbare optische Bauelemente **42, 43** – z.B. Prismen – aufweist. Die Fokussierung des einfallenden Lichts am Prüfling **4** erfolgt über eine Längsverschiebung, wie durch den Doppelpfeil angedeutet.

[0039] Für ortsauflösende Untersuchungen des Prüflings **4** soll durch dessen Halterung auf einem Messtisch **44** angedeutet werden, dass eine punktweise Abtastung der Oberfläche des Prüflings **4** durch das einfallende Sondenlicht erfolgt, wenn der Messtisch **44** seitlich in zueinander senkrechten Richtungen verschoben wird.

[0040] Für die hochgenauen, hochauflösenden Untersuchungen können im Wesentlichen marktgängige Gerätschaften eingesetzt werden. Als Monochromator **12** eignet sich z.B. ein Gerät mit einer Schrittmotorsteuerung und Auflösung von besser als 0,1 nm. Für den Polarisator **16**, einen Glan-Thomson-Polarisator, kann ein Gerät eingesetzt werden, bei dem die Positionierung über eine Schrittmotorsteuerung mit einer Auflösung von 0,001 Grad erfolgt. Als Polarisationsmodulator **17** sind z.B. ein Faraday- oder ein photoelastischer Modulator verwendbar. Photoelektrische Detektoren **20, 30** sind handelsüblich, z.B.

aus	Wellenlängenbereich (nm)		Arbeitstemperatur (°C)	
Si	300	bis	1.100	- 15
Ge	800	bis	1.700	- 30
PbS	1.1000	bis	2.500	- 30.

[0041] Temperaturregler **21, 31** sind als zweistufig gekühlte Peltierelemente, Vorverstärker **22, 32** mit veränderbaren Verstärkungsfaktoren von 10^5 bis 10^{11} erhältlich.

[0042] Über wesentliche Einzelheiten der Untersuchungsmethode mit einem Reflektometer gemäß der Erfindung ist nach dem für den Zeitrang der Anmeldung maßgeblichen Tag von den Erfindern in "Applied Physics Letters" Band 59 Nr. 12, 16. September 1991, Seiten 1470 bis 1472 berichtet worden.

Patentansprüche

1. Spektroskopische Untersuchungsmethode für einen Stoff im Energiebereich geringer Photonenabsorption (Energieslücke) unter Ausnutzung der Tatsache, dass die Reflektivität für einfallendes Licht, das parallel zur Einfallsebene polarisiert ist, im Brewsterwinkel ein stark ausgeprägtes Minimum aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass

zur kontaktfrei und bei Umgebungstemperatur durchführbaren Ermittlung der Störstellencharakteristik von Prüflingen (**40**) in einem Regelkreis

- mit einer Monochromator-Regelschleife zur Veränderung der Wellenlänge von Sondenlicht in einem Wellenlängenbereich von Ultraviolett bis Infrarot mit einer Auflösung von besser als 0,1 nm iterativ eine punktweise Abtastung der Oberfläche des Prüflings (**40**) durchgeführt wird und
- mit einer Goniometer-Regelschleife zur Veränderung des Einfallswinkels des zum Prüfling (**40**) gelangenden Sondenlichts mit einer Winkelauflösung von besser als 0,002 Grad, wobei der Einfallswinkel vornehmlich im Bereich des Brewsterwinkels verstellt und derjenige Einfallswinkel hochgenau bestimmt wird, bei dem das vom Prüfling (**40**) reflektierte, mit hoher Empfindlichkeit detektierte Licht sein Intensitätsminimum aufweist,
- aus dem absoluten Wert eines solchen Intensitätsminimums unter Bezugnahme auf eine als Referenz gemessene Intensität des zum Prüfling (**40**) gelangten Sondenlichts unmittelbar der Wert der Reflektivität ermittelt wird und
- aus dem ermittelten Einfallswinkel und der ermittelten Reflektivität in diesem Winkel über deren lichttheoretischen Zusammenhang mit dem Real- und Imaginärteil der dielektrischen Funktion ϵ der Brechungsindex n und der Extinktionskoeffizient k als optische Konstanten für die spezifischen Stoffeigenschaften des Prüflings (**40**) an der Abtaststelle analytisch bestimmt werden, wobei von im Prüfling (**40**) auftretenden Störstellen verursachte Änderungen der optischen Konstanten mit hoher Empfindlichkeit und Auflösung energetisch nachweisbar sind.

2. Spektroskopische Untersuchungsmethode nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Prüfling

(40) ein Halbleiter verwendet wird.

3. Spektroskopische Untersuchungsmethode nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsrichtung des einfallenden Sondenlichts bezüglich der Einfallsebene geprüft und präzise nachgestellt wird.

4. Spektroskopische Untersuchungsmethode nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsrichtung des Sondenlichts bezüglich der Einfallsebene um kleine Beträge gegenüber der Polarisationsrichtung bei dem Einfallswinkel, bei dem das vom Prüfling (40) reflektierte, mit hoher Empfindlichkeit detektierte Licht sein Intensitätsminimum aufweist, variiert wird.

5. Spektroskopische Untersuchungsmethode nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass das zum Prüfling (40) gelangende Sondenlicht gepulst wird.

6. Spektroskopische Untersuchungsmethode nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Prüfling (40) in zwei Richtungen, senkrecht zur Normalen und zueinander, verschiebbar angeordnet wird.

7. Spektroskopische Untersuchungsmethode nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Prüfling (40) unterschiedlich temperierbar ist.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

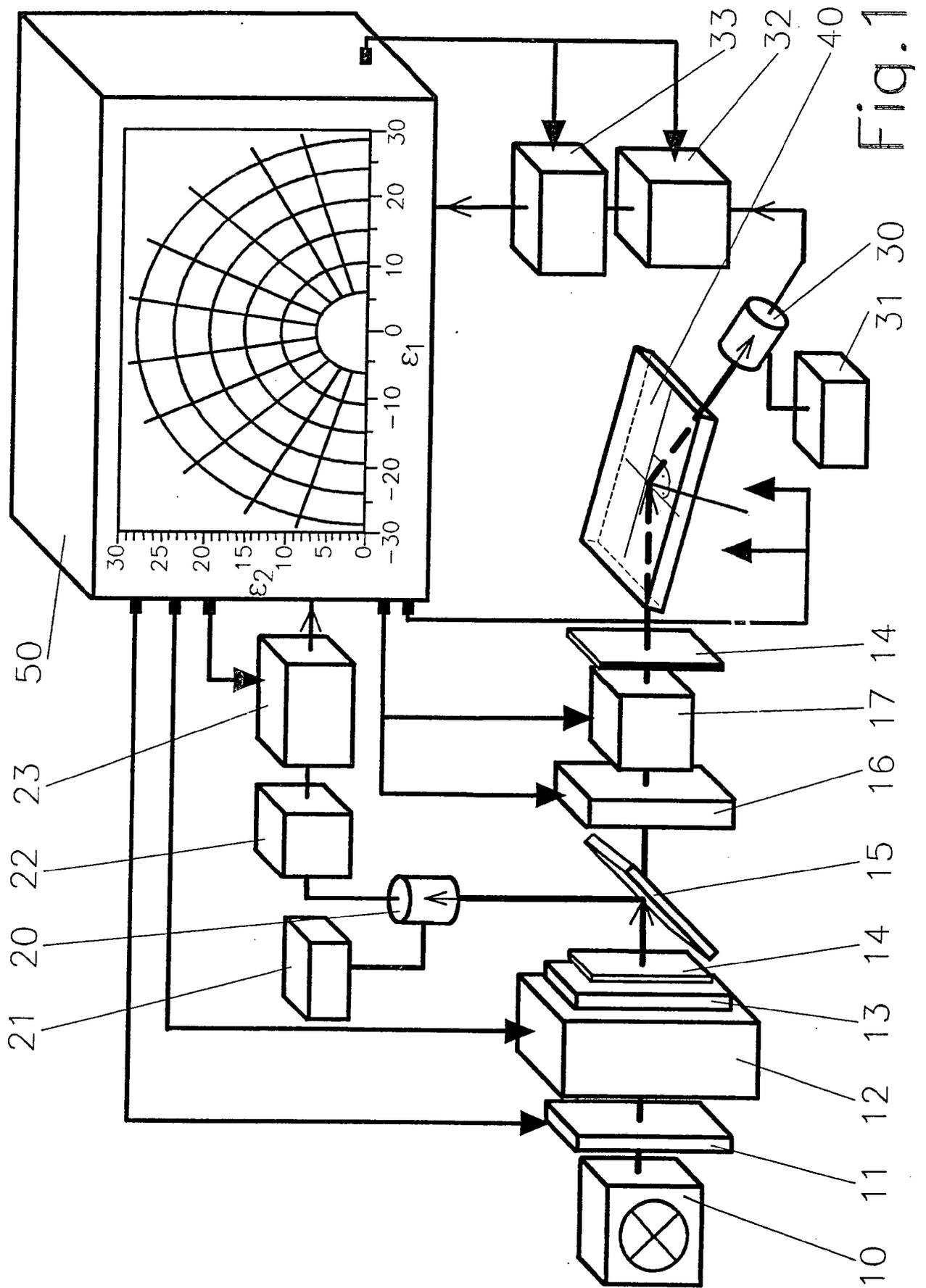


Fig. 1

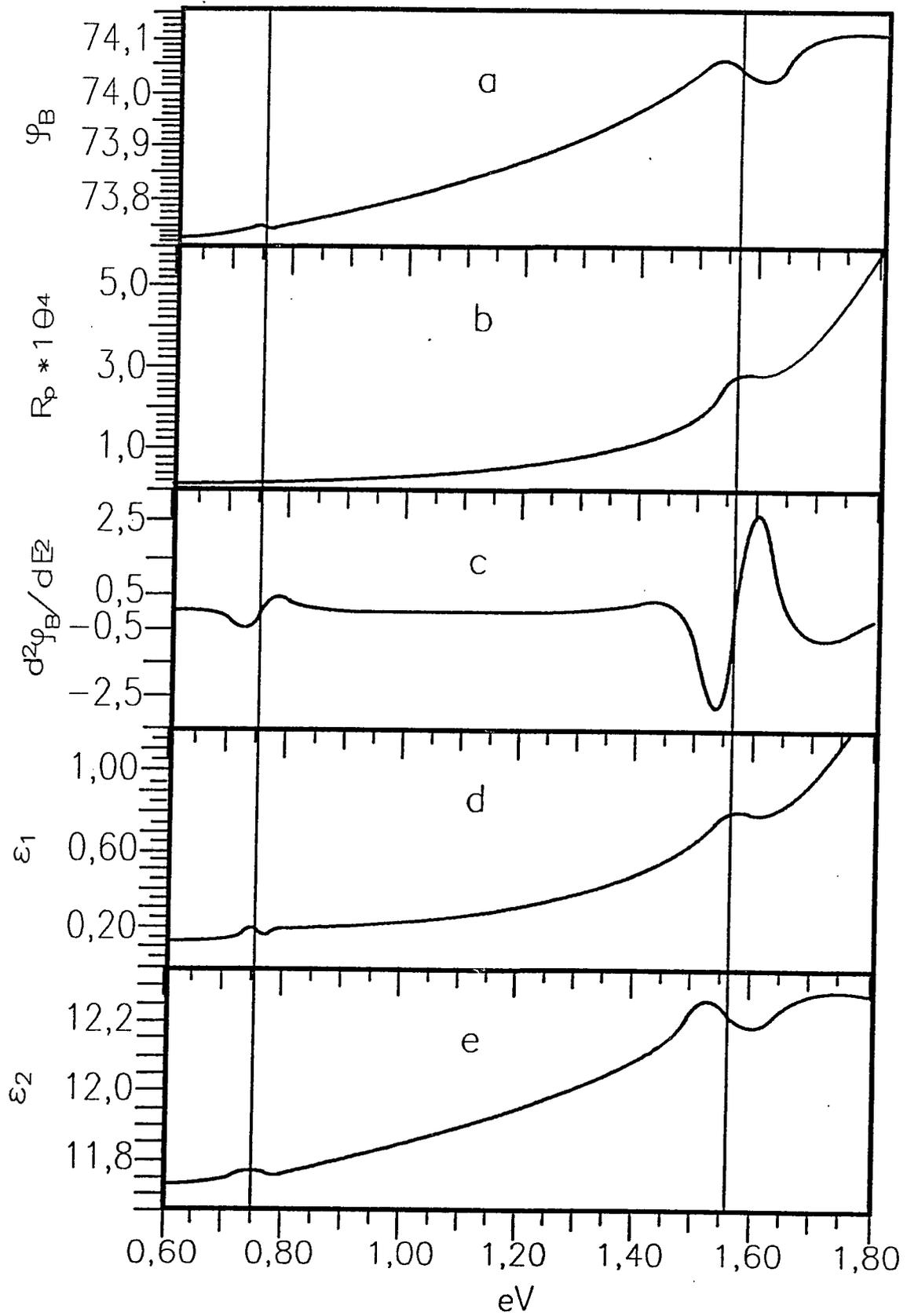


Fig.2

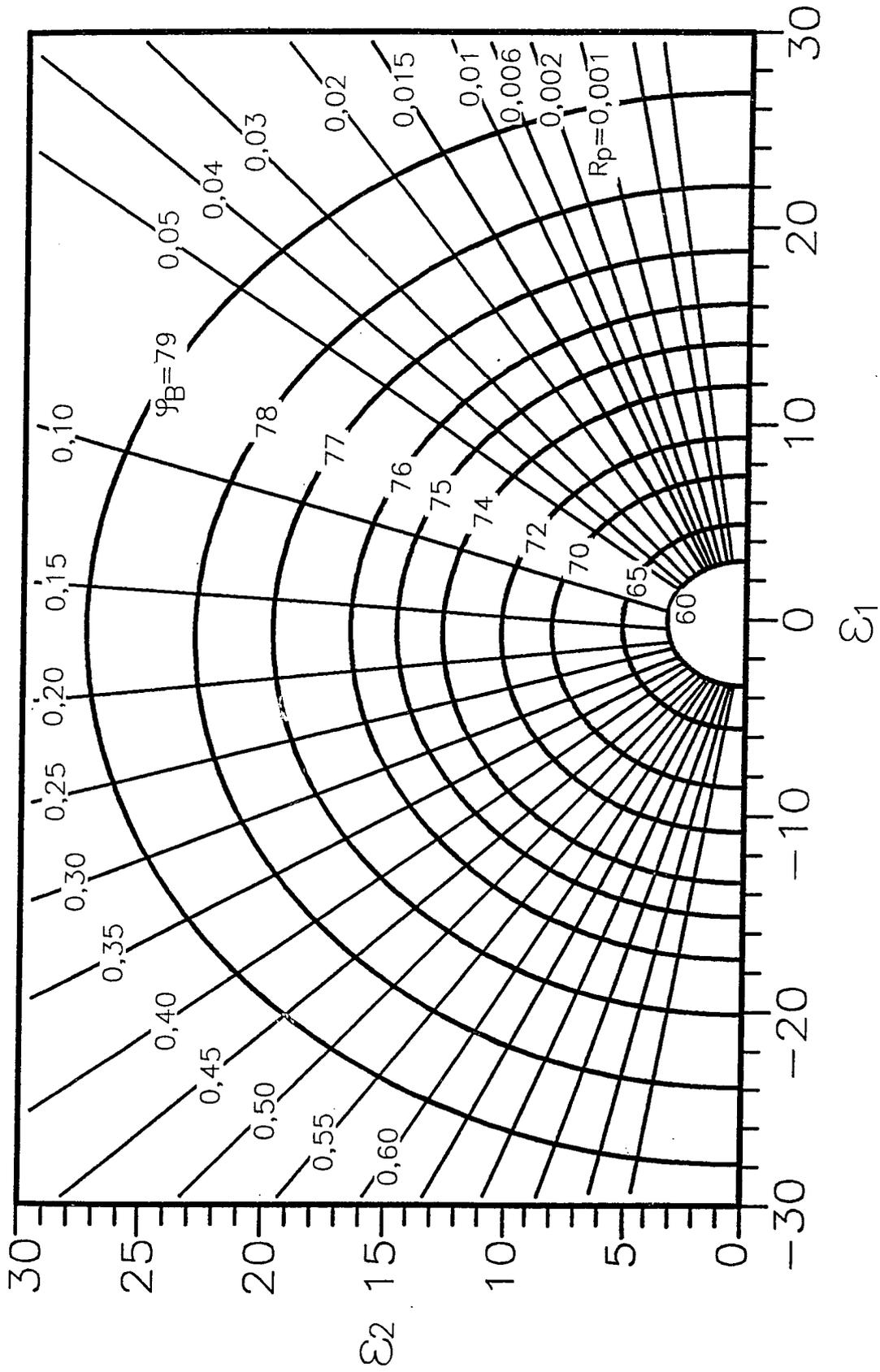


Fig.3

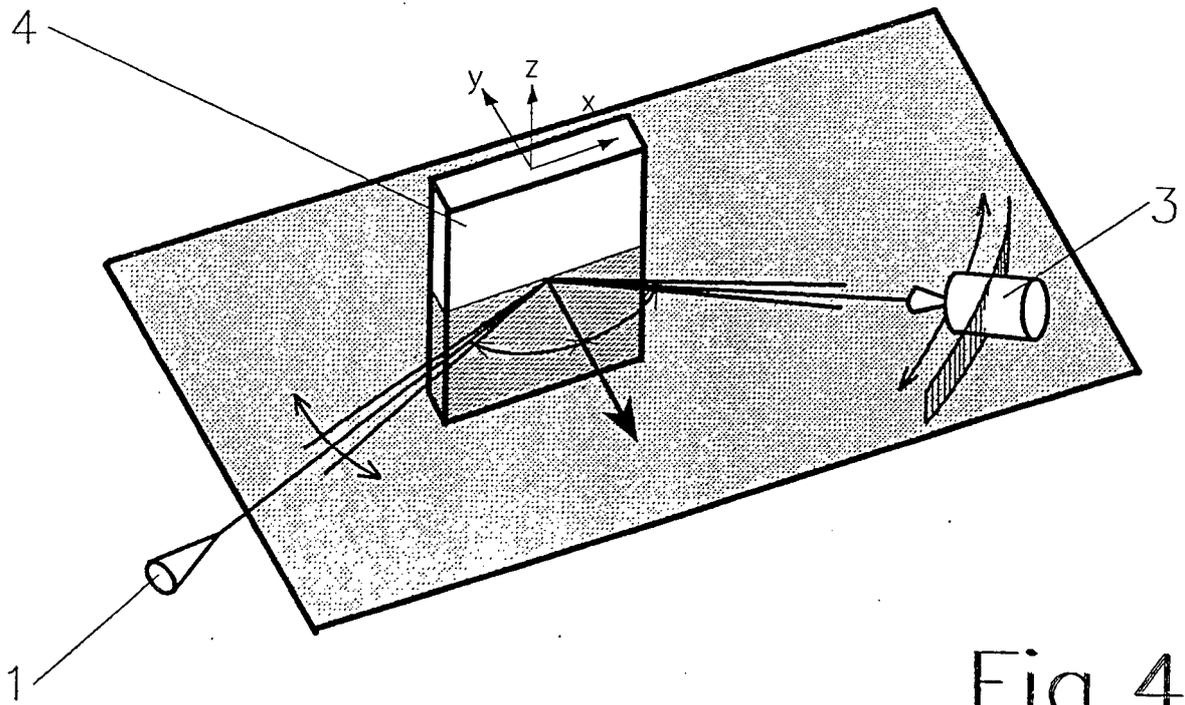


Fig.4

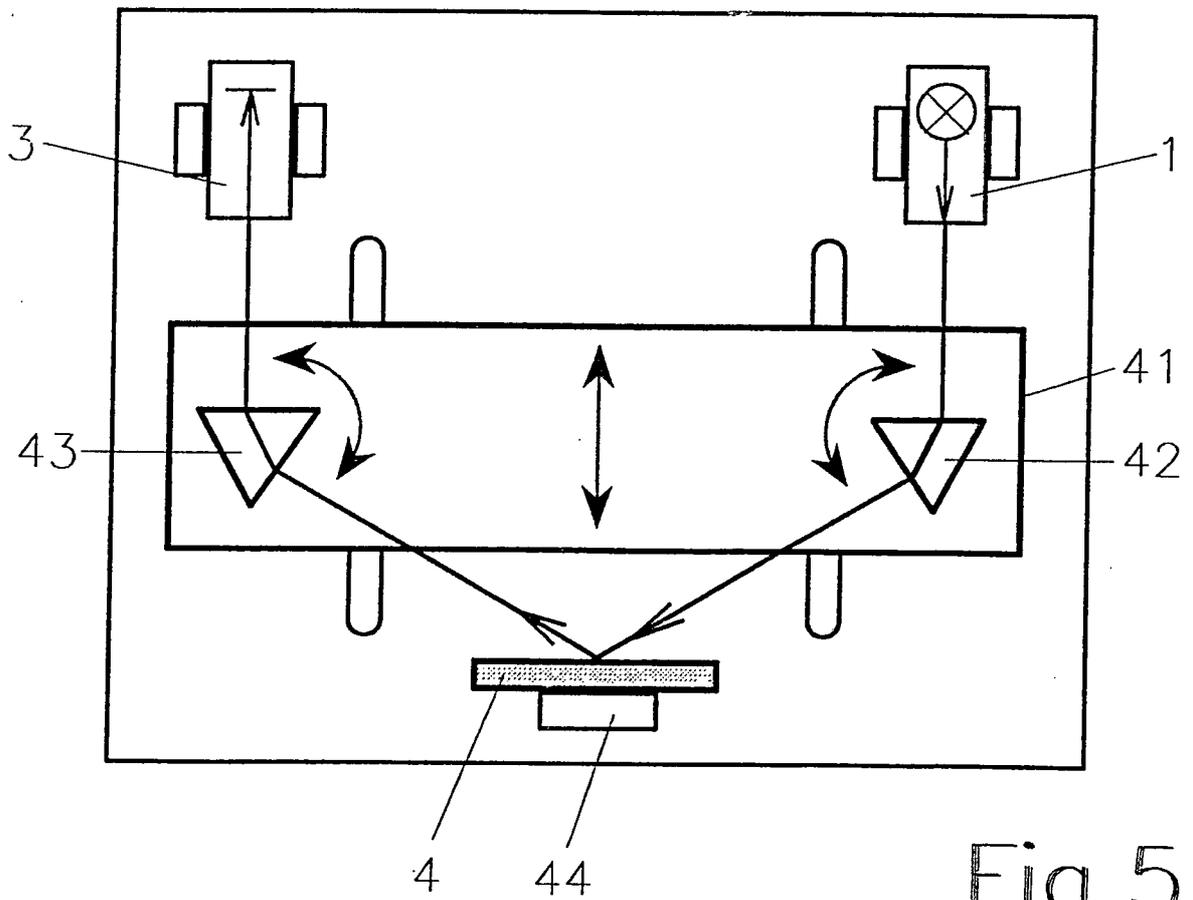


Fig.5