



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 102 55 098 A1** 2004.06.03

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **102 55 098.0**  
(22) Anmeldetag: **26.11.2002**  
(43) Offenlegungstag: **03.06.2004**

(51) Int Cl.7: **H01L 21/66**  
**H01L 23/544, H01L 21/324**

(71) Anmelder:  
**Mattson Thermal Products GmbH, 89160  
Dornstadt, DE**

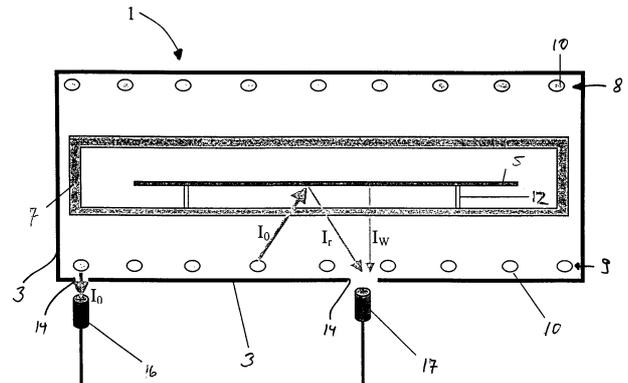
(72) Erfinder:  
**Merkl, Christoph, 89134 Blaustein, DE; Hauf,  
Markus, 89335 Ichenhausen, DE; Bremensdorfer,  
Rolf, Dr., 89233 Neu-Ulm, DE**

(74) Vertreter:  
**WAGNER & GEYER Partnerschaft Patent- und  
Rechtsanwälte, 80538 München**

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Herstellen eines Kalibrationswafers**

(57) Zusammenfassung: Um einen Kalibrationswafer vorzusehen, der auf einfache und kostengünstige Art und Weise eine vorbestimmte optische Eigenschaft, insbesondere eine vorbestimmte Emissivität, aufweist, die an die Emissivität tatsächlich zu behandelnder Wafer angepasst ist und bei denen das Risiko einer metallischen Kontamination der Anlage nicht besteht, sieht die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Herstellen eines Kalibrationswafers, der wenigstens eine vorbestimmte optische Eigenschaft, insbesondere eine vorbestimmte Emissivität, aufweist, mit folgenden Verfahrensschritten vor: Vorsehen eines Wafers aus einem Halbleitermaterial und Bearbeiten des Volumensmaterials des Wafers zum Einstellen der vorbestimmten optischen Eigenschaft durch eine Dotierung mit Fremdatomen und/oder eine Erzeugung von Gitterdefekten.



## Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Herstellen eines Kalibrationswafers, der wenigstens eine vorbestimmte optische Eigenschaft, insbesondere eine vorbestimmte Emissivität, aufweist.

[0002] Computerchips sowie andere elektronische Bauteile werden auf runden, scheibenförmigen Halbleiterkörpern, sogenannten Wafern gefertigt. Während der Fertigung werden die Wafer unterschiedlichen Arbeitsschritten und Prozessen unterzogen. Bei einigen Prozessen ist es erforderlich, dass die Wafer einem vorgegebenen Temperaturverlauf folgen. Beispielsweise erfolgen Beschichtungsprozesse der Wafer häufig dadurch, dass die Wafer einem vorgegebenen Temperaturverlauf unterzogen werden, während sie sich in einer vorgegebenen Prozessatmosphäre befinden. Auch ist es bekannt, die Wafer in einem Vakuum thermisch zu behandeln, und zwar als Nachbehandlungsprozess zu vorhergegangenen Behandlungsschritten. Beispielsweise kann eine thermische Behandlung Schäden im Kristallgitter des Wafers, die infolge einer Ionenimplantation entstanden sind, ausheilen.

[0003] Für die thermische Behandlung der Wafer werden in letzter Zeit immer häufiger sogenannte RTP-Anlagen (Rapid Thermal Processing), die auch als Schnellheizanlagen bezeichnet werden, eingesetzt. Derartige Anlagen ermöglichen eine rasche thermische Behandlung der Wafer unter vorgegebenen Prozessbedingungen bei Temperaturen bis zu 1200°C. Das Besondere dieser Anlagen liegt aber nicht nur in der hohen Behandlungstemperatur sondern auch darin, dass Heizraten von 200°C/s und mehr erreicht werden können. Aufgrund dieser hohen Heizraten, die einen hohen Durchsatz der RTP-Anlage gewährleisten, besitzen sie einen entscheidenden wirtschaftlichen Vorteil. Ferner sind hohe Heiz- und Kühlraten insbesondere für eine erfolgreiche Behandlung sehr kleiner Strukturen wichtig, da eine Behandlung bei hohen Temperaturen möglich ist, während gleichzeitig das gesamte thermische Budget der thermischen Behandlung gering gehalten werden kann.

[0004] Die schnellen Aufheizraten führen jedoch auch zu einer erheblichen Belastung für den Wafer, wenn dieser nicht über seine gesamte Fläche hinweg homogen behandelt wird. Hierdurch könnten Temperaturunterschiede zwischen unterschiedlichen Bereichen des Wafers auftreten, was zu einem Verbiegen des Wafers oder die Bildung von Kristallfehlern führen kann. Ein Verbiegen bzw. Kristallfehler kann die auf die Wafer aufgebrachten Strukturen oder elektrische Kontakte zerstören und den Wafer somit unbrauchbar machen. Daher ist eine homogene Temperaturverteilung über den Wafer hinweg erforderlich. Um diese zu erreichen, erfolgt während der thermischen Behandlung eine permanente Temperaturmessung zur Kontrolle, Steuerung und Regelung des

Temperaturverlaufs des Wafers. Dabei erfolgt eine Temperaturmessung, insbesondere auch an unterschiedlichen Punkten des Wafers, um Temperaturinhomogenitäten auszugleichen. Eine verlässliche Temperaturmessung ist daher ein Hauptmerkmal einer RTP-Anlage.

[0005] Für die Temperaturmessung hat sich die Pyrometrie als besonders zweckmäßig erwiesen, da sie keinen Kontakt zum Wafer erfordert und darüber hinaus die eigentliche Beheizung des Wafers durch Strahlungsquellen nicht beeinträchtigt. Eine pyrometrische Temperaturmessung in RTP-Anlagen hat jedoch grundsätzliche Probleme aufgrund eines intensiven Strahlungsfeldes innerhalb einer Prozesskammer der RTP-Anlage. Üblicherweise ist das Strahlungsfeld, das in der Regel von Heizlampen ausgeht, so stark, dass sie eine vom Wafer ausgehende und vom Pyrometer zu messende Temperaturstrahlung überlagert. Dieses Problem verstärkt sich bei geringen Wafertemperaturen, da die Wafer bei geringen Temperaturen eine geringe Emissivität besitzen. Durch die geringe Emissivität der Wafer bei niedrigen Temperaturen verschlechtert sich jedoch das Signal-zu-Hintergrundverhältnis noch mehr.

## Stand der Technik

[0006] Aus dem US-Patent 5,154,512 ist ein Verfahren zum Messen einer Wafertemperatur in einer RTP-Anlage bekannt, bei der der Heizstrahlung eine periodische Modulation aufgeprägt wird. Diese Modulation ermöglicht eine Unterscheidung zwischen der von den Heizquellen ausgehenden Heizstrahlung, und der von dem Wafer ausgehenden Heizstrahlung, da die Modulation in der Strahlung des Wafers nicht enthalten ist. Bei dem bekannten Verfahren wird mit einem ersten berührungslosen Messgerät zunächst ein Messsignal, das sich aus der Wafer-Temperaturstrahlung und einem an der Waferoberfläche reflektierten Anteil der Heizstrahlung zusammensetzt, gemessen. Mit einem zweiten berührungslosen Messgerät wird ein Messsignal der Heizstrahlung der Heizvorrichtung aufgenommen. Bei dem bekannten Verfahren wird angenommen, dass die thermische Masse des Wafers so groß ist, dass die Wafertemperatur der aufgeprägten Modulation der Heizstrahlung nicht folgen kann. Somit ist es möglich, die nichtmodulierte, schwache Wafer-Temperaturstrahlung von der viel stärkeren, aber modulierten Heizstrahlung messtechnisch zu trennen. Dann kann aus der Wafer-Temperaturstrahlung die Wafertemperatur bestimmt werden.

[0007] Bei modernen RTP-Anlagen wurde das bekannte Verfahren der Temperaturmessung durch ein mathematisches Modell erweitert und verbessert. Bei diesem Modell werden unterschiedliche Strahlungskomponenten der Anlage, wie beispielsweise das Auftreten von Mehrfachreflektionen und anderem berücksichtigt. Daher beinhaltet das Modell einen Satz bestimmter Parameter, mit denen geometrische so-

wie anlagenspezifische Faktoren erfasst werden. Die in der Messvorrichtung gemessenen Messsignale gehen in dieses Modell ein und mittels der Parameter des Modells kann die Temperatur des Wafers bestimmt werden.

[0008] Dabei erweist sich in den allermeisten Fällen eine Vermessung der Parameter als sehr schwierig oder in der Praxis nicht durchführbar. Daher ist eine Startkalibration der RTP-Anlage notwendig, bei der Werte für die Parameter des Modells mittels eines Rechenalgorithmus ermittelt werden, die möglichst nahe an der Wirklichkeit liegen. Bei der Startkalibration werden mehrere Kalibrationswafer mit mehreren verschiedenen optischen Eigenschaften bei unterschiedlichen Temperaturen vermessen, d.h. es wird die von den jeweiligen Kalibrationswafern ausgehende Temperaturstrahlung gemessen.

[0009] Bei tiefen Temperaturen, insbesondere Temperaturen unter 600°C besitzen Wafer jedoch eine zunehmende Transparenz für die Heizstrahlung, was zu einer starken Absenkung der Emissivität und damit zu einem sehr kleinen Signal-zu-Hintergrundverhältnis führt. In der Praxis werden bei den niedrigen Temperaturen insbesondere metallisch beschichtete Wafer behandelt, die gegenüber üblichen Kalibrationswafern eine viel höhere Emissivität aufweisen. Um eine ordnungsgemäße Kalibration auch bei tiefen Temperaturen sicherzustellen, sind daher spezielle Wafer mit besonderen Eigenschaften notwendig, die eine ähnliche Emissivität besitzen, wie die Wafer, die bei diesen niedrigen Temperaturen behandelt werden.

[0010] Eine Möglichkeit, einen derartigen Kalibrationswafer auszubilden, besteht darin, den Kalibrationswafer mit einer metallischen Schicht zu versehen, und zwar ähnlich zu einem nachfolgend thermisch zu behandelnden Wafer. Dank der metallischen Schicht erreicht man eine Anpassung der Emissivität des Kalibrationswafers an die der nachfolgend zu behandelnden Wafer. Dieses Verfahren besitzt jedoch den Nachteil, dass die metallische Schicht zu einer unerwünschten Kontamination der Anlage führen kann. Darüber hinaus sind derartige metallische Beschichtungen nur in einem eingeschränkten Temperaturbereich stabil und können daher nur eingeschränkt eingesetzt werden. Wenn derartige Wafer während des Kalibrationsprozesses auf höhere Temperaturen erhitzt werden, kann es zu einem Abplatzen der Metallschicht und zu einer erheblichen Kontamination der Anlage führen. Darüber hinaus würde der Kalibrationswafer zerstört werden.

[0011] Für eine gute Kalibration ist es daher wichtig, Kalibrationswafer zur Verfügung zu stellen, welche die für die Praxis relevanten Bereiche der Temperatur und der Emissivität abdecken, d.h. dass sie eine ähnliche Emissivität wie nachfolgend zu behandelnde Wafer bei den jeweiligen eingesetzten Temperaturbereichen aufweisen. Bei hohen Temperaturen werden die Wafer für die Heizstrahlung optisch undurchsichtig, und daher kann die Emissivität bei hohen Tempe-

raturen lediglich über die Reflektivität der Wafer verändert werden, indem beispielsweise eine geeignete Beschichtung gewählt wird. Bei tiefen Temperaturen, wenn der Wafer im Wesentlichen für die Heizstrahlung optisch transparent ist, kann eine Einstellung der Emissivität sowohl über die Reflektivität als auch die Transmissivität erfolgen.

[0012] Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, einen Kalibrationswafer vorzusehen, der auf einfache und kostengünstige Art und Weise eine vorbestimmte optische Eigenschaft, insbesondere eine vorbestimmte Emissivität aufweist, die an die Emissivität tatsächlich zu behandelnder Wafer angepasst ist und bei denen das Risiko einer metallischen Kontamination der Anlage nicht besteht.

[0013] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe gelöst durch ein Verfahren zum Herstellen eines Kalibrationswafers, der wenigstens eine vorbestimmte optische Eigenschaft, insbesondere eine vorbestimmte Emissivität, aufweist, und das Verfahren einen Wafer aus einem Halbleitermaterial vorsieht, sowie ein Bearbeiten des Volumenmaterials des Wafers zum Einstellen der vorbestimmten optischen Eigenschaft durch eine Dotierung mit Fremdatomen und/oder einer Erzeugung von Gitterdefekten. Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht die Herstellung spezieller Kalibrationswafer mit vorbestimmten optischen Eigenschaften. Bei der Herstellung lassen sich durch Manipulation des Volumenmaterials des Wafers die gewünschten optischen Eigenschaften einstellen. Dabei wird insbesondere das Transmissionsverhalten der Wafer bei unterschiedlichen Eigenschaften verändert, was wiederum einen direkten Einfluss auf die Emissivität des Wafers besitzt. Indem beispielsweise ein Wafer dotiert wird, lässt sich das Transmissionsverhalten in gewünschter Weise einstellen, insbesondere kann erreicht werden, dass der Wafer auch bei niedrigen Prozesstemperaturen eine geringe Transmissivität und eine hohe Emissivität aufweist. Durch Manipulation des Volumenmaterials kann auf eine Beschichtung der Kalibrationswafer mit einer metallischen Schicht verzichtet werden, wodurch die damit in Beziehung stehenden Probleme entfallen. Ferner lassen sich die Kalibrationswafer kostengünstig herstellen, da eine aufwendige und teure Beschichtung entfallen kann. Darüber hinaus führt eine Manipulation des Volumenmaterials dazu, dass die Kalibrationswafer hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften, wie z.B. Reflektivität, Transmissivität und Emissivität, über lange Zeit gleich bleiben. Bei beschichteten Wafern kann sich die Schicht, insbesondere eine metallische Schicht durch Oxydation verändern oder es kann aufgrund thermischer Spannungen zwischen der metallischen Schicht und dem darunter liegenden Wafer zu einem teilweisen Ablösen der Schicht kommen. Die bisher bekannten Kalibrationswafer neigten daher dazu, ihre optischen Eigenschaften über die Zeit hinweg zu verändern.

[0014] Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung erfolgt die Dotierung mit Fremdatomen

und/oder die Erzeugung von Gitterdefekten über das Volumenmaterial des Wafers hinweg im Wesentlichen homogen, um gleichmäßige optische Eigenschaften vorzusehen. Bei einer alternativen Ausführungsform erfolgt die Dotierung mit Fremdatomen und/oder die Erzeugung von Gitterdefekten in einem vorbestimmten Bereich, insbesondere einer Schicht des Wafers. Dabei wird vorzugsweise eine Oberflächenschicht des Wafers dotiert, da sich diese am Einfachsten dotieren läßt.

[0015] Vorteilhafterweise erfolgt die Dotierung mit Bor, Phosphor und/oder Arsen als Fremdatome. Ferner erfolgt die Einstellung der optischen Eigenschaften vorzugsweise im Wesentlichen ausschließlich über die Dotierung und/oder die Einstellung der Gitterdefekte, um weitere Arbeitsschritte, welche die Kosten für die Herstellung des Wafers erhöhen würden, zu vermeiden.

[0016] Zum Erreichen gewünschter optischer Eigenschaften wird der Wafer vorzugsweise mit einer Dichte von Fremdatomen dotiert, die zwischen  $10^{16}$  und  $10^{19}$  Fremdatomen pro Kubikzentimeter liegt.

[0017] Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung erfolgt die Einstellung der optischen Eigenschaften wenigstens teilweise über die Wahl der Dicke des Wafers, da sich Wafer mit unterschiedlichen Dicken, welche unterschiedliche Transmissivität und Emissivität besitzen, leicht herstellen lassen. Vorzugsweise wird die Emissivität auf einen Wert zwischen 0,25 und 0,8 eingestellt. Die Reflektivität des Wafers wird vorzugsweise auf einen Wert zwischen 0,2 und 0,8 eingestellt.

[0018] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung werden die Wafer zusätzlich beschichtet, um die gewünschte optische Eigenschaft einzustellen. Über eine Beschichtung läßt sich insbesondere die Reflektivität des Wafers auf einen gewünschten Wert einstellen. Dabei wird der Wafer vorzugsweise mit Kobalt beschichtet.

[0019] Bei einer Kalibration einer RTP-Anlage werden mehrere Kalibrationswafer, vorzugsweise Kalibrationswafer mit jeweils verschiedenen optischen Eigenschaften nacheinander in der Anlage einer simulierten thermischen Behandlung unterzogen. D.h. die Temperatur der Wafer wird entlang einer vorgegebenen Temperatur-Zeitkurve verändert. Während dieser simulierten thermischen Behandlung wird die Waferstrahlung für alle Kalibrationswafer bei allen Temperaturen mit einer ersten berührungslosen Messvorrichtung, bestehend aus einem ersten und zweiten Messgerät bestimmt. Parallel dazu werden die tatsächlichen Wafertemperaturen für alle Kalibrationswafer mit einer zweiten Messvorrichtung gemessen, die in Kontakt mit dem Kalibrationswafer steht. Die zuletzt genannte Messvorrichtung liefert die tatsächliche Wafertemperatur, während die von der ersten berührungslosen Messvorrichtung gelieferten Messsignale in ein mathematisches Modell eingehen. Für die Startkalibration wird der Parametersatz des Modells mit anfänglich willkürlichen Werten belegt, von

denen man aber aus Erfahrung weiß, dass sie in etwa die realen Parameterwerte wiedergeben. Basierend auf diesen Parameterwerten berechnet das Modell aus allen Messsignalen jeweils einen Temperaturwert pro Kalibrationswafer und Haltetemperatur, der jeweils mit dem von der zweiten Messvorrichtung gelieferten korrespondierenden tatsächlichen Wafertemperatur verglichen wird.

[0020] Ausgehend von den Differenzen dieser Wertepaare werden gemäß einem Rechneralgorithmus solange neue Werte für die einzelnen Parameter gesucht, bis die mit diesem neuen Parametersatz und den Messsignalen vom Modell berechneten Temperaturwerten mit ihren korrespondierenden tatsächlichen Temperaturwerten für alle Kalibrationswafer und alle Haltetemperaturen hinreichend übereinstimmen. Die Werte dieses Parametersatzes werden dann für die Parameter des Modells während eines normalen Prozessbetriebs der Anlage, bei der man zu behandelnde Wafer prozessiert, verwendet.

[0021] Wie zuvor erwähnt, ist der Einsatz metallbeschichteter Kalibrationswafer nur bei unteren Temperaturbereichen möglich, die unterhalb von ungefähr  $600^{\circ}\text{C}$  liegen. Bei höheren Temperaturen, insbesondere bei Temperaturen von ungefähr  $1000^{\circ}\text{C}$  bis ungefähr  $1100^{\circ}\text{C}$  platzt die Metallschicht ab, was zu einer Zerstörung des Kalibrationswafers und zu einer Kontamination einer Prozesskammer der RTP-Anlage führt. Daher sind derartige Wafer in hohen Temperaturbereichen nicht zur Kalibration einer RTP-Anlage einsetzbar. Zudem schränken metallbeschichtete Wafer die Atmosphäre ein, in der eine Kalibration erfolgen kann, da die Metalle leicht oxydieren oder reduzieren. Bei den erfindungsgemäßen Wafern kann hingegen der gesamte relevante Temperaturbereich einer RTP-Anlage kalibriert werden. Darüber hinaus sind die Wafer nicht so empfindlich hinsichtlich der Prozessatmosphäre.

[0022] Dieselben Kalibrationswafer können sowohl für eine Kalibration bei niedrigen Temperaturen als auch hohen Temperaturen eingesetzt werden, so dass ein zweiter Satz Kalibrationswafer, wie er bei den metallbeschichteten Kalibrationswafern notwendig wäre, nicht erforderlich ist. Neben dem Effekt, dass derselbe Satz an Kalibrationswafern sowohl für niedrige als auch hohe Temperaturen eingesetzt werden kann, und somit weniger Kalibrationswafer notwendig sind, läßt sich der Kalibrationsvorgang zeitlich erheblich verkürzen, da weniger Kalibrationswafer in die Anlage eingesetzt und vermessen werden müssen.

[0023] Die Erfindung wird nachfolgend anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele der Erfindung näher erläutert. In den Zeichnungen zeigt:

[0024] **Fig. 1** eine schematische Ansicht einer RTP-Anlage;

[0025] **Fig. 2** ein Temperatur-Reflektions-Diagramm, in dem für vier verschiedene Wafer die Messpunkte bei jeweils vier verschiedenen Temperaturen eingetragen sind;

[0026] **Fig. 3** ein Transmissions-Reflektions-Diagramm für verschiedene Wafertypen;

[0027] **Fig. 4** ein Diagramm, das die gemessene und simulierte Abhängigkeit der Transmissivität eines Wafers von der Dotierungsdichte bei einer ausgewählten Messwellenlänge zeigt.

[0028] **Fig. 1** zeigt schematisch den typischen Aufbau einer RTP-Anlage **1**, die auch als Schnellheizanlage bezeichnet wird. Die RTP-Anlage besitzt ein Gehäuse **3**, dessen Innenwände reflektierend ausgebildet sind. Das Gehäuse **3** weist ferner eine nicht dargestellte Eingabe-/Ausgabeöffnung zum Be- und Entladen von Halbleiterwafern **5** auf. Innerhalb des Gehäuses **3** ist eine Prozesskammer **7**, aus einem lichtdurchlässigen Material, wie beispielsweise aus Quarz vorgesehen. Die Prozesskammer **7** besitzt ebenfalls eine nicht dargestellte Eingabe-/Ausgabeöffnung. Die Prozesskammer **7** ist, wie in **Fig. 1** dargestellt, mittig innerhalb des Gehäuses **3** derart angeordnet, dass oberhalb und unterhalb der Prozesskammer **7** Platz für obere bzw. untere Lampenbänke **8, 9** besteht. Die Lampenbänke **8, 9** sind jeweils aus einer Vielzahl von auf einer Linie angeordneten Lampen **10** gebildet. Die Lampen **10** sind vorzugsweise stabförmige Wolfram-Halogenlampen, wobei jedoch auch andere Lampen eingesetzt werden können. Obwohl obere und untere Lampenbanken **8, 9** dargestellt sind, ist es natürlich auch möglich, nur eine Lampenbank, d.h. die obere oder die untere zu verwenden.

[0029] Das Gehäuse **3** sowie die Prozesskammer **7** besitzen nicht dargestellte Zu- und Abflüsse für Prozessgase, um innerhalb der Prozesskammer **7** eine gewünschte Prozessatmosphäre herstellen zu können.

[0030] Innerhalb der Prozesskammer **7** sind Auflageelemente **12** für die Wafer **5** vorgesehen. Die Auflageelemente **12** können beispielsweise stiftförmige Quarzelemente sein, auf denen ein Wafer während einer Behandlung bzw. ein Kalibrationswafer während einer Kalibration der RTP-Anlage aufliegen kann. Die Stützelemente **12** sind aus einem lichtdurchlässigen Material, um Abschattungseffekte durch die Stützelemente **12** zu vermeiden.

[0031] Das Gehäuse **3** besitzt ferner wenigstens zwei Öffnungen **14** zur Bildung von Sichtfenstern für eine Messvorrichtung, bestehend aus zwei berührungslosen Messgeräten **16, 17**. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel sind die Messgeräte **16, 17** zwei Pyrometer. Es können jedoch auch andere Messgeräte, wie beispielsweise eine CCD-Zeile oder andere Geräte zur Messung von Strahlung verwendet werden. Dabei ist das Pyrometer **16** auf wenigstens eine der Lampen **10** der unteren Lampenbank **9** gerichtet, um die hiervon ausgehende Heizstrahlung  $I_0$  zu detektieren. Das zweite Pyrometer ist auf eine Seite des Wafers **5** gerichtet und detektiert von dem Wafer **5** ausgehende Temperaturstrahlung  $I_w$ , sowie gleichzeitig einen vom Wafer **5** reflektierten Teil  $I_r$  der von der unteren Lampenbank **9** ausgehenden Heiz-

strahlung  $I_0$ . Darüber hinaus kann an dem zweiten Pyrometer auch durch den Wafer **5** hindurchgehende Heizstrahlung von der oberen Lampenbank **8** detektiert werden, was in **Fig. 1** jedoch nicht dargestellt ist.

[0032] Die Lampen **10** der oberen und unteren Lampenbank **8, 9** werden moduliert angesteuert, so dass die Heizstrahlung  $I_0$  eine Modulation aufweist. Die Heizstrahlung besteht aus einem Gleichanteil  $I_{ODC}$  und einem Wechselanteil  $I_{OAC}$ . Dementsprechend setzt sich der reflektierte Anteil  $I_r$  der Heizstrahlung  $I_0$  aus einem Gleichanteil  $I_{rDC}$  und einem Wechselanteil  $I_{rAC}$  zusammen. Die Modulation der Heizstrahlung ist derart gewählt, dass sie aufgrund der großen Masse des Wafers **5** und somit dessen thermischer Trägheit keinen Einfluss auf die vom Wafer emittierte Strahlung  $I_w$  besitzt. Die vom Wafer emittierte Strahlung  $I_w$  besitzt daher keinen Wechselanteil. Insgesamt wird vom Pyrometer **9** ein Signal  $I$  detektiert, das sich aus einem Gleichanteil  $I_{DC}$  und einem Wechselanteil  $I_{AC}$  zusammensetzt.

[0033] Durch Vergleich der Gleich- und Wechselanteile  $I_{ODC}$ ,  $I_{OAC}$ ,  $I_{DC}$  und  $I_{AC}$  der vom Pyrometer **8** detektierten Heizstrahlung  $I_0$  und der vom Pyrometer **9** detektierten Strahlung  $I$ , läßt sich die vom Wafer emittierte Strahlung  $I_w$  ermitteln. Diese geht in ein mathematisches Modell ein, das aus den Strahlungsanteilen und einem Satz von Parametern, die mit bestimmten Werten belegt sind, die Temperatur des Wafers **5** berechnet. Mit den Parametern werden spezifische Eigenschaften der RTP-Anlage **1** erfaßt, wie beispielsweise geometrische Faktoren, die durch die Form des Gehäuses **3** bzw. der Kammer **7** bedingt sind, oder andere Eigenschaften, wie beispielsweise das Reflektionsverhalten des Gehäuses **3**, aber auch die Wellenlänge bzw. die Wellenlängenbereiche, bei denen die Pyrometer **16** und **17** arbeiten.

[0034] In der Praxis lassen sich die Meisten dieser Parameter nicht durch eine Messung bestimmen, sondern müssen vor dem eigentlichen Betrieb der RTP-Anlage anhand von Kalibrationsmessungen mit einer anschließenden Anpassung der Parameter mittels eines mathematischen Algorithmus bestimmt werden.

[0035] Dies geschieht in der Regel mit einem Satz von vier Kalibrationswafern mit voneinander verschiedenen optischen Eigenschaften, wie beispielsweise unterschiedlichen Reflektivitäten, Emissivitäten etc. Diese vier Kalibrationswafer werden nacheinander in die Anlage **1** eingesetzt und für bestimmte Zeitspannen auf unterschiedliche Temperaturen gebracht. Dabei wird die jeweilige Temperatur der Kalibrationswafer mit einem Messgerät des Kontaktyps, wie beispielsweise einem Thermoelement gemessen. Dieses Messgerät stellt somit eine Referenztemperatur für die Kalibration zur Verfügung. Gleichzeitig erfolgt eine Messung der Waferstrahlung in der oben beschriebenen Art und Weise mittels der Pyrometer **16, 17**.

[0036] Die Kalibrationswafer und die Temperaturen auf welche sie geheizt werden, sind derart ausge-

wählt, dass die Emissivität bzw. Reflektivität der Wafer bei den Temperaturen innerhalb eines Bereichs liegen, in dem auch nachfolgend zu behandelnde Wafer liegen. D.h. es werden Kalibrationswafer eingesetzt, die eine ähnliche Reflektivität oder Emissivität besitzen, wie nachfolgend zu behandelnde Wafer, und die Kalibrationswafer werden auf Temperaturen erwärmt, auf die auch die nachfolgend zu behandelnden Wafer erwärmt werden. Dies ist notwendig, um die mathematischen Modellparameter vorzugeben, die nachfolgend zu richtigen Temperaturangaben der zu behandelnden Wafer führen. Wenn die Emissivität oder Reflektivität des Kalibrationswafers zu weit von den tatsächlich zu behandelnden Wafern abweicht, kann hinsichtlich der nachfolgend gemessenen Temperaturen keine gesicherte Aussage gemacht werden, da die Voraussagen des mathematischen Modells für diese Parameter nicht überprüft wurde.

[0037] **Fig. 2** zeigt ein Temperatur-Reflektivitäts-Diagramm. Der gestrichelte Bereich **20** kennzeichnet einen Bereich innerhalb des Diagramms, in dem sich zu behandelnde Wafer befinden können. D.h. die Wafer können beispielsweise bei einer Temperatur von 400°C eine Reflektivität von 0,4 besitzen, wie durch den Punkt **21** dargestellt ist. Ein anderer zu behandelnder Wafer könnte beispielsweise bei einer Temperatur von 800°C dieselbe Reflektivität besitzen, wie durch den Punkt **22** dargestellt ist. Um diesen Bereich **20** möglichst breit zu kalibrieren werden vier Kalibrationswafer mit unterschiedlichen Reflektivitäten, wie oben beschrieben wird, vermessen. Beispielsweise wird jeder der Wafer auf vier verschiedene Temperaturen erwärmt, und für eine bestimmte Zeit auf dieser Temperatur gehalten, wobei die tatsächliche Temperaturmessung über ein Temperaturmessgerät des Kontakttyps, wie beispielsweise ein Thermoelement erfolgt. Während des Haltens der Temperatur wird die jeweils von den Wafern ausgehende optische Strahlung gemessen und das Messergebnis wird in das mathematische Modell eingegeben. Bei der Vermessung der vier Kalibrationswafer, deren Messpunkte jeweils in den Bereichen **24**, **25**, **26** und **27** dargestellt sind, ergeben sich somit 16 Meßpunkte innerhalb des Bereichs **20**. Der besseren Übersicht halber wurde eine eventuelle Änderung der Reflektivitäten der Kalibrationswafer in Abhängigkeit von der Temperatur im Diagramm vernachlässigt. Jeder Punkt steht somit für einen Kalibrationswafer einer bestimmten Reflektivität mit einer bestimmten Temperatur.

[0038] Wie erwähnt, werden nunmehr die Pyrometersignale, insbesondere die Pyrometersignale betreffend die vom Wafer emittierte Strahlung in das mathematische Modell eingegeben, das für jeden der 16 Punkte eine Temperatur berechnet. Zu Beginn der Kalibration stimmen diese 16 berechneten Temperaturen in der Regel nicht mit ihren korrespondierenden, vom Temperatur-Messgerät gemessenen Wert überein. Indem man für jede berechnete Temperatur eine Differenz mit der vom Temperatur-Messgerät

gemessenen Temperatur bildet, erhält man 16 Temperaturdifferenzen, die einen Hinweis auf die Güte der eingestellten Parameter des Modells geben.

[0039] Mittels eines mathematischen Algorithmus werden nun die Parameter des Modells verändert, um die 16 Temperaturdifferenzen zu verkleinern. Anschließend werden mit dem neuen Parametersatz unter Hinzunahme der Pyrometersignale **16** neue Temperaturen berechnet. Wieder werden die Temperaturdifferenzen zu den tatsächlich gemessenen Temperaturen ermittelt, um aufgrund dieser Differenz wiederum die Parameter des mathematischen Modells zu verändern. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis ein Parametersatz vorliegt, bei dem die vom Modell anhand der Pyrometersignale berechneten Temperaturen von dem Temperatur-Messgerät gemessenen Temperaturen übereinstimmen. Die RTP-Anlage besitzt nunmehr einen kalibrierten Parametersatz, der innerhalb des Bereichs **20** eine verlässliche Temperaturmessung und Kontrolle mittels der Pyrometer **16**, **17** ermöglicht.

[0040] Gemäß der vorliegenden Erfindung sind die hierbei verwendeten Kalibrationswafer speziell hergestellte Kalibrationswafer mit bestimmten optischen Eigenschaften, wobei die optischen Eigenschaften durch eine Manipulation des Volumenmaterials eingestellt werden. Bei der derzeit bevorzugten Ausführungsform der Erfindung erfolgt die Manipulation der optischen Eigenschaften, insbesondere der Absorption des Volumenmaterials einer Dotierung eines herkömmlichen Halbleiterwafers mit Fremdatomen. Durch die Dotierung lassen sich die optischen Eigenschaften des Wafers, wie beispielsweise die Reflektivität, die Transmissivität und die Emissivität auf gewünschte Werte einstellen.

[0041] In **Fig. 3** ist der Zusammenhang zwischen Reflektivität und Transmissivität in einem Diagramm für standardisierte Kalibrationswafer, mit Kobalt beschichtete Wafer und abgedeckte standardisierte Wafer dargestellt. Die gestrichelten Linien sind Linien konstanter Emissivität, da die Summe aus Emissivität, Reflektivität und Transmissivität stets 1 ergibt. Das Diagramm stellt die Verhältnisse für eine feste Temperatur von 450°C dar.

[0042] Wie in **Fig. 3** zu erkennen ist liegen die Reflektivitäten gewöhnlichen Kalibrationswafer im dargestellten Fall zwischen 0,65 und 0,8. Die zugehörigen Transmissivitäten liegen im Bereich zwischen 0,05 und 0,35.

[0043] Das gestrichelte Dreieck **34** markiert den Bereich in dem üblicherweise zu behandelnde Wafer liegen. Es ist offensichtlich, dass die gewöhnlichen Kalibrationswafer nicht in diesen Bereich fallen und daher für eine Kalibration nicht geeignet sind. Dagegen fallen mit Kobalt beschichtete Wafer sowie abgedeckte Wafer in den Bereich **34** und sind somit zur Kalibration geeignet, bringen jedoch auch die schon genannten Nachteile mit sich. Letztendlich werden bei herkömmlichen Verfahren gewöhnliche Kalibrationswafer immer dadurch in den Bereich **34** gebracht,

dass eine entsprechende Beschichtung aufgebracht wird. Die abgedeckten Wafer decken lediglich einen Randbereich des Bereichs **34** ab.

[0044] Bei der erfindungsgemäßen Herstellung von Kalibrationswafern lassen sich die Transmissionseigenschaften bzw. die Transmissivität durch geeignete Manipulation des Volumenmaterials eines herkömmlichen Halbleiterwafers auf einen gewünschten Wert einstellen. Insbesondere erfolgt dies über eine Dotierung mit Fremdatomen, wie beispielsweise Phosphor, Bor und Arsen, wobei Phosphor und Bor bevorzugt werden.

[0045] In **Fig. 4** ist die Abhängigkeit der Transmissivität eines dotierten Wafers für Infrarotstrahlung von der Dichte dotierter Fremdatome dargestellt, und zwar für Temperaturen kleiner 300°C. Bei einer Dotierungsdichte von  $10^{15}$  Atomen pro  $\text{cm}^3$  beträgt die Transmissivität **1**, d.h. der Wafer ist für Infrarotstrahlung transparent. Wird die Dotierungsdichte erhöht, so fällt die Transmissivität kontinuierlich ab, bis sie bei einer Dotierungsdichte von  $10^{19}$  Atomen pro  $\text{cm}^3$  gegen Null geht, d.h. der Wafer ist für Infrarotstrahlung bei dieser Dotierungsdichte im Wesentlichen undurchsichtig.

[0046] Es ist somit möglich jede gewünschte Transmissivität für den Wafer über die Dotierungsdichte mit Fremdatomen einzustellen. Es kann somit ein Satz Kalibrationswafer bereitgestellt werden, der den in **Fig. 3** gewünschten Bereich **34** im Wesentlichen vollständig abdeckt. Bevorzugt werden Kalibrationswafer mit einer Transmissivität von 0,3, einer Emissivität zwischen 0,25 und 0,8 und einer Reflektivität zwischen 0,2 und 0,8 eingesetzt.

[0047] Die Kalibrationswafer können über ein beliebiges Verfahren dotiert werden. Die Dotierung kann über das Volumenmaterial hinweg homogen ausgeführt sein. Es kann aber auch vorteilhaft sein die Dotierungsdichte im Waferinneren zu variieren oder die Wafer nur gebietsweise zu dotieren. Insbesondere ist es möglich lediglich eine oder mehrere Schichten des Wafers zu dotieren, wobei es am einfachsten ist, eine solche dotierte Schicht an der Waferoberfläche oder direkt unter der Waferoberfläche vorzusehen.

[0048] Wie erwähnt kann die Dotierung auf eine beliebige Art und Weise erfolgen. Bei einer Ausführungsform der Erfindung erfolgt die Dotierung dadurch, dass ein Siliziumwafer aus einer entsprechend angereicherten Silizium-Schmelze dotiert wird. Auch Dotierprofile, die mittels Diffusion des Dotierstoffs in den Wafer hinein hergestellt werden eignen sich zur erfindungsgemäßen Herstellung der Kalibrationswafer. Will man lediglich eine Schicht innerhalb des Wafers dotieren, so ist Ionenimplantation besonders geeignet. Bei der Implantation des Dotierstoffs in den Wafer wird dessen Kristallstruktur beschädigt, was eine gewünschte Beeinflussung der optischen Eigenschaften mit sich führen kann. Die Kristallstruktur kann entweder in dem zerstörten Zustand belassen werden oder durch eine anschließende Temperung ausgeheilt werden, wodurch auch Dotieratome

auf Kristallgitterplätze eingebaut werden und sich somit eine langzeitstabiler Kalibrationswafer ergibt.

[0049] Statt einer Dotierung ist es auch möglich, die optischen Eigenschaften des Wafers durch eine Veränderung der Kristallstruktur, insbesondere das Erzeugen von Gitterdefekten einzustellen. Der Begriff Gitterdefekt soll im folgenden null- bis dreidimensionale Gitterdefekte umfassen. Nulldimensionale Defekte sind z.B. Punktfehler oder Punktdefekte wie Leerstellen (Vacancies), Eigenzwischengitteratome (EZG oder Interstitials) und chemische Fremdatome, die im Wirtsgitter auf Zwischengitter oder Gitterplätzen eingebaut sind. Abhängig davon ob die Defekte durch Wirtsgitteratome oder Fremdatome bedingt sind, spricht man von intrinsischen oder extrinsischen Punktdefekten. Wandern die die Leerstellen verursachenden Wirtsgitteratome an die Oberfläche, so entstehen Schottkydefekte, wandern diese Atome auf Zwischengitterplätze, so spricht man von Frenkeldefekten. Eine Ansammlung (Agglomeration) von Punktfehlern kann zu höherdimensionalen Fehlern führen, wie z.B. Versetzungsringe oder Versetzungslinien (eindimensionale Defekte), Stapelfehler (zweidimensionale Defekte) oder Präzipitate von Fremdatomen (dreidimensionale Defekte)

[0050] Weitere Defekte sind z.B. Korngrenzen (zweidimensional) oder die schon erwähnten dreidimensionalen Präzipitate, (z.B. Sauerstoffpräzipitate in Silizium oder Metallpräzipitate), bzw. die zur Ausbildung von Präzipitaten erforderlichen Nukleationszentren sowie lokale amorphe Bereiche, die z.B. bei Ionenimplantationen entstehen, oder Voids. Unter kristallähnlich soll z.B. der Übergangsbereich von kristalliner zu amorpher Struktur verstanden werden. Als weiterer Defekt sei noch die Ausbildung von F-Zentren (Farbzentren) angeführt, wie sie z.B. in Ionenkristallen vorhanden sind, bei denen sich ein Elektron in einer Halogenlücke in der Nähe benachbarter Kationen aufhält.

[0051] Obwohl die Erfindung anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele der Erfindung beschrieben wurde, ist die Erfindungsgedanke nicht hierauf beschränkt. So können beispielsweise die optischen Eigenschaften des Kalibrationswafers auch dadurch verändert werden, dass man die Dicke des Wafers verändert. Beispielsweise kann ein Satz Kalibrationswafer aus jeweils gleichmäßig homogen dotieren Kalibrationswafern mit unterschiedlichen Dicken gebildet werden. Darüber hinaus lassen sich die zuvor genannten Merkmale der Erfindung in jeder kompatiblen Art und Weise kombinieren und modifizieren. So ist es beispielsweise denkbar, dass die erfindungsgemäßen Kalibrationswafer zusätzlich zu einer Manipulation des Volumenmaterials beschichtet werden, wie beispielsweise mit Kobalt.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen eines Kalibrationswafers, der wenigstens eine vorbestimmte optische

Eigenschaft, insbesondere eine vorbestimmte Emissivität, aufweist, mit folgenden Verfahrensschritten:  
Vorsehen eines Wafers aus einem Halbleitermaterial;  
und  
Bearbeiten des Volumenmaterials des Wafers zum Einstellen der vorbestimmten optischen Eigenschaft durch eine Dotierung mit Fremdatomen und/oder eine Erzeugung von Gitterdefekten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Dotierung mit Fremdatomen und/oder die Erzeugung von Gitterdefekten über das Volumenmaterial des Wafers hinweg im wesentlichen homogen erfolgt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Dotierung mit Fremdatomen und/oder die Erzeugung von Gitterdefekten in einem vorbestimmten Bereich, insbesondere einer Schicht des Wafers, erfolgt.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass eine Oberflächenschicht des Wafers dotiert wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass für die Dotierung mit Bor, Phosphor und/oder Arsen als Fremdatome erfolgt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Einstellung im wesentlichen ausschließlich über die Dotierung und/oder die Einstellung der Gitterdefekte erfolgt.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Wafer mit einer Dichte von Fremdatome dotiert wird, die zwischen  $10^{16}$  und  $10^{19}$  Fremdatomen pro Kubikzentimeter liegt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Einstellung wenigstens teilweise über die Wahl der Dicke des Wafers erfolgt.

9. Verfahren nach einem vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Emissivität auf einen Wert zwischen 0,25 und 0,8 eingestellt wird.

10. Verfahren nach einem vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Reflektivität des Wafers auf einen Wert zwischen 0,2 und 0,8 eingestellt wird.

11. Verfahren nach einem vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Wafer zusätzlich beschichtet wird, um die optische Eigenschaft einzustellen.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Wafer mit Kobalt beschichtet wird.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

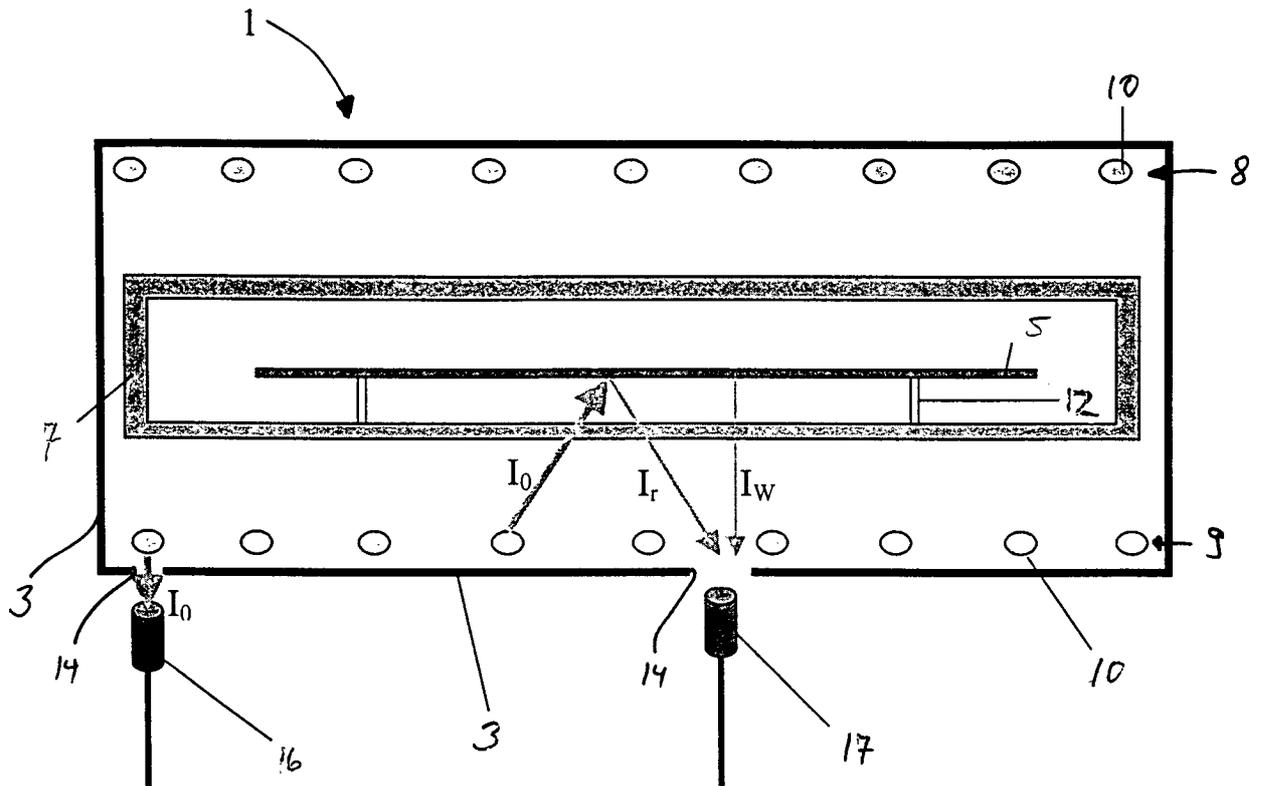


Fig. 1

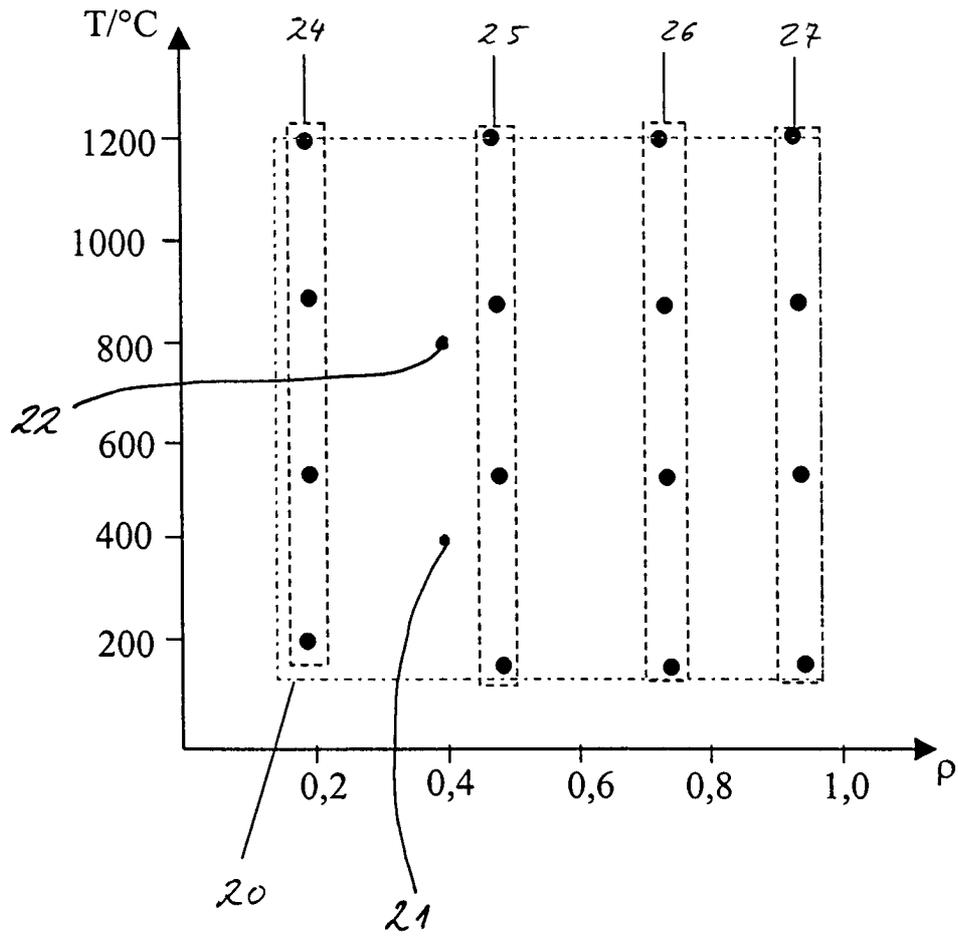


Fig. 2

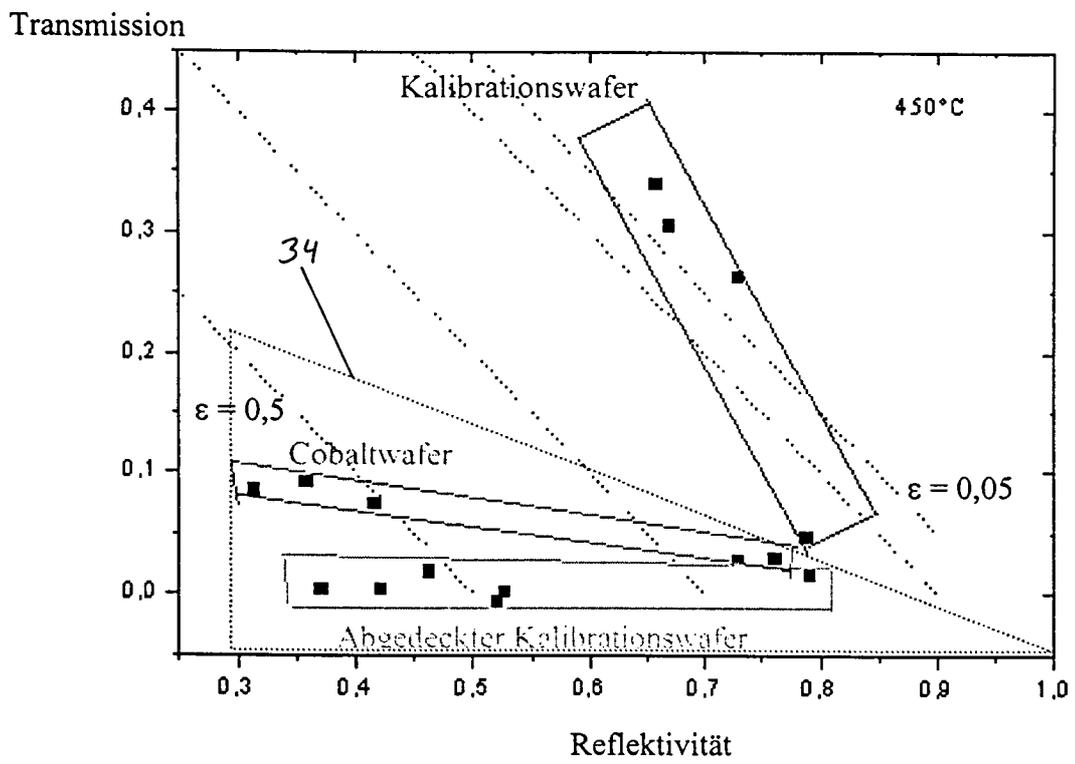


Fig. 3

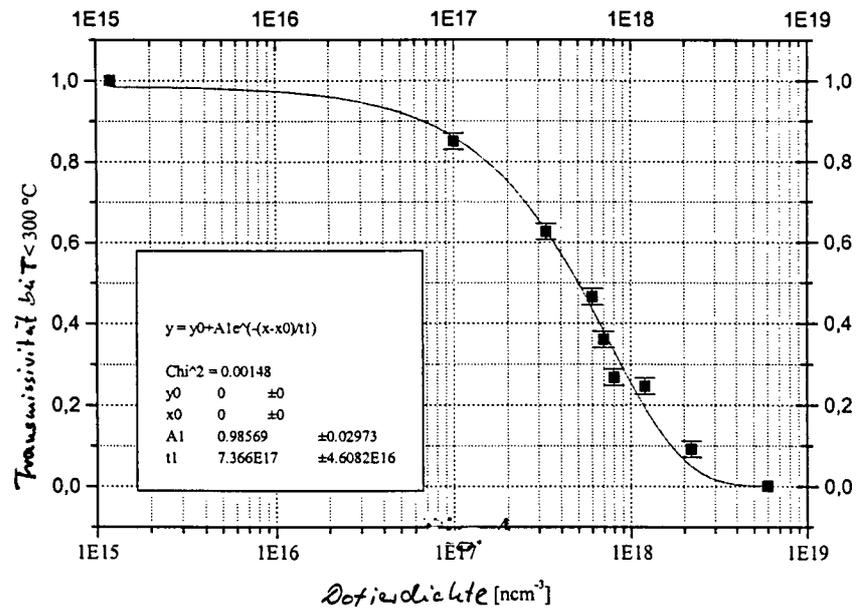


Fig. 4