

Messeinrichtung und Verfahren zur Ermittlung des Verlaufs einer Bondwelle

B e s c h r e i b u n g

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Messeinrichtung und ein Verfahren gemäß den nebengeordneten Patentansprüchen.

In der Halbleiterindustrie werden regelmäßig Substrate unterschiedlicher Größen, Formen und Materialien miteinander verbunden. Den Verbindungsvorgang nennt man Bonden. Das Bonden wird grob in Permanent- und Temporärbonden eingeteilt. Beim Permanentbonds entsteht eine nicht mehr lösbare Verbindung zwischen den beiden Substraten. Diese Permanentverbindung erfolgt durch Interdiffusion von Metallen, durch Kationen-Anionentransport beim anodischen Bonds oder durch die Ausbildung von kovalenten Verbindungen zwischen Oxiden und/oder Halbleitermaterialien beim Fusionsbonds.

Beim Temporärbonds werden vorwiegend sogenannte Bondingadhäsive verwendet. Dabei handelt es sich um Klebstoffe, die durch ein

- 2 -

Beschichtungsverfahren auf die Oberfläche eines oder beider Substrate aufgebracht werden, um als Haftvermittler zwischen den Substraten zu wirken.

Beim Fusionsbonds werden zwei Substrate miteinander in einer vorerst lösbaren Verbindung, einem Prebond gefügt. Dieser Prebond entsteht hauptsächlich auf Grund von van der Waals-Brückenbindungen zwischen den zwei hochreinen, ebenen, möglichst fehler- und partikelfreien Substratoberflächen, welche miteinander in engen Kontakt gebracht sind.

Hybridbonds ist eine Unterart von Fusionsbonds. Das Hybridbond stellt die Verbindung zweier Substratoberflächen, welche jeweils aus einem elektrischen und aus einer dielektrischen Substratregion bestehen, dar. Die entsprechenden korrelierenden Substratregionen werden mittels Fusionsbond (Prebond) miteinander verbunden. Bei der Umwandlung des Prebonds in einen Permanentbond entsteht die permanente elektrische Kontaktierung zwischen den elektrischen Substratregionen der Substrate.

Bei allen Bondingmethoden werden Bonder verwendet, um die miteinander zu verbindenden Substrate zueinander zu fügen. Die zwei zu fügenden Substrate können Vorbehandlungen unterzogen werden, wie Oberflächenaktivierung, Reinigungsschritte, Ausrichtungsschritte bis der eigentliche Prebond-Schritt stattfindet.

Beim Prebond-Schritt werden die Substratoberflächen zueinander an einer sehr kleinen Fläche miteinander in Kontakt gebracht. Mit anderen Worten wird die Fügereaktion initiiert, danach kann die Fügereaktion, also die Ausbildung der Brückenbindungen ohne externe Energiezufuhr ablaufen. Der Fügevorgang geschieht kontinuierlich durch die Ausbreitung einer

- 3 -

Bondwelle. Der theoretische Hintergrund ist in US7479441B2, US8475612B2, US6881596B2, und WO 2014/191033 beschrieben.

Falls die Bondwelle bei zwei identischen, nicht strukturierten Substraten zentrisch initiiert wurde, läuft sie im Idealfall, als konzentrisch wachsende Kreisfront den Substratradius entlang. Strukturierte Substrate, Störstellen, etc. verändern den Lauf der Bondwelle.

Unter nicht optimalen Bedingungen können nicht gebondete Bereiche (engl.: voids) zwischen den beiden Substraten, z.B. durch Gaseinschlüsse, Partikeleinschlüsse etc. entstehen.

Des Weiteren können Fügefehler als Resultat von Ausrichtungsfehlern, (insbesondere aus den Fehlerkomponenten Skalierungsfehler, engl. Run-out-Fehler), Rotationsfehlern, Translationsfehlern, Restfehlern, Temperaturkompensationsfehlern, entstehen. Es können nicht entdeckte bzw. nicht kritische Fehler der Einzelsubstrate oder insbesondere in Dünnschichttechnologie hergestellten funktionalen Einheiten in einer Fehlerfortpflanzung sich addieren und erst nach dem Prebondvorgang detektierbar und quantifizierbar sein.

Obwohl die Substrate durch Ausrichtungsanlagen sehr genau zueinander ausgerichtet werden können, kann es während des Bondvorgangs selbst zu Verzerrungen der Substrate kommen. Durch die so entstehenden Verzerrungen werden die funktionalen Einheiten nicht notwendigerweise an allen Positionen korrekt zueinander ausgerichtet sein. Die Ausrichtungsungenauigkeit an einem bestimmten Punkt am Substrat kann ein Resultat einer Verzerrung, eines Skalierungsfehlers, eines Linsenfehlers (Vergrößerungs- bzw. Verkleinerungsfehlers) etc. sein.

- 4 -

In der Halbleiterindustrie werden alle Themenbereiche, die sich mit derartigen Problemen befassen unter dem Begriff „Overlay“ subsumiert. Eine entsprechende Einführung zu diesem Thema findet man beispielsweise in: Mack, Chris. Fundamental Principles of Optical Lithography - The Science of Microfabrication. WILEY, 2007, Reprint 2012.

Jede funktionale Einheit wird vor dem eigentlichen Herstellprozess im Computer entworfen. Beispielsweise werden Leiterbahnen, Mikrochips, MEMS, oder jede andere mit Hilfe der Mikrosystemtechnik herstellbare Struktur, in einem CAD (engl.: computer aided design) Programm entworfen. Während der Herstellung der funktionalen Einheiten zeigt sich allerdings, dass es immer eine Abweichung zwischen den idealen, am Computer konstruierten, und den realen, im Reinraum produzierten, funktionalen Einheiten gibt. Die Unterschiede sind vorwiegend auf Limitierungen der Hardware, also ingenieurstechnischen Probleme, sehr oft aber auf physikalischen Grenzen, zurückzuführen.

So ist die Auflösungsgenauigkeit einer Struktur, die durch einen photolithographischen Prozess hergestellt wird, durch die Größe der Aperturen der Photomaske und die Wellenlänge des verwendeten Lichts (elektromagnetische Strahlung) begrenzt. Maskenverzerrungen werden direkt in den Photoresist und somit in die hergestellten Strukturen übertragen. Bewegungsvorrichtungen wie Führungen mit den daran gekoppelten Antriebssystemen können binnen einer vorgegebenen Toleranz reproduzierbare Positionen anfahren, etc. Daher verwundert es nicht, dass die funktionalen Einheiten eines Substrats nicht exakt den am Computer konstruierten Strukturen gleichen können. Alle Substrate besitzen daher bereits vor dem Bondprozess eine nicht vernachlässigbare Abweichung vom Idealzustand.

- 5 -

Vergleicht man nun die Positionen und/oder Formen zweier gegenüberliegender funktionaler Einheiten zweier Substrate unter der Annahme, dass keines der beiden Substrate durch einen Verbindungsvorgang verzerrt wird, so stellt man fest, dass im Allgemeinen bereits eine nicht perfekte Deckung der funktionalen Einheiten vorliegt, da diese durch die oben beschriebenen Fehler vom idealen ComputermodeLL abweichen. Die häufigsten Fehler werden dargestellt in https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AOverlay_-_typical_model_terms_DE.svg, 24.05.2013 und Mack, Chris. Fundamental Principles of Optical Lithography - The Science of Microfabrication. Chichester: WILEY, p. 312, 2007, Reprint 2012. Gemäß den Abbildungen kann man grob zwischen globalen und lokalen bzw. symmetrischen und asymmetrischen Overlayfehlern unterscheiden. Ein globaler Overlayfehler ist homogen, daher unabhängig vom Ort. Er erzeugt die gleiche Abweichung zwischen zwei gegenüberliegenden funktionalen Einheiten unabhängig von der Position. Die klassischen globalen Overlayfehler sind die Fehler I. und II., welche durch eine Translation bzw. Rotation der beiden Substrate zueinander entstehen. Die Translation bzw. Rotation der beiden Substrate erzeugt einen dementsprechenden translatorischen bzw. rotatorischen Fehler für alle, jeweils gegenüberliegenden, funktionalen Einheiten auf den Substraten. Ein lokaler Overlayfehler entsteht ortsabhängig, vorwiegend durch Elastizitäts- und/oder Plastizitätsprobleme, im vorliegenden Fall vor allem hervorgerufen durch die sich kontinuierlich ausbreitende Bondwelle. Von den dargestellten Overlayfehlern werden vor allem die Fehler III. und IV. als „run-out“ Fehler bezeichnet. Dieser Fehler entsteht vor allem durch eine Verzerrung mindestens eines Substrats während eines Bondvorgangs. Durch die Verzerrung mindestens eines Substrats werden auch die funktionalen Einheiten des ersten Substrats in Bezug auf die funktionalen Einheiten des zweiten Substrats verzerrt. Die Fehler I. und II. können allerdings ebenfalls durch einen Bondprozess entstehen, werden allerdings

- 6 -

von den Fehlern III und IV. meistens so stark überlagert, dass sie nur schwer erkennbar bzw. messbar sind.

Im Stand der Technik existiert bereits eine Anlage, mit deren Hilfe man lokale Verzerrungen zumindest teilweise reduzieren kann. Es handelt sich dabei um eine lokale Entzerrung durch die Verwendung aktiver Steuerelemente (EP2656378B1).

Im Stand der Technik existieren bereits weitere Lösungsansätze zur Korrektur von „run-out“-Fehlern. Die US20120077329A1 beschreibt eine Methode, um eine gewünschte Ausrichtungsgenauigkeit zwischen den funktionalen Einheiten zweier Substrate während und nach dem Bonden zu erhalten.

Die entstehenden „run-out“ Fehler werden in den meisten Fällen radialsymmetrisch um die Kontaktstelle stärker, nehmen daher von der Kontaktstelle zum Umfang zu. In den meisten Fällen handelt es sich um eine linear zunehmende Verstärkung der „run-out“ Fehler. Unter speziellen Bedingungen können die „run-out“ Fehler auch nichtlinear zunehmen.

Unter besonders guten Bedingungen können die „run-out“ Fehler nicht nur durch entsprechende Messgeräte (EP2463892B1) ermittelt, sondern auch durch mathematische Funktionen beschrieben, zumindest angenähert werden. Da die Overlay-Fehler Translationen und/oder Rotationen und/oder Skalierungen zwischen wohldefinierten Punkten darstellen, werden sie mit Vorzug durch Vektorfunktionen beschrieben. Im Allgemeinen handelt es sich bei dieser Vektorfunktion um eine Funktion $f: R^2 \rightarrow R^2$, daher um eine Abbildungsvorschrift, die den zweidimensionalen Definitionsbereich der Ortskoordinaten auf den zweidimensionalen Wertebereich von „run-out“ Vektoren abbildet. Obwohl noch keine exakte mathematische Analyse der

- 7 -

entsprechenden Vektorfelder vorgenommen werden konnte, werden Annahmen bezüglich der Funktionseigenschaften getätigt. Die Vektorfunktionen sind mit großer Wahrscheinlichkeit mindestens C^n mit $n \geq 1$, Funktionen, daher mindestens einmal stetig differenzierbar. Da die „run-out“ Fehler vom Kontaktierungspunkt zum Rand hin zunehmen, wird die Divergenz der Vektorfunktion wahrscheinlich von Null verschieden sein. Bei dem Vektorfeld handelt es sich daher mit großer Wahrscheinlichkeit um ein Quellenfeld.

Viele Fehler wie Gaseinschlüsse oder Skalierungsfehler sind vor allem auf den Prebond-Schritt, insbesondere auf den Verlauf der Bondwelle bzw. die Beschaffenheit und/oder Ausbildung und/oder Funktionalität des jeweiligen Probenhalters (engl.: chuck) zurückzuführen. Im Stand der Technik sind Verfahren bekannt, welche eine quantitative Aussage über den Verlauf der Bondwelle liefern.

Die am häufigsten eingesetzte Methode ist die Beobachtung der Verlauf der Bondwelle mit optischen Mitteln, insbesondere Kamerasystemen, speziell mit einem Durchlichtverfahren insbesondere im infraroten Spektrum, wobei die Substrate eine für die Beobachtung der Bondwelle ausreichende Transparenz aufweisen müssen. Obwohl diese Methode gängige Praxis ist, hat sie Nachteile. Nicht alle Substrate sind für Durchlichtverfahren geeignet, insbesondere Metallisierungen hindern die Beobachtbarkeit des Bondinterface, welche beim Verbinden der beiden zu fügenden Substratoberflächen entsteht. Weiterhin können Dotierungen bei Halbleitersubstraten die Transmittanz der elektromagnetischen Strahlung beeinflussen. Darüber hinaus stellt ein Durchlichtverfahren spezielle Anforderungen an alle Probenhalter, da sie für die Strahlung ebenfalls durchlässig sein sollen, was auch Probleme bei der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse verursachen kann.

- 8 -

Alle bisher bekannten Techniken, welche den Verlauf der Bondwelle messen, beobachten den Prebondvorgang direkt durch die Substrate bzw. vermessen die Wirkung der Anziehungskraft, bei der die Substrate gefügt werden. Es ist bisweilen kein direktes, kommerziell verfügbares Messverfahren bzw. keine Messvorrichtung vorhanden, welche den Verlauf der Bondwelle direkt im Bondinterface bei allen Substraten unabhängig von deren materiellen Beschaffenheit direkt beobachten kann.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, die Nachteile des Stands der Technik zu beseitigen und insbesondere eine Messeinrichtung und ein Verfahren zur Ermittlung des Verlaufs und/oder insbesondere die Form einer Bondwelle anzugeben, mit dem die vorgenannten Nachteile zumindest überwiegend behoben werden.

Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen der nebengeordneten Patentansprüche gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben. In den Rahmen der Erfindung fallen auch sämtliche Kombinationen aus zumindest zwei der in der Beschreibung, den Ansprüchen und/oder den Zeichnungen angegebenen Merkmale. Bei Wertebereichen sollen auch innerhalb der genannten Grenzen liegende Werte als Grenzwerte offenbart und in beliebiger Kombination beanspruchbar sein.

Die Erfindung betrifft eine Messeinrichtung zur Ermittlung eines Verlaufs einer Bondwelle in einem Spalt zwischen einem ersten Substrat und einem zweiten Substrat, aufweisend:

- mindestens einen an einem Umfangsrand des Spalts platzierbaren Sender zur Aussendung von Signalen in Form elektromagnetischer Wellen entlang einer durch den Spalt verlaufenden Signalstrecke,

- 9 -

- mindestens einen am Umfangsrand platzierbaren Empfänger zum Empfang der vom Sender durch den Spalt gesendeten und vor dem Bonden und/oder beim Bonden veränderbaren Signale der ersten Signalstrecke.

Die Erfindung betrifft, in einer speziellen erfindungsgemäßen Ausführungsform, eine Messeinrichtung zur Ermittlung eines Verlaufs einer Bondwelle in einem Spalt zwischen einem ersten Substrat und einem zweiten Substrat, aufweisend:

- mindestens einen an einem Umfangsrand des Spalts platzierbaren Sender zur Aussendung von Signalen in Form elektromagnetischer Wellen entlang einer durch den Spalt verlaufenden ersten Signalstrecke und mindestens einer weiteren durch den Spalt verlaufenden Signalstrecke,
- mindestens einen am Umfangsrand platzierbaren Empfänger zum Empfang der vom Sender durch den Spalt gesendeten und vor dem Bonden und/oder beim Bonden veränderbaren Signale der ersten Signalstrecke und der weiteren Signalstrecke(n).

Bevorzugt ist vorgesehen, dass die Messeinrichtung in einer Bondvorrichtung, insbesondere in-situ, einsetzbar ist.

Bevorzugt ist weiterhin, dass der Sender und/oder der Empfänger entlang des Umfangsrandes bewegbar ist/sind.

Bevorzugt ist weiterhin, dass der Sender und/oder der Empfänger am Umfangsrand rotierbar, insbesondere nachstellend rotierbar, ist/sind, sodass der Sender und/oder der Empfänger miteinander eine optimale Signalstrecke mit selbst einstellenden Wertmaxima ausbilden können.

- 10 -

Bevorzugt ist weiterhin, dass die Messeinrichtung zur Ermittlung eines Verlaufs einer Bondwelle in einem Spalt zwischen einem ersten Substrat und einem zweiten Substrat

- mindestens einen an einem Umfangsrand des Spalts platzierbaren Sender zur Aussendung von Signalen in Form elektromagnetischer Wellen entlang einer durch den Spalt verlaufenden ersten Signalstrecke,
 - mindestens einen am Umfangsrand platzierbaren Empfänger zum Empfang der vom Sender durch den Spalt gesendeten und vor dem Bonden und/oder beim Bonden veränderbaren Signale der ersten Signalstrecke
- aufweist.

Bevorzugt ist weiterhin, dass die Messeinrichtung mehrere am Umfangsrand verteilte Sender und/oder mehrere am Umfangsrand verteilte, je einem, insbesondere gegenüberliegend angeordneten, Sender zugeordnete Empfänger aufweist, insbesondere mindestens zwei Empfänger je Sender.

Bevorzugt ist weiterhin, dass jeder Sender mehrere Signalstrecken, insbesondere gleichzeitig, aussendet und/oder jeder Empfänger jeweils einer einzigen Signalstrecke zugeordnet ist.

Bevorzugt ist die Messeinrichtung weiterhin mit einer Auswerteinheit zur Bestimmung von Messwerten entlang der Signalstrecken versehen, insbesondere durch Transformation, bevorzugt durch Integraltransformation, vorzugsweise Radon-Transformation, der von dem mindestens einen Empfänger empfangenen Signale.

- 11 -

Bevorzugt ist weiterhin vorgesehen, dass der mindestens eine Empfänger optische Eigenschaften des Signals erfassend ausgebildet ist, insbesondere eine oder mehrere der folgenden optischen Eigenschaften:

- Brechungsindex
- Mode von als transversal-elektromagnetischen Wellen ausgeprägten Signalen
- Laufzeit
- Intensität
- spektrale Kodierung.

Ein weiterer Gegenstand der Erfindung betrifft eine Bondvorrichtung, aufweisend eine Messeinrichtung gemäß einer der vorhergehenden Ausführungsformen.

Bevorzugt ist vorgesehen, dass die Bondvorrichtung Beeinflussungsmittel zur Beeinflussung der Bondwelle in Abhängigkeit des Verlaufs der Bondwelle ausweist.

Ein weiterer Gegenstand der Erfindung betrifft eine Vorrichtung, aufweisend einer Messeinrichtung, welche mit einem erfindungsgemäßen Verfahren den Spalt, also den Abstand zwischen einander nicht berührenden Substratoberflächen, vor und/oder beim Bonden überprüft. Eine Anwendung der Vorrichtung kann insbesondere die Anordnung zweier, mit Adhäsiv beschichteten Substraten vor dem Klebebondvorgang überprüfen und/oder beeinflussen.

Ein weiterer Gegenstand betrifft ein Verfahren zur Ermittlung eines Verlaufs einer Bondwelle in einem Spalt zwischen einem ersten Substrat und einem zweiten Substrat, insbesondere mit einer Messeinrichtung gemäß den

- 12 -

vorhergehenden Ausführungsformen, mit folgenden Schritten, insbesondere folgendem Ablauf:

- Anordnung mindestens eines Senders an einem Umfangsrand des Spalts,
- Anordnung mindestens eines Empfängers am Umfangsrand des Spalts,
- Aussendung von Signalen in Form elektromagnetischer Wellen durch den oder die am Umfangsrand angeordneten Sender entlang mindestens einer durch den Spalt verlaufenden ersten Signalstrecke, und gegebenenfalls weiterer durch den Spalt verlaufender Signalstrecken,
- Empfang der Signale durch den oder die am Umfangsrand angeordneten Empfänger zum Empfang der von dem oder den Sender(n) durch den Spalt gesendeten und vor dem Bonden und/oder beim Bonden veränderbaren Signale der ersten Signalstrecke und gegebenenfalls weiterer Signalstrecke(n).

Ein weiterer Gegenstand betrifft ein Verfahren zum Bonden zweier Substrate, wobei der Verlauf der Bondwelle mit einem Verfahren gemäß der vorhergehenden Ausführungsform ermittelt wird.

Bevorzugt ist vorgesehen, dass die Bondwelle in Abhängigkeit des Verlaufs der Bondwelle beeinflusst wird.

Grundgedanke der vorliegenden Erfindung ist es, elektromagnetische Wellen durch den Spalt zwischen den zu bondenden Substraten zu senden und deren Änderung nach Durchtritt zwischen den Substraten vor dem und/oder beim Prebondvorgang, also beim Verlauf einer Bondwelle, insbesondere während der Änderung der Position der Bondwelle, zu messen. Unter einer Änderung der elektromagnetischen Welle versteht man eine Änderung der Intensität und/oder der Polarisation und/oder der Phase etc. Erfindungsgemäß kann die Messung eine Vielzahl von Signalstrecken der elektromagnetischen Wellen,

- 13 -

also Messstrecken umfassen, wobei aus den unterschiedlichen, sich insbesondere kreuzenden, Signalstrecken im Spalt die verortete Bondwelle aus den Messergebnissen ermittelbar ist. Weiterhin sind hierdurch triggerbare Aktionen, insbesondere zur Beeinflussung der Bondwelle durchführbar. Die triggerbaren Aktionen sind automatisierungsfähig, sodass für jedes zu bondende Substratpaar die optimalen Parameter insbesondere in Echtzeit ermittelbar ist.

Die vorliegende Erfindung könnte anstatt elektromagnetischer Wellen prinzipiell die Veränderung eines Teilchenstrahls, insbesondere eines Ionenstrahls, am wenigsten bevorzugt eines Neutronenstrahls, als Messsignal verwenden.

Die Erfindung beruht auf dem weiteren Gedanken, die verändernden Eigenschaften eines Spaltes zur Ermittlung eines Verlaufs einer Bondwelle zu verwenden.

Ein, insbesondere unabhängiger, bzw. weiterer Aspekt der Erfindung ist es, dass die Bondwelle direkt im Spalt, insbesondere in Echtzeit beobachtet wird. Deswegen ist also die Beschaffenheit oder Transparenz der Substrate für die Beobachtung der Bondwelle nicht relevant.

Ein weiterer, insbesondere eigenständiger, Erfindungsaspekt richtet sich auf eine Bondvorrichtung, insbesondere Fusionsbondvorrichtung, bei welcher eine erfindungsgemäße Messvorrichtung integriert ist. Vereinfachend gesagt verwendet die Fusionsbondvorrichtung die Messwerte der erfindungsgemäßen Messvorrichtung, um den Verlauf der Bondwelle der Substrate zu beeinflussen.

- 14 -

Als Regelschleife beschrieben ist die Fusionsbondvorrichtung das Stellglied, die Messvorrichtung das Rückführungsglied und das bondende Substratpaar der Artikel. Gleichzeitig aber verkörpert der Artikel, also das Substratpaar, bei welchem die Bondwelle durchläuft und beeinflusst werden kann, das Messobjekt, an dem eine Messgröße ermittelt werden kann.

Eine insbesondere eigenständige erfindungsgemäße Vorrichtung ist also insbesondere eine Fusionsbondvorrichtung, welche den Bondvorgang aktiv, geregelt beeinflusst.

Eine weitere insbesondere eigenständige erfindungsgemäße Vorrichtung ist somit die Messvorrichtung mit allen Sendern, und Empfängern, und Datenverarbeitungsmitteln und Anzeigemitteln, welche die Ermittlung der Verlauf der Bondwelle durchführt sowie die Messergebnisse speichert, umformt, auswertet, weiterleitet sowie darstellt.

Ein weiterer, insbesondere unabhängiger erfindungsgemäßer Aspekt beschreibt das Messverfahren zur Ermittlung des Verlaufs der Bondwelle, insbesondere durch seitliche Beobachtung.

Ein weiteres, insbesondere eigenständiges, erfindungsgemäßes Verfahren beschreibt das geregelte Bondverfahren, welches den Verlauf der Bondwelle mit Hilfe des erfindungsgemäßen Messverfahrens beeinflusst und den Fusionsbinder regelt.

Als ein weiterer, insbesondere unabhängiger, erfindungsgemäßer Aspekt wird das Ergebnis des erfindungsgemäßen Bondverfahrens, nämlich der Artikel als der gebondete Substratstapel angesehen.

Der Erfindung liegt dabei die weitere Idee zu Grunde, die Bondwelle als Veränderung einer oder mehrerer optischer Eigenschaft(en) des Spaltes zwischen den beiden Substraten mit mindestens einem Sender und mindestens einem Detektor/Empfänger orts aufgelöst, insbesondere seitlich, zu messen oder aus einem kumulativen Messsignal mittels mathematischer Analyse wie der Radon-Transformation auf den Ort bezogen zu ermitteln, insbesondere zu berechnen, so dass sich daraus eine dynamisch ändernde Positionskarte der Adhäsion ergibt.

Mit anderen Worten liegt der Erfindung insbesondere die Idee zu Grunde, dass das erfindungsgemäße Verfahren die laterale Grenze der meist konvexen Bondfläche misst, indem elektromagnetische Strahlung insbesondere parallel zur Substratebene in den offenen Spalt zwischen den Substraten eingekoppelt wird und die Transmission (bei kleineren Abständen primär durch die Wellenleitungseigenschaften bedingt) zwischen den Substratflächen und deren flächige Transmission durch den ausgedehnten Spalt quantifiziert wird. Durch die seitliche Beobachtung ist es möglich, die gesamte Bondwelle unabhängig von der Transmission des Substratmaterials zu einem beliebigen Zeitpunkt abzufragen. Dies lässt es zu, die Ausbreitung der Bondwelle zu vermessen.

Mit anderen Worten liegt der Erfindung die weitere Idee zu Grunde, dass die Bondwelle über Aktuatoren oder statische Umgebungsbedingungen sehr genau zu steuern bzw. zu regeln ist, indem z.B. mehrere hintereinander angeordnete Vakuumzonen mindestens eines Substrathalters deaktiviert werden können. Die Substrate lösen sich (zumindest teilweise) vom jeweiligen Substrathalter und eine Kontaktierung der beiden Substrate wird initiiert, wobei die Fortpflanzung durch Beeinflussung des Abstands der Substrate zu beschleunigen oder zu verlangsamen ist.

- 16 -

Die Erfindung umfasst somit folgende Lösungsansätze/Vorteile:

- eine direkte in-situ Messung des Prebondvorgangs entlang des Bondinterface der Substrate wird ermöglicht, so dass die Auswertung der Annäherung der Substrate zueinander und/oder des Verlaufs der Bondwelle vor und/oder bevorzugt während dem Fusionsbondprozess, insbesondere innerhalb der Bondvorrichtung, durchführbar ist,
- es wird ermöglicht, die Bondwelle im Bondinterface, insbesondere direkt, zu bestimmen, insbesondere ohne ein Messgerät zwischen die Substrate einzubringen, oder Transparenz der Substrate zu benötigen,
- verortete, insbesondere absolute, dynamische Positionswerte des Verlaufs des Bondinterface, mit großer Präzision und über einen großen Temperaturbereich bei hoher Ortsauflösung, unabhängig vom Substratmaterialien sind ermittelbar,
- Beeinflussung der Bondwelle insbesondere in Echtzeit, um Substrate möglichst verzerrungsfrei bzw. den Bedürfnissen entsprechend verzerrt zueinander bonden zu können.

Die Erfindung erlaubt die in-situ Vermessung der Bondwelle zwischen zwei Substraten. Entsprechend konstruierte Sensoren sind wiederverwertbar, schnell in jede Art von Fusionsbonder einbaubar, auf lange Zeit gesehen kostengünstiger als die Sensoren sowie Vorrichtungen gemäß dem Stand der Technik, weniger arbeitsintensiv und erlauben so eine schnelle und zielgerichtete Prozessoptimierung. Da die Sensoren berührungslos arbeiten und außerhalb der Substrate angeordnet werden, erzeugt die Messung (sowohl die Messinstrumente als auch das Messverfahren selber) keine Partikel,

welche zu einer Kontamination des Bondinterface führen würde. Mit anderen Worten ist das Messprinzip ein nicht taktiler, partikelfreies Prinzip.

Die Transmission entlang der Substratoberflächen (im Spalt) nutzt zumindest teilweise die Wellenleitereigenschaften des Materialverbundes aus. In diesem Fall wird die elektromagnetische Strahlung zwischen den Substratoberflächen, welche einen höheren Brechungsindex als das Medium im Spalt hat, hin- und hergeworfen. Je nachdem welchen komplexwertigen Brechungsindex (Realteil: Brechung, Imaginärteil: Absorption) die Substratoberflächen besitzen, wird die Transmission durch den Spalt beeinflusst. Beim Annähern der Substratoberflächen zueinander, also beim Prebond-Vorgang wird die Zahl der Reflexionen verkehrt proportional größer und die Absorption steigt. Deswegen kann der minimale messbare Abstand zwischen den Substratoberflächen Prinzip bedingt größer 0 nm sein. Solange die Transmission zwischen den Emittlern und Sensoren im Spalt gewährleistet ist und die Ausbreitungsrichtung entlang den Substratoberflächen nicht gestört wird, bedeutet dies lediglich eine Einschränkung der Messgenauigkeit. Der Abstand, bei welchem die Transmission abbricht, ohne dass die Substrate gebondet sind und somit der Spalt auf eine Höhe von 0 nm vollkommen reduziert ist, ist zwar zu bestimmen, ist jedoch auf polierten Flächen üblicherweise nicht von großer Bedeutung.

Der Abstand, bei welchem die Transmission abbricht, und das Fügen der Substratoberflächen beginnt, also die Höhe des Spaltes von 0 nm, liegen aus ingenieurtechnischer Sicht so nah beieinander, dass hier der Fachmann leicht annehmen kann, dass bei einer Annäherung auf bevorzugt unter 10 nm, besonders bevorzugt unter 5 nm, ganz besonders bevorzugt unter 2 nm Abstand im Spalt mit anschließendem Signalabbruch die Substrate an der bestimmten Stelle den endlichen, geringen Abstand nicht beibehalten haben, sondern gebondet sind.

Insbesondere kann die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung, mit einer einstellbaren Strahlungsquelle, so gewählt werden, dass die höchste Transmission im Spalt erzielt wird. Mit anderen Worten kann durch die Einstellbarkeit der Wellenlänge der Strahlungsquelle eine hohe spektrale Absorption vermieden werden. Damit kann die Messvorrichtung platzsparend klein und energieeffizient gebaut werden. Insbesondere liegt die Wellenlänge des Senders, der Quelle, im Wellenlängenbereich zwischen 0,5 nm bis 10.000 nm, bevorzugt zwischen 250 nm bis 5000 nm, besonders bevorzugt zwischen 300 nm und 2000 nm, ganz besonders bevorzugt zwischen 300 nm und 1500 nm. Im optimalen Fall ist die Strahlungsquelle eine insbesondere monochromatische Infrarotquelle.

Im Gegensatz zur internen Totalreflexion, die auftritt, wenn die Welle vom optisch dichteren Medium auf ein optisch dünneres Medium trifft, sind bei einem Wellenleiter (wie der Spalt zwischen den zu bondenden Substratoberflächen generalisiert aufgefasst werden kann) die Reflexionen nur unter sehr flachen Winkeln effizient. Der Winkel zwischen dem Poyntingvektor der elektromagnetischen Strahlung und der Substratoberfläche ist dabei kleiner als 90° , vorzugsweise kleiner als 75° , noch bevorzugter kleiner als 30° , am bevorzugtesten kleiner als 10° , am allerbevorzugtesten kleiner als 1° .

Dieser Winkel der Strahlung ist sowohl abhängig vom Einfallswinkel (eines parallelen Strahles), sowie dem Divergenzwinkel (Aufweitung, bzw. Nichtparallelität). Letztere kann ebenfalls durch die numerische Apertur (abgekürzt als NA) der Einkopplung beschrieben und hängt wiederum mit der Fokussierbarkeit (auf den kleinen Eingangsspalt) zusammen. Abstand $d \approx 4 \cdot \lambda / \pi \cdot (NA^2 / n)$ mit λ =Wellenlänge und n =Brechungsindex, insbesondere in Luft $n=1$.

Der Divergenzwinkel kann als die Ursache für die numerische Apertur aufgefasst werden. Es ist daher möglich, den Divergenzwinkel als Winkelangabe anzugeben.

Die Übertragungsfunktion bei Dimensionen durch zwei parallele Flächen, insbesondere Substratoberflächen, im Abstand der Wellenlänge führt zu Beugungs- und Quantisierungseffekten. Bei Abständen größer 500µm hängt die Übertragungsfunktion sehr wenig von der Spaltbreite ab, danach wird sie quasi-linear kleiner. Bei Abständen kleiner 10 µm und größer 3µm (unter der Annahme der Verwendung einer Strahlung mit der Wellenlänge im Wellenlängenbereich zwischen 300nm und 1500nm) hängt die Transmission nicht mehr vollständig linear vom Abstand ab, weil immer weniger transversale Moden in den Wellenleiter (also in den engen Spalt) passen. Der minimal messbare Abstand der Flächen ist definiert durch den „cut-off“-Abstand bei $d < \frac{\lambda}{1,7}$, bei dem selbst die letzte verbliebene Mode aus dem Spalt gedrängt wird.

Eine optische Übertragungsfunktion beschreibt dabei die Änderung der Eigenschaften der elektromagnetischen Strahlung im Spalt.

Die minimale Größe des äußeren Spalts kann durch entsprechend genaue Fokussierung (besser 10 Mikrometer, bevorzugt besser 5 Mikrometer, besonders bevorzugt besser 2 Mikrometer) und/oder Justage eingestellt werden, und vor der Kontaktierung der Wafer auf definiertem Abstand positioniert werden. Durch einen zu geringen Spalt ist der Anteil der Einkoppelungsverluste höher, sodass die erfindungsgemäßen Messverfahren erschwert möglich sind.

- 20 -

Beugungsverluste und „Verbiegen eines Strahls“ können für die parallel zum Substrat, aber die „Bondfront“ streifenden Strahlen zum Problem werden. Der Strahlverlauf kann dabei verändert werden und die Messgenauigkeit wird dadurch beschränkt.

Zur Ermittlung des Verlaufs der Bondwelle zwischen zwei Substraten wird die Messeinrichtung als Sender bzw. Empfänger (beide sollen unter den Oberbegriff Sensor fallen) in die Vorrichtung, insbesondere in einem geringen Abstand, insbesondere berührungslos zur Außenkante des insbesondere unteren Substrats, in Höhe der zu bondenden unteren Substratoberfläche platziert.

Alternativ können die Sensoren, also Sender und Empfänger, insbesondere in einem geringen Abstand, insbesondere berührungslos zur Außenkante des Substrathalters, bevorzugt des unteren Substrathalters, in Höhe der Ebene der Bondwelle platziert werden.

Alternativ können Sender und/oder Empfänger in einen Substrathalter, insbesondere unteren Substrathalter, eingebaut und entsprechend funktionsintegriert werden. Es werden die Bedingungen der räumlichen Zugänglichkeiten für das Handling der Substrate entsprechend beim Einbau der Sender und Empfänger berücksichtigt. Es können somit kraftschlüssige und/oder stoffschlüssige Verbindungen zwischen dem Sender bzw. Empfänger und dem Substrathalter bestehen.

Im weiteren Verlauf wird die Ausführungsform näher beschrieben, bei welcher Sender und/oder Empfänger am Substratrand angeordnet werden. Dies wird lediglich für die leichtere Lesbarkeit ausgeführt. Die alternativen Anordnungen der Sender und/oder Empfänger zum Substrathalter gelten in Analogie.

Alternativ können der Sender und der Empfänger in der Ebene der Bondwelle zur Außenkante des Substratpaares angeordnet werden.

Erfahrungsgemäß lassen sich die Position, insbesondere die Höhe des gebondeten Substratstapels sowie die Position des Bondinterface nach dem Bonden, gemessen als Höhe insbesondere ab dem unteren Substrathalter ermitteln. Mit der Kenntnis des künftigen Bondinterface kann eine mathematische Ebene der nicht gestarteten Bondwelle errechnet werden. Um die Signalstrecken möglichst lange verwenden zu können, ist es erfindungsgemäß vorteilhaft, Sender und Empfänger auf der Höhe der Ebene der Bondwelle, zur Außenkante des Substratpaares anzuordnen.

In einer ersten Ausführungsform der Messvorrichtung dient die erfindungsgemäße Messvorrichtung als Messaufnehmer, die Parameter der Bondwelle werden lediglich erfasst und nicht für die Beeinflussung des Prebondvorgangs verwendet. Mit anderen Worten besteht in dieser Ausführungsform keine informationstechnische Kopplung zwischen dem Fusionsbonder und der Messeinrichtung.

Die zueinander ausgerichteten Substrate werden zueinander im Prebondvorgang gefügt:

- Die Substrate werden zueinander mit Hilfe von Ausrichtungsmarken ausgerichtet.
- Mindestens ein Substrat wird vorgekrümmt.
- Die Substrate werden einander angenähert, es entsteht ein, insbesondere kontinuierlicher, Spalt zwischen den Substraten.
- Der Prebond wird mit der Bondinitiierung an einem Kontaktpunkt eingeleitet.
- Die Messeinrichtung erfasst die zwischen den Substraten entstehende Bondwelle, welche die optischen Eigenschaften des Spaltes zwischen

- 22 -

den Substraten verändert und damit eine von der Ausbreitung der Bondwelle abhängige optische Eigenschaft der Substratoberflächen und/oder eine von der Bondwelle abhängige optische Eigenschaft des Spaltes bestimmen lässt.

Zur ortsabhängigen Bestimmung des Verlaufs der Bondwelle wird eine zeitabhängige Positionskarte erstellt. Dazu wird mindestens ein optisches und/oder elektromagnetisches Signal eines Senders am Rand des nicht kontaktierten Substratpaares eingekoppelt, also in den Spalt gesendet. Das Signal durchdringt den Spalt entlang einer Messstrecke oder eines Flächensegments und wird an einer dem Sender abgewandten, mit Vorzug genau gegenüberliegenden Seite, von mindestens einem als Detektor ausgebildeten Empfänger aufgefangen und gemessen. Das auf diese Weise durch den Spalt gesendete Signal hat entlang der Signalstrecke oder mehreren Signalstrecken bei Auftreffen der Bondwelle mindestens eine (kumuliert erfasste) Änderung mindestens einer seiner optischen Eigenschaften erfahren.

Durch Aufnahme mehrerer, sich insbesondere kreuzender, Signalstrecken ist die Ermittlung einer, insbesondere sich dynamisch ändernden, Positionskarte bevorzugt möglich.

Erfindungsgemäß denkbar als vom Empfänger zu erfassende Eigenschaften sind insbesondere folgende, einzeln oder in Kombination:

- (Änderung der) Intensität,
- (Änderung der) Polarisierung,
- (Änderung der) Doppelbrechung,
- (Änderung der) Laufzeit,
- (Änderung der) Wellenlänge oder Frequenz, in sichtbaren Wellenlängen auch als Farbänderung detektierbar/genannt,
- (Änderung der) spektralen Kodierung,

- 23 -

- (Änderung des) Brechungsindex,
- (Änderung der) Mode von als transversal-elektromagnetischen Wellen ausgeprägten Signalen
- (Änderung des) Schattenwurfs

Da die von dem Empfänger oder den Empfängern aufgefangenen Signale das Ergebnis der Kumulation aller Signaländerungen entlang der jeweiligen Signalstrecke sind, wird bevorzugt eine mathematische Transformation angewandt, um die Änderung der optischen Eigenschaft des Spalts als Funktion des Ortes zu erhalten. Dafür werden bevorzugt mehrere Messungen mit unterschiedlichen Sender- und/oder Empfängerstellungen entlang des Umfangsrandes des Substratstapels oder der Messeinrichtung aufgenommen, wobei sich insbesondere jede Signalstrecke mit mindestens einer anderen Signalstrecke kreuzt.

Die kumulierten Ausgangssignale werden bevorzugt jeweils als Funktion der Winkelposition des Senders und/oder Detektors aufgezeichnet. Eine bevorzugte mathematische Transformation zur Umrechnung der kumulierten Signale in die Änderung der optischen Signale als Funktion der Position innerhalb des Spalts zur Erstellung einer Positionskarte ist die Radon-Transformation. Durch die Anwendung der Radon-Transformation erhält man die Änderung der optischen Eigenschaft an jedem beliebigen Ort, insbesondere an Kreuzungspunkten von sich kreuzenden Signalstrecken, einer der erfassten Signalstrecken des optischen Pfades als Funktion der Position der Bondwelle.

Da die Änderung der optischen Eigenschaft(en) des Spalts mit der Position der Bondwelle korreliert werden kann, ergibt sich damit eine Möglichkeit der Aufnahme der Positionsverteilung der Bondwelle zwischen den Substraten.

Mit anderen Worten läuft das erfindungsgemäße Verfahren bevorzugt zwischen zwei Substraten in einer Vorrichtung zum Fusionsbünden ab.

Für die Messung der Ausbreitung der Bondwelle sind die Substrate als Messobjekte Teil der Messstrecke. Ohne Substratpaar kann die erfindungsgemäße, insbesondere geregelte, Vorrichtung zum Bünden nicht funktionieren. Ohne Substrate als Messobjekte kann kein erfindungsgemäßes Messverfahren ablaufen.

Im Weiteren werden erfindungsgemäße beispielhafte Ausführungsformen beschrieben, mit welchen die Position der Bondwelle erfindungsgemäß ermittelt werden kann.

Für alle folgenden erfindungsgemäßen beispielhaften Ausführungsformen werden elektromagnetische Signale durch einen Sender an zumindest einer Stelle außerhalb des Umfangsrandes eines ersten Substrats in den Spalt zwischen den beiden Substraten eingekoppelt, die entlang einer Signalstrecke oder bevorzugt flächenmäßig, also mit mehreren Signalstrecken, verlaufen. Entlang der Signalstrecken ändert sich zumindest eine ihrer physikalischen Eigenschaften auf Grund der zu ermittelnden Position bzw. Geschwindigkeit der Bondwelle.

Der Detektor (Empfänger) am Austritt des Signals aus dem Spalt (also am Ende jeder Signalstrecke) erhält daher ein entlang der Messstrecke entweder aufsummiertes (kumuliertes) oder zumindest kontinuierlich verändertes Messsignal. Mathematisch gesehen wird erfindungsgemäß also insbesondere die kumulierte Änderung der aufgenommenen Eigenschaften entlang jeder Signalstrecke durch eine Abbildungsvorschrift in einem Messsignal abgebildet beziehungsweise als Wert erfasst.

- 25 -

Um den erfindungsgemäßen Positionsverlauf der Bondwelle zu bestimmen, werden der Sender und/oder Detektor/Empfänger in einer beispielhaften erfindungsgemäßen Ausführungsform der Messvorrichtung entlang der Außenkontur oder des Umfangsrandes eines Substrats bewegt und mehrere Messsignale mehrerer Signalstrecken ermittelt und diese mit einer mathematischen Transformation auf die lokalen Messsignale umgerechnet. Die lokalen Messsignale sind dann in eindeutiger Weise abhängig von der lokalen Position der Bondwelle.

Die bevorzugte Transformation für die Umrechnung ist die Radon-Transformation. Die mathematischen Zusammenhänge zwischen den ermittelten Messwerten der physikalischen und/oder optischen Eigenschaften und dem Verhalten der Bondwelle werden insbesondere empirisch ermittelt.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung kann an mindestens einem der Substrate eine funktional für die Baugruppen vorgesehene Metallisierung zweckentfremdet als eine zusätzlich, zumindest lokal aufgebrachte Reflexionsschicht verwendet werden, um die optischen Eigenschaften des Spaltes beziehungsweise die Messwerte so wenig wie möglich durch Streuung zu beeinflussen und ein reproduzierbares Ergebnis zu liefern. Mit anderen Worten können die metallisierten Substrate als ebene, reflektierende Metallspiegel, verstanden werden und keine Halbleiterspiegel mit im Vergleich zu Metallspiegel geringerem Reflexionsvermögen.

Die Substrate (die sowohl als Teil einer Messvorrichtung und gleichzeitig als zu bondende Substrate in einer Bondvorrichtung verstanden werden sollen) können rechteckig, rund oder beliebig anders geformt sein. Bevorzugt weisen die Substrate eine kreisrunde Form auf. Bei kreisrunden Substraten beträgt der Durchmesser der Substrate mit Vorzug 1 Zoll, 2 Zoll, 3 Zoll, 4 Zoll, 5 Zoll, 6 Zoll, 8 Zoll, 12 Zoll, 18 Zoll oder mehr als 18 Zoll. Besonders

- 26 -

bevorzugt werden die Substrate in der Halbleiterindustrie verwendet, und die Angaben beziehen sich auf Wafer.

Die Dicke der Substrate hängt von der Anwendung ab. In der Mehrzahl der Fälle ist die Dicke größer als 10 μm , mit Vorzug größer als 100 μm , mit größerem Vorzug größer als 1000 μm , mit allergrößtem Vorzug größer als 2000 μm , mit allergrößtem Vorzug größer als 5000 μm . Im Allgemeinen können die Dicken der beiden Substrate unterschiedlich sein.

Da beim erfindungsgemäßen Messverfahren das Fügen von zwei Substraten bevorzugt direkt im Bondinterface beobachtet wird, können beliebige Werkstoffe mit hoher Oberflächenqualität, unabhängig von deren Transparenz, zueinander gefügt werden. Ob eine permanente Verbindung nach dem Prebond aus den gefügten Substraten entstehen kann, ist für das Messverfahren irrelevant.

Ein erfindungsgemäß gefügtes Substratpaar mit temporärem Fusionsbond kann insbesondere für das Testen der integrierten Schaltungen, für Qualitätskontrolle oder für sonstige Zwecke hergestellt werden. Somit kann das zufällige Berühren oder Verschmutzen der funktionalen Substratoberflächen vermieden werden.

Für die erfindungsgemäßen Verfahren sind insbesondere Brechungsindizes der Substrate bzw. Oberflächenbeschaffenheiten wie Reflexionsvermögen von Bedeutung. Bevorzugt leiten die Substrate die Strahlung des Senders nach Mehrfachreflexionen im Spalt als Transmittanz an den Empfänger in den Bereichen im Idealfall verlustfrei, also 100% weiter. Trifft die Strahlung auf die Bondwelle, kann keine Strahlung im Spalt zum Empfänger gelangen, sodass es zumindest lokal 0% Transmittanz gibt. Im ursprünglichen Zustand der Substrate vor dem Bonden, bei angenäherten Substraten vor der

- 27 -

Kontaktierung wird mindestens 0,01%, bevorzugt mindestens 40%, besonders bevorzugt mindestens 50%, ganz besonders bevorzugt mindestens 65%, im optimalen Fall 99,9%, im Idealfall 100% der Strahlung als Transmittanz gemessen.

Ein Maß für die Glattheit der Oberfläche kann mit der mittleren Rauheit quantifiziert werden. Die mittlere Rauheit, insbesondere der Mittenrauwert, ist kleiner als 10000 nm, mit Vorzug kleiner als 100 nm, mit größerem Vorzug kleiner als 10 nm, mit größtem Vorzug kleiner als 1 nm, mit allergrößtem Vorzug kleiner als 0.1 nm.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können Substrate bestehend aus

- Metallen, (auch oxidiert oder teilweise oxidiert)
- Halbleiterwerkstoffen, (auch oxidiert oder teils oxidiert)
- keramischen Werkstoffen,
- Stoffgemengen oder Stoffgemische mit amorphen Aufbau,
- Polymere (Elastomere, Thermoplaste, etc.)
- organischen Werkstoffen (Graphit, Diamant, Graphen, etc.)
- strukturierte und/oder nicht strukturierte Substrate,

in allen möglichen Kombinationen zueinander gefügt werden.

Die Orientierung der Kristallgitter hat einen Einfluss auf den Brechungsindex der jeweiligen Oberfläche und ist daher von gewisser Bedeutung, welche für den Fachmann bekannt ist.

Die erfindungsgemäß relevanten Teile der Messvorrichtung sind die Sender, der Spalt zwischen den beiden zumindest teilweise reflektierenden Substratoberflächen und die Detektoren/Empfänger. Die Ausnutzung der optischen Eigenschaften eines Spalts des zu verbondenden Stapels erlaubt die einmalige und völlig neuartige Vermessung der Bondwelle während des eigentlichen Bondvorgangs. Die erfindungsgemäße Messvorrichtung muss

- 28 -

zumindest eine erfindungsgemäß nötige positionsabhängige optische Eigenschaft erfassen.

Die Auswertung der Messsignale erfolgt bevorzugt wie folgt:

In einer ersten erfindungsgemäßen Ausführungsform verwendet man die optische Eigenschaft der Intensitätsänderung, um die lokale, zeitlich aufgelöste Position der Bondwelle im Spalt zu erhalten. Unter Intensitätsänderung versteht man den Vorgang der Schwächung eines einfallenden Strahls wegen Streuung und verlustbehaftete Mehrfachreflexionen sowie Blockaden bzw. Hindernisse im Strahlengang, also eine Filterung.

Der optische Spalt muss daher zumindest eine von dem Verlauf der Bondwelle abhängige optisch wirksame Spaltbreite und/oder Spalthöhe aufweisen, um den gewünschten Effekt der Intensitätsänderung hervorzurufen.

Der im Spalt verlaufende Strahl nutzt mit Vorzug das physikalische Phänomen der Reflexion, um sich entlang der Signalstrecke bis zum Ende des Spalts durchzuarbeiten. Das am Detektor ankommende Signal ist also eine entlang der Signalstrecke, insbesondere zumindest überwiegend, durch die Bondwelle entlang der Messtrecke veränderte Intensität. Weitere Intensitätsverluste resultieren aus den Mehrfachreflexionen bzw. der Streuung im Spalt. Die Ermittlung der lokalen Änderung der Intensität erfolgt bevorzugt durch die Aufnahme mehrerer Messtrecken, insbesondere durch die Bewegung von Sender und/oder Detektor und die Anwendung der Radon-Transformation.

- 29 -

Der im Spalt verlaufende Strahl erfährt eine Schwächung der Intensität in Wechselwirkung mit der verlaufenden Bondwelle. Die veränderte Intensität, unabhängig davon, ob die Verluste durch Reflexion, Absorption oder Streuung entstanden sind, ergeben einen Messwert für die Berechnung des Verlaufs der Bondwelle. Für eine erfolgreiche Messung ist die reproduzierbare Schwächung der Intensität notwendig.

In einer bevorzugten Ausführungsform besteht zwischen Sender und Empfänger bei der Annäherung bis zu einem Grenzwert der Höhe des Spalts direkter „Sichtkontakt“. Mit anderen Worten sind bis zu einer Höhe des Spalts die Reflexionen entlang der Signalstrecke vernachlässigbar gering im Vergleich zur Streuung bzw. Filterung durch die partielle Blockade, verursacht durch die Bondwelle.

In einer weiteren beispielhaften erfindungsgemäßen Ausführungsform wird die optische Eigenschaft der Laufzeit verwendet, um die Position der Bondwelle im Spalt zu ermitteln. Die Laufzeit des Messstrahls im Spalt ist dabei im nicht angenäherten Zustand auf ein Minimum begrenzt. Der Brechungsindex der Substratoberflächen, welche den Spalt begrenzen, weiterhin als Substratmaterialien bezeichnet, ist im nicht angenäherten Zustand insbesondere größer als der Brechungsindex der Luft oder des Vakuums im Spalt (Brechungsindex in der Luft ist 1), vorzugsweise kleiner als 3,5, mit Vorzug kleiner als 3,0, mit größtem Vorzug kleiner als 2,5, mit größtem Vorzug kleiner als 2,0, mit noch größtem Vorzug kleiner als 1,5. Mit Vorzug ändert sich der Brechungsindex der Begrenzungsmaterialien durch Vorspannung und Verformung nicht oder nur sehr wenig. Durch die unterschiedlichen Brechungsindices zwischen dem Spalt und den Begrenzungsmaterialien wird das eingekoppelte Signal durch die Reflexion mit Vorzug überwiegend im Spalt gehalten.

- 30 -

Ein erfindungsgemäßer Gedanke besteht insbesondere darin, dass durch eine lokale Verengung des Spalts das optische Material lokal mehrere Reflexionen erleidet und eine lokale Änderung, insbesondere Erhöhung des zurückgelegten optischen Pfades somit die Änderung der Laufzeit im Spalt verursacht wird.

Mit der Veränderung der Höhe des Spalts ändert sich generell das Übertrittsverhalten der elektromagnetischen Strahlung aus dem Spalt in die Umgebung, also in die Begrenzungsmaterialien beziehungsweise die Substrate. Darunter ist vor allem eine lokale Änderung der Intensität bzw. Laufzeit zu verstehen.

Das Reflexionsverhalten und Transmissionsverhalten der elektromagnetischen Strahlung wird bevorzugt mit den Fresnelschen Gleichungen beschrieben. Das am Detektor ankommende Signal ist also eine entlang der Signalstrecke, insbesondere überwiegend, vorzugsweise ausschließlich, durch die Bondwelle entlang der Signalstrecke veränderte Intensität der elektromagnetischen Strahlung. Die Ermittlung der lokalen Intensität bzw. der lokalen Laufzeit erfolgt bevorzugt durch die Aufnahme mehrerer Messstrecken, insbesondere durch die Bewegung von Sender und/oder Detektor entlang des Umfangsrandes und die Anwendung der Radon-Transformation.

Es ist erfindungsgemäß bevorzugt ebenfalls möglich, durch die Veränderung der optischen Mehrfachreflexionen im Spalt den Verlauf der Bondwelle über eine Farbänderung der Strahlen zu korrelieren. Bei direkt durchgehenden Strahlen ist die bekannte spektrale Zusammensetzung der ausgesendeten Signale bekannt. Da die begrenzenden Substratoberflächen das Spektrum der Strahlung unterschiedlich absorbieren bzw. spiegeln, kann bei geringerem Spaltabstand und damit einhergehenden wachsenden Anzahl der Reflexionen

eine Veränderung des Spektrums gemessen werden, welche als Farbänderung wahrgenommen bzw. vermessen wird.

In einer dritten erfindungsgemäßen Ausführungsform werden als optische Eigenschaft transversal-elektromagnetischen Wellen (TEM-Welle) verwendet. Unter einer TEM-Welle versteht man eine elektromagnetische Welle, deren elektrische und magnetische Feldkomponenten in Ausbreitungsrichtung verschwinden. TEM-Wellen bilden sich nur unter erfindungsgemäßen Randbedingungen. Unter einer Randbedingung versteht man eine einschränkende geometrische Bedingung, die vorgibt, welche Funktionswerte die betrachtete Funktion, im Spezialfall das elektrische und/oder magnetische Feld, besitzt. Durch erfindungsgemäße Randbedingungen bilden sich insbesondere stehende, transversal-elektromagnetische Wellen aus. Die Verteilung der elektromagnetischen Felddichte im Raum ist vorzugsweise streng symmetrisch. Die unterschiedlichen Ausbildungsformen der stehenden Wellen bezeichnet man als Moden. Vergleichbar sind die Moden der TEM-Wellen mit den stehenden Wellen der Akustik oder den stehenden Wellen, die sich bei eingespannten Seilen bilden können.

Ein weiterer erfindungsgemäßer Gedanke besteht insbesondere darin, eine monochromatische elektromagnetische Welle unter einem gewissen Einfallswinkel in den Spalt einzukoppeln. Durch die geometrischen Randbedingungen bildet sich eine der möglichen Moden aus. Im Spalt entstehen also stehende transversal-elektromagnetische Wellen. Analysiert man in einem Querschnitt des Spalts die Intensität entlang der Querschnittsfläche, erhält man eine symmetrische Intensitätsverteilung. Die symmetrische Intensitätsverteilung kann für einfache geometrische Randbedingungen, wie jene des ausgedehnten dünnen Spaltes, durch eine mathematische Funktion dargestellt werden. Diese mathematische Funktion

enthält sogenannte Ordnungsparameter, mit deren Hilfe Rückschlüsse auf die Anzahl der Maxima erhalten werden.

Der erfindungsgemäße Gedanke dieser erfindungsgemäßen Ausführungsform besteht also darin, die Intensitätsverteilung auf der Empfängerseite zu registrieren. Durch die Wirkung der Bondwelle entlang der Messtrecke wird die Geometrie dahingehend verändert, dass der Spalt insbesondere dünner wird. Dadurch ändern sich die Randbedingungen für die TEM Welle. Die lokale Änderung der Randbedingungen hat somit einen Einfluss auf das gemessene Intensitätssignal am Ende der Messtrecke. Um bei Annäherung der Substrate zueinander ein Messergebnis entlang der gesamten Substratoberflächen zu erhalten, werden Signale von mehreren unterschiedlichen Detektorpositionen bei unterschiedlichen Senderpositionen aufgenommen. Bei den Signalen handelt es sich im konkreten Fall nicht um integrale, sondern um Flächensignale. Es wird also die Intensitätsverteilung entlang eines Raumwinkels um die Normale eines Flächendetektors aufgenommen. Die so ermittelte lokale Intensitätsverteilung im Spalt kann wieder mit dem zeitlich ändernden Verlauf der Bondwelle und dadurch bedingte Verengung des Spalts in Verbindung gebracht werden und erlaubt so die Bestimmung den gesamten Positionsverlauf der Bondwelle als Positionskarte.

Die Anzahl der Sender ist erfindungsgemäß größer oder gleich eins, mit Vorzug größer als 5, mit größerem Vorzug größer als 12, mit größtem Vorzug größer als 30. Die Anzahl der Detektoren ist erfindungsgemäß größer oder gleich eins, mit Vorzug größer als 5, mit größerem Vorzug größer als 12, mit größtem Vorzug größer als 30. Insbesondere werden der Sender und der Empfänger/Detektor integral ausgebildet oder Sender und/oder Empfänger sind, insbesondere gleichmäßig und/oder symmetrisch, am Umfangsrand der zu vermessenden Substrate, insbesondere in der Ebene der bevorzugt planar

- 33 -

verlaufenden Bondwelle angeordnet oder werden rotatorisch bei konstantem Radius um den Umfangsrand der Substrate bewegt. Die Sender können als Punkt-, Linien- oder bevorzugt Flächenstrahler ausgeführt sein. Die Detektoren können als Punkt-, Linien oder Flächendetektoren ausgeführt sein. Dieser Messvorgang kann auch als Tomographie bezeichnet werden.

In einer weiteren erfindungsgemäßen Ausführungsform sind Reflektoren außerhalb der Außenkante der Substrate vorgesehen. Bei den Reflektoren handelt es sich um Objekte, mit Vorzug Kugeln und/oder Zylinder, deren Achse parallel zur Normalen des Spalts beziehungsweise parallel zur Oberflächennormale der Substrate liegt, welche eine hohe Reflektivität bei der Wellenlänge des eingekoppelten Messsignals besitzen. Alternativ können die Reflektoren als Planspiegel oder als konvexe oder konkave Spiegel ausgeführt sein.

Der Sender koppelt eine elektromagnetische Strahlung mit vorgegebener Frequenz in den Spalt ein. Der Detektor misst nach einer vorgegebenen Zeit die Antwort des Systems auf das eingekoppelte Signal. Sender und Detektor können sich an unterschiedlichen Positionen des Umfangs der Substrate befinden. Sender und Detektor sind vorzugsweise synchronisiert, so dass der Detektor mit der Zeitmessung beginnt, sobald der Sender das Signal in den Spalt einkoppelt. Nach einer gewissen Zeit misst der Detektor ein Signal, abgelenkt an einem Reflektor. Das elektromagnetische Signal hat beim Durchqueren des Spalts eine Änderung in seiner Intensität erfahren. Der Intensitätsverlust ist ein Maß für die Absorption entlang der Signalstrecke, hervorgerufen durch die Abstandsänderung des Spalts als Wirkung des Verlaufs der Bondwelle.

Die Vermessung der Abstandsänderung als Wirkung des Verlaufs der Bondwelle an der Position eines Reflektors erfolgt durch die Messung der

Änderung des Ausgangssignals vom Eingangssignal. Mit Vorzug wird die Abnahme an Intensität als Messgröße herangezogen.

Die Messung der Abstandsänderung zwischen den Substraten erfolgt bei einem Abstand von mehr als 0 nm, bevorzugt mehr als 1 nm, mit Vorzug, mehr als 50 nm, mit größerem Vorzug mehr als 100 nm, mit noch größerem Vorzug mehr als 100 Mikrometer, mit allergrößtem Vorzug mehr als 150 Mikrometer, im optimalen Fall mehr als 200 Mikrometer, im Idealfall mehr als 5000 Mikrometer.

Die Genauigkeit der zeitlich abhängigen Positionswerten der Bondwelle zwischen den Substraten bei wiederholten Messungen (bekannt als Reproduzierbarkeit der Messvorrichtung) ist besser als 20%, mit Vorzug besser als 15%, mit größerem Vorzug besser als 10%, mit größtem Vorzug besser als 5%, mit allergrößtem Vorzug besser als 1%, bezogen auf die jeweils gleiche Aufnahmezeit und/oder den jeweils gleichen Aufnahmeort.

Die Messung kann bei erhöhten Temperaturen erfolgen. Die Messung erfolgt bei weniger als 500°C, mit Vorzug weniger als 200°C, mit größerem Vorzug weniger als 100°C, mit noch größerem Vorzug weniger als 50°C, mit allergrößtem Vorzug bei Raumtemperatur.

Erfindungsgemäß möglich ist es insbesondere, mindestens eins der Substrate zu kühlen. Bevorzugt wird das Substrat auf weniger als 10°C, besonders bevorzugt weniger als 0°C, ganz besonders bevorzugt weniger als -30°C gekühlt. Es ist jedoch zu beachten, dass durch Kühlen oder Heizen der Substrate im resultierenden Bond unerwünschte thermische Spannungen entstehen können. So ist die bevorzugte Messtemperatur die Standardnormaltemperatur von 20°C sowohl für die Messvorrichtung als auch für die Substrate.

Soweit die Messeinrichtung in einer Waferbearbeitungsvorrichtung, speziell in einer Waferbondvorrichtung, insbesondere in einem Fusionsbonder insbesondere in-line, einsetzbar ist, lassen sich reproduzierbare und grafisch darstellbare Verläufe der Bondwellen ermitteln. Darüber hinaus ist es erfindungsgemäß möglich, die Bondwelle zwischen den Substraten auf Basis des Bondwellenlaufs (zeitlicher und örtlicher Verlauf) entsprechend zu manipulieren, um den Verlauf der Bondwelle auf die Minimierung des Run-out-Fehlers zu optimieren.

Zur Beeinflussung der Bondwelle können die folgenden Mittel einzeln oder in Kombination eingesetzt werden:

- der Abstand der Substrate wird mittels geregelter Positioniervorrichtungen mit aktiver Klemmung und Festhaltungen aktiv geändert.
- die Krümmung mindestens eines der Substrate wird aktiv mittels variabel aufgebrachtter Kraft eines Druckelements, insbesondere eines sog. Pins verändert.
- die Durchbiegung mindestens einer der Substrate wird mittels lokal wirkenden Fixierungen, insbesondere lokal geschalteten einzeln regelbaren Vakuumbahnen, und/oder insbesondere mit Piezoaktuatoren in Abhängigkeit der aktuellen Position der Bondwelle in eine, durch ein mathematisches Modell vorgegebene Form verformt, indem gezielt einzelne Vakuumpunkte zumindest gelöst, bevorzugt mit Überdruck und/oder mechanischer Kraft beaufschlagt werden.
- Die Durchbiegung mindestens einer der Substrate wird mittels einer zumindest teilweise lokal wirkenden Platte, welche als Versteifungsplatte verstanden werden kann, aktiv beeinflusst. Insbesondere kann die Steifigkeit der Platte lokal mittels nachgiebigen Mechanismen wie inkompressible Fluide in Kanalsystemen in die, durch

- 36 -

mathematische Modelle vorgegebene Form gebracht und verformt werden. Die Versteifungsplatte kann mindestens entlang zwei Achsen, unabhängig voneinander ausgebeult werden.

- Die Durchbiegung mindestens einer der Substrate wird mittels einer zumindest teilweise lokal wirkenden Platte, welche als Versteifungsplatte verstanden werden kann, aktiv beeinflusst. Insbesondere wird die Durchbiegung der Versteifungsplatte mit dem darauf befestigten Substrat aktiv, mit Stillelementen wie Piezo-Linearaktuatoren, durch ein mathematisches Modell vorgegebene Form verformt.

Alle aufgeführten Verformungen dienen dazu, die Bondwelle in einer geschlossenen Regelschleife zu beeinflussen, um den Run-out-Fehler zumindest teilweise, bevorzugt vollständig, zu eliminieren.

In einer vorteilhaften bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind der/die Sender und/oder der/die Empfänger entlang des Umfangsrandes bewegbar. Mit Vorteil erfolgt die Bewegung gesteuert von der Steuerungseinrichtung, insbesondere mittels von der Steuerungseinrichtung gesteuerten Schrittmotoren.

Alternativ kann die synchronisierte Bewegung aller Sender und/oder Empfänger geregelt erfolgen.

Bevorzugt erfolgt die Bewegung entlang einer zum Umfangsrand formkongruenten Bahn, insbesondere einer Ringbahn, vorzugsweise einer, insbesondere umfangsgeschlossenen, Kreisringbahn.

Als weitere erfindungsgemäße Ausführungsform wird eine Vielzahl von Sendern und/oder Empfängern ortsfest, unbeweglich am Substratrand

- 37 -

angeordnet. Durch die entsprechende elektronische Schaltung und Regelung der einzelnen Sender und/oder Empfänger kann eine Rotation des Messsignals erzeugt werden. Die so erfassten und berechneten Ergebnisse können im Vergleich zu den Ergebnissen aus Messungen mit rotierten Sendern und Empfängern nahezu identische Ergebnisse liefern.

Mit Vorteil ist es erfindungsgemäß bevorzugt vorgesehen, dass die Messeinrichtung mehrere am Umfangsrand verteilte Sender und/oder mehrere am Umfangsrand verteilte, je einem, insbesondere gegenüberliegend angeordneten, Sender zugeordnete Empfänger aufweist, insbesondere mindestens zwei Empfänger je Sender.

Durch die erfindungsgemäße bevorzugte Maßnahme, dass jeder Sender mehrere Signalstrecken, insbesondere gleichzeitig, aussendet und/oder jeder Empfänger jeweils einer einzigen Signalstrecke zugeordnet ist, können am Umfangsrand mehrere Empfänger als Sender angeordnet werden, so dass die Erfassung effizienter erfolgen kann.

Weiter ist es erfindungsgemäß bevorzugt von Vorteil, wenn die Messeinrichtung eine Auswerteeinheit zur Bestimmung von verorteten Positionen der Bondwelle entlang der Signalstrecken, insbesondere durch Transformation, vorzugsweise Radon-Transformation, der von dem mindestens einen Empfänger empfangenen Signale aufweist.

Ein erstes erfindungsgemäßes Verfahren zur Ermittlung des Verlaufs der Bondwelle beim Bonden zweier Substratoberflächen, insbesondere mit seitlicher Beobachtung umfasst in seiner allgemeinsten Form folgende Schritte, insbesondere folgenden Ablauf:

- 38 -

- Anordnung einer Messeinrichtung zum Spalt eines ersten zu bondenden Substrats und eines zweiten zu bondenden Substrats am äußeren, seitlichen Umfang insbesondere in einer Höhe der Ebene der zu messenden Bondwelle,
- Aussendung von Signalen in Form elektromagnetischer Wellen durch den oder die am Umfangsrand angeordneten Sender entlang einer durch den Spalt verlaufenden ersten Signalstrecke und mindestens einer weiteren durch den Spalt verlaufenden Signalstrecke,
- Alternativ kann die Aussendung von Signalen in Form elektromagnetischer Wellen durch den oder die am Umfangsrand angeordneten Sender entlang einer durch den Spalt verlaufenden ersten Signalstrecke erfolgen,
- Empfang der Signale durch den oder die am Umfangsrand angeordneten Empfänger zum Empfang der von dem oder den Sender(n) durch den Spalt gesendeten und bei Abstandsänderung wegen des Verlaufs der Bondwelle veränderbaren Signale der ersten Signalstrecke und der weiteren Signalstrecke(n).

Ein zweites erfindungsgemäßes Verfahren zur Beeinflussung des Verlaufs der Bondwelle beim Bonden zweier Substratoberflächen umfasst die Beobachtung der Bondwelle, insbesondere von der Seite und Regelung der Aktuatoren für die Beeinflussung der Bondwelle. Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst in seiner allgemeinsten Form folgende Schritte, insbesondere folgenden Ablauf:

- Anordnung einer Messeinrichtung zum Spalt eines ersten zu bondenden Substrats und eines zweiten zu bondenden Substrats am äußeren,

- 39 -

seitlichen Umfang insbesondere in einer Höhe der Ebene der zu messenden Bondwelle,

- Aussendung von Signalen in Form elektromagnetischer Wellen durch den oder die am Umfangsrand angeordneten Sender entlang einer durch den Spalt verlaufenden ersten Signalstrecke und mindestens einer weiteren durch den Spalt verlaufenden Signalstrecke,
- Initiierung eines Prebondes an einer Kontaktierungsstelle zweier zu bondenden Substrate, insbesondere gleichzeitige Beobachtung und insbesondere kontinuierliche Vermessung des Spalts entlang einer durch den Spalt verlaufenden ersten Signalstrecke und mindestens einer weiteren durch den Spalt verlaufenden Signalstrecke,
- Verarbeitung der Messergebnisse und Rückführung der Ergebnisse als Stellwert für die Aktuatoren,
- geregelter Lauf der Bondwelle mit Iterationen aus seitlich beobachtete Vermessung der Bondwelle und Veränderung des Regelzustandes der Aktuatoren, insbesondere Vakuum, und/oder Krümmung, und/oder elektrostatische Haltekraft, und/oder Abstand der Substrathalter zueinander und/oder Form der Substrathalter (Freiformflächen, etc.),
- Speicherung der einzelnen gemessenen und korrelierten Parameter des aktuellen Prebondes,
- Kontrolle des gebondeten Substratstapels mit Hilfe eines Wissensspeichers aus Messergebnissen aus vergangenen Messungen,

- 40 -

- insbesondere automatische Entscheidung über der Fügequalität des Substratstapels.
- falls Qualität über einem festgelegten Grenzwert: Freigabe des Substratstapels zur weiteren Bearbeitung,
falls Qualität minderwertig: Rückführung des Substratstapels zur Wiederaufbereitung und/oder Eingriff des Operators.

Für eine erfindungsgemäße Vorrichtung und erfindungsgemäße Verfahren gelten die vorgenannten, zur Messeinrichtung beschriebenen Merkmale entsprechend und umgekehrt.

Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele sowie anhand der Zeichnungen. Diese zeigen in:

- Fig. 1a: eine Querschnittsansicht einer erfindungsgemäßen Fusionsbondvorrichtung mit einer erfindungsgemäßen Messeinrichtung,
- Fig 1b: eine Querschnittsansicht einer erfindungsgemäßen Fusionsbondvorrichtung mit einer erfindungsgemäßen Messeinrichtung sowie Messanordnung mit einem zum Bonden vorgespannten Substrat
- Fig. 2a: eine schematische Aufsicht auf eine erste Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Messeinrichtung,
- Fig. 2b: eine schematische Aufsicht auf eine zweite Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Messeinrichtung,
- Fig. 2c: eine schematische Aufsicht auf eine dritte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Messeinrichtung,

- Fig. 3: eine schematische Aufsicht auf eine vierte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Messeinrichtung,
- Fig. 4: eine schematische Aufsicht auf eine fünfte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Messeinrichtung,
- Fig. 5a: eine schematische Darstellung einer Messung einer optischen Eigenschaft einer bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung,
- Fig. 5b: eine schematische Darstellung einer Messung einer optischen Eigenschaft einer bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung,
- Fig. 6: eine schematische Darstellung einer Messung einer optischen Eigenschaft einer besonders bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung.

In den Figuren sind gleiche oder gleichwirkende Bauteile mit den gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet.

Figur 1a zeigt schematisch eine Bondvorrichtung 10, insbesondere Fusionsbondvorrichtung, wobei nur ein erster, insbesondere oberer Substrathalter 11 und ein zweiter, insbesondere unterer Substrathalter 12 dargestellt sind.

Zwischen den Substrathaltern 11, 12 sind ein erstes Substrat 2 und ein zweites Substrat 4 angeordnet, die mit einem als Messspalt 3 ausgebildeten Abstand dargestellt werden.

Die Substrate 2, 4 werden mit individuell regelbaren Befestigungsmitteln 5, 5' auf dem jeweiligen Substrathalter 11, 12 befestigt.

- 42 -

Individuell regelbare Befestigungsmittel 5, 5' bedeuten, dass die Vakuum/Druckkanäle und/oder magnetische und/oder elektrostatische und/oder adhäsive Befestigungselemente einzeln regelbar sind und/oder in Gruppen geregelt werden können. Somit können insbesondere benachbarte Befestigungselemente in Wirkrichtung entgegengesetzte Kräfte aufbringen.

In der Ebene des Messspalts 3 bzw. in der Ebene des Verlaufs der Bondwelle ist die Messeinrichtung 1 angeordnet, wobei die einzelnen Positionierungs- sowie Bewegungsmittel sowie Messmittel nicht dargestellt sind. Die Messeinrichtung 1 kann mindestens aus einem nicht dargestellten Sender 7 und einem nicht dargestellten Empfänger 8 bestehen.

Der Messspalt 3 ist Teil der Messeinrichtung 1 zur Messung von optischen Eigenschaften von durch den Messspalt 3 gesendeten Signalen, wobei die Messeinrichtung 1 entweder ein für die Messungen in die Bondeinrichtung eingebrachter Sensor als Messeinrichtung oder fest in die Bondvorrichtung installiert sein kann.

Beide Substrate 2, 4 sind in einer nicht vorgespannten Position dargestellt. Eine Vorspannung des Substrats kann als Wirkung eines Vorspannelementes 6 durch Krafteinwirkung auf das Substrat 2 aufgefasst werden.

Figur 1b zeigt schematisch die in Figur 1a beschriebene Bondvorrichtung 10. Die Messeinrichtung 1 kann ein Messsignal im Messspalt 3 zwischen den unteren Substrat 4 und dem oberen Substrat 2 erfassen, wobei ein Vorspannelement 6, insbesondere ein Pin, das obere Substrat 2 vorspannt, um die Substrate 2, 4 miteinander verbinden zu können.

Falls in der Messeinrichtung 1 die Höhe des Spaltes als Mess- oder Anlagenwert vorliegt, wird eine Korrelation zwischen der optischen

Eigenschaft des Messsignals und der Höhe des Spalts erstellt, sodass die Messergebnisse als Funktion der errechneten Höhe des Spaltes beim Verlauf der Bondwelle ausgegeben und/oder gespeichert werden können.

Figur 2a zeigt schematisch eine erste Ausführungsform der Messeinrichtung 1 in einer Aufsicht.

Zur Messung und zum Durchleiten elektromagnetischer Wellen ist gemäß der Ausführungsform in Figur 1 ein Sender 7 an einem Umfangsrand 3u des Messspalt 3 angeordnet, der ein Signal 9 durch den Messspalt 3 entlang einer Signalstrecke sendet.

Zur erfindungsgemäßen Erfassung des gesamten Messspalts 3 sind der Sender 7 und/oder der Detektor 8, insbesondere synchronisiert, entlang des Umfangsrandes 3u bewegbar, insbesondere entlang einer ringförmigen, vorzugsweise kreisringförmigen, Umlaufbahn, die durch Pfeile dargestellt ist. Die Umlaufbahn schließt insbesondere unmittelbar an den Messspalt 3 an.

Zur Steuerung bzw. Regelung der erfindungsgemäßen Bauteile und Verfahrensschritte ist eine (nicht dargestellte) Steuerungseinrichtung bzw. Regelungseinrichtung vorgesehen.

Es ist erfindungsgemäß insbesondere denkbar, mehrere Sender 7 und/oder mehrere Empfänger 8 am Umfangsrand 3u zu verteilen, die dann jeweils einen Abschnitt des Umfangsrandes 3u abdecken, entweder durch Bewegung oder durch Abdeckung eines größeren Teilabschnitts.

Figur 2b zeigt schematisch eine zweite Ausführungsform der Messeinrichtung 1 als eine Erweiterung der ersten Ausführungsform der Messeinrichtung in einer Aufsicht. Die Ausführungsform ist ähnlich zur ersten Ausführungsform

- 44 -

der Messeinrichtung, diskutiert in Fig. 2a. Es werden mehrere Sender 7, mehrere Empfänger 8 sowie Signale 9 schematisch dargestellt. Die Signale 9 laufen bevorzugt als nicht zentrische (Kreis-) Sehnen im Messspalt 3, bevorzugt einander kreuzend vom jeweiligen Sender 7 zum jeweiligen Empfänger 8.

Figur 2c zeigt schematisch eine dritte Ausführungsform der Messeinrichtung 1 als eine Abwandlung der ersten oder zweiten Ausführungsform der Messeinrichtung in einer Aufsicht.

Ein beispielhaft aufgeführter Sender 7 sendet ein Signal 9 zu einem beispielhaft aufgeführten Empfänger 8 in einem Messspalt 3. Ein Reflektor 13 lenkt das Signal im Messspalt 3 vom Sender 7 auf den Empfänger 8 um. Der Sender 7, der Reflektor 13, der Empfänger 8 sind insbesondere am Umfangsrand 3u angeordnet. In alternativen, nicht dargestellten Ausführungsformen bezieht sich der Umfangsrand 3u auf den Umfangsrand der Haltevorrichtung, welche zumindest ein Substrat festhalten kann.

In einer nicht dargestellten erfindungsgemäßen Ausführungsform wird der vom Sender ausgesandte Strahl im Spalt vom momentanen, aktuellen Ort der Bondwelle gestreut und/oder reflektiert und/oder gebeugt. Dieser veränderte Strahl kann mit mindestens einem Empfänger erfasst und zur Bestimmung des Verlaufs der Bondwelle erfindungsgemäß verwendet werden.

So sind in der in Figur 3 gezeigten vierten Ausführungsform mehrere Empfänger 8 einem einzigen Sender 7 gegenüberliegend zugeordnet. Der Sender 7 sendet im Vergleich zu den vorher beschriebenen Ausführungsformen gemäß Fig. 2a-c einen Signalstrahl 9 aus, der einen größeren Abschnitt des Messspalts 3 erfasst und eine Vielzahl von Signalstrecken aufweist, die jeweils zu einem der Empfänger 8 führen und von diesem aufgenommen werden. Somit besteht der Vorteil dieser

Ausführungsform darin, dass gleichzeitig mehrere Signale entlang eines größeren Winkelabschnitts des Messspalts 3 gleichzeitig erfasst werden können. Die erforderliche Messzeit sinkt um den Faktor der Anzahl der Empfänger 8.

In einer weiteren Ausführungsform können die Signale 9 des Senders 7 gepulst getaktet ausgesendet werden. Die Empfänger 8 können entsprechend in einem kontinuierlichen oder in einem synchronisiert getakteten Modus, insbesondere elektronisch geschaltet betrieben werden. Durch diese Ausführungsform können elektronische Schaltvorgänge eine Bewegung der Messvorrichtung 1 am Umfangsrand 3u entsprechend ersetzen.

Durch Bewegung des Senders 7 und dem Sender 7 zugeordneten Empfänger 8 entlang des Umfangsrandes 3u ist der gesamte Messspalt 3 erfassbar. Alternativ können am Umfang verteilte mehrere Sender 7 und jeweils zugeordnete Empfänger 8 angeordnet sein, so dass ohne Bewegung des Senders und der Empfänger 8 der gesamte Messspalt 3 erfassbar ist.

Figur 4 zeigt eine fünfte Ausführungsform zur Erfassung des Messspalts 3, wobei ein Sender 7 und ein Empfänger 8' vorgesehen sind, wobei der Empfänger 8' als Linien- oder Flächendetektor, insbesondere als CCD-, bevorzugt als CMOS-Detektor ausgestattet ist. Der Linien- beziehungsweise Flächendetektor ist in der Lage, Signale entlang einer Linie beziehungsweise Fläche aufzunehmen und unmittelbar weiterzuverarbeiten. Je nach Ortsauflösung des Empfängers 8' ist dieser eine Vielzahl von Signalstrecken des Signals 9 erfassend ausgebildet. Analog zu der Ausführungsform gemäß Figur 3 kann sowohl der Sender 7 als auch der Empfänger 8' entlang des Umfangsrandes 3u bewegt werden oder es werden eine Mehrzahl, insbesondere drei, Sender 7 am Umfang verteilt, mit jeweils gegenüberliegenden Empfängern 8'.

Den vorbeschriebenen Ausführungsformen ist es gemein, dass praktisch eine beliebige Vielzahl von durch den Messspalt 3 verlaufenden Signalstrecken durch entsprechend kleine Bewegungsschritte der Sender 7 und Empfänger 8, 8' erfasst werden können. Die Bewegung kann insbesondere durch Schrittmotoren erfolgen, die von der Steuerungseinrichtung gesteuert werden. Regelungen sowie Regelungseinrichtungen sind entsprechend gleichgestellt. Es ist erfindungsgemäß insbesondere denkbar, entsprechend synchronisierte, insbesondere bürstenlose Gleichstrommotoren mit großer nachgeschalteter Übersetzung für eine feine Positionierbarkeit des Senders 7 und der Empfänger 8, 8' zu verwenden.

Die erfassten Daten werden von einer Auswerteeinheit (nicht dargestellt) ausgewertet. Eine mögliche Auswertung ist die durch die Auswerteeinheit ausgewertete lokale, insbesondere zeitabhängige Position der Bondwelle, aufgetragen bei gegebenen Positionen. Es ist erkennbar, dass sich der Verlauf der Bondwelle als Funktion des Ortes und des Zeitpunktes ändert.

Figur 5a zeigt die Ermittlung einer weiteren optischen Eigenschaft des optischen Materials des Messspalts 3, nämlich des Intensitätsverlusts. Mit reduziertem Abstand zwischen den Substraten wird das Signal im Messspalt 3 mit einer erhöhten Anzahl von Reflexionen für die gleiche Strecke reflektiert, und mit vermindertem Abstand steigt der optische Intensitätsverlust. Durch die Änderung des Abstandes ändert sich die Reflektionseigenschaft des Signals 9 und damit seine Intensität. Die Ausbreitung des Signals 9 wird durch die Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Welle des Signals 9 nach den Regeln der geometrischen Optik dargestellt. Die unterschiedliche Dicke der Pfeile repräsentiert schematisch die Intensität, die am Eintritt des Signals 9 in den Messspalt 3 hoch ist. Durch Änderung des Abstands mit fortschreitendem Weg werden

immer mehr Photonen der elektromagnetischen Welle aus dem Messspalt 3 gestreut, blockiert, reflektiert oder absorbiert, was durch immer dünner werdende Pfeile dargestellt ist. Die Pfeile der den Messspalt 3 verlassenden Photonen wird mit abnehmendem Abstand dicker. Es können als Verluste evaneszente Wellen entstehen.

Bei Fig. 5a ist zu beachten, dass der Signal 9 nicht parallel bzw. nicht im Wesentlichen parallel in den Spalt 3 eingeleitet wird.

Figur 5b zeigt die Ermittlung einer weiteren optischen Eigenschaft des optischen Materials des Messspalts 3 mit leicht divergentem, parallel eingekoppelten Signal 9, wobei lediglich zwei Randstrahlen schematisch dargestellt sind. Der Divergenzwinkel des Senders, angedeutet durch die Eintrittspfeile des Signals 9, ist kleiner 10 Grad, bevorzugt kleiner 5 Grad, besonders bevorzugt kleiner 3 Grad, ganz besonders bevorzugt kleiner 1 Grad.

In Fig. 5b wird die Strahlung bevorzugt parallel zu den Substratoberflächen in den Spalt eingekoppelt.

Für die in Fig. 5b dargestellte Ausführungsform gelten weiterhin die in Fig. 5a beschriebenen Merkmale.

Figur 6 ist eine schematische Darstellung der Änderung einer TEM-Welle, durch eine Abstandsänderung entlang des Weges L. Es ändert sich der Messspalt 3 entlang des Weges L von t auf t' , wodurch sich auch die stehende elektromagnetische Welle innerhalb des Messspalt 3 ändert. Diese Änderung der elektromagnetischen Welle führt zu einer Änderung der Mode der elektromagnetischen Welle und auch der Intensitätsverteilung. Aus der Änderung der Mode und/oder Intensitätsverteilung ist eine ortsbezogene

- 48 -

Ermittlung der Bondwelle möglich, wobei eine Vielzahl von Signalstrecken ausgewertet wird. Durch die Messung der Intensitätsverteilung der Moden entlang des Umfangsrandes 3u kann mittels der Transformation, vorzugsweise Radon-Transformation, auf die Intensitätsverteilung der Mode an einem bestimmten Ort des Messspalts 3 geschlossen werden. Hieraus sind die lokale Position der Bondwelle bzw. Störungen ermittelbar.

Messeinrichtung und Verfahren zur Ermittlung eines Verlaufs einer
Bondwelle

Bezugszeichenliste

1	Messeinrichtung
2	erstes Substrat
3	Messspalt, Spalt
3u	Umfangsrand
4	zweites Substrat
5, 5'	Einzel regelbare Substrathaltemittel
6	Vorspannmittel, insbesondere Pin
7	Sender
8, 8'	Empfänger
9	Signal
10	Fusionsbondvorrichtung
11	Erster Substrathalter
12	Zweiter Substrathalter
13	Reflektor
D	Durchmesser
t, t'	Spaltdicke

- 50 -

Messeinrichtung und Verfahren zur Ermittlung eines Verlaufs einer
Bondwelle

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Messeinrichtung (1) zur Ermittlung eines Verlaufs einer Bondwelle in einem Spalt (3) zwischen einem ersten Substrat (2) und einem zweiten Substrat (4), aufweisend:
 - mindestens einen an einem Umfangsrand (3u) des Spalts (3) platzierbaren Sender (7) zur Aussendung von Signalen (9) in Form elektromagnetischer Wellen entlang einer durch den Spalt (3) verlaufenden Signalstrecke,
 - mindestens einen am Umfangsrand (3u) platzierbaren Empfänger (8, 8') zum Empfang der vom Sender (7) durch den Spalt (3) gesendeten und vor dem Bonden und/oder beim Bonden veränderbaren Signale (9) der ersten Signalstrecke.

- 51 -

2. Messeinrichtung (1) nach Anspruch 1, die in einer Bondvorrichtung, insbesondere in-situ, einsetzbar ist.
3. Messeinrichtung (1) nach wenigstens einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Sender (7) und/oder der Empfänger (8, 8') entlang des Umfangsrandes (3u) bewegbar ist/sind.
4. Messeinrichtung (1) nach wenigstens einem der vorhergehenden Ansprüche, die mehrere am Umfangsrand (3u) verteilte Sender (7) und/oder mehrere am Umfangsrand (3u) verteilte, je einem, insbesondere gegenüberliegend angeordneten, Sender (7) zugeordnete Empfänger (8, 8') aufweist, insbesondere mindestens zwei Empfänger (8, 8') je Sender (7).
5. Messeinrichtung (1) nach wenigstens einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der jeder Sender (7) mehrere Signalstrecken, insbesondere gleichzeitig, aussendet und/oder jeder Empfänger (8, 8') jeweils einer einzigen Signalstrecke zugeordnet ist.
6. Messeinrichtung (1) nach wenigstens einem der vorhergehenden Ansprüche mit einer Auswerteinheit zur Bestimmung von Messwerten entlang der Signalstrecken, insbesondere durch Transformation, vorzugsweise Radon-Transformation, der von dem mindestens einen Empfänger (8, 8') empfangenen Signale (9).
7. Messeinrichtung (1) nach wenigstens einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der mindestens eine Empfänger (8, 8') optische Eigenschaften des Signals (9) erfassend ausgebildet ist, insbesondere eine oder mehrere der folgenden optischen Eigenschaften:
 - Doppelbrechung

- 52 -

- Brechungsindex
- Mode von als transversal-elektromagnetischen Wellen ausgeprägten Signalen
- Laufzeit
- spektrale Kodierung

- 53 -

8. Bondvorrichtung, aufweisend eine Messeinrichtung (1) gemäß einem der vorhergehenden Patentansprüche.
9. Bondvorrichtung nach dem vorhergehenden Patentanspruch, aufweisend Beeinflussungsmittel zur Beeinflussung der Bondwelle in Abhängigkeit des Verlaufs der Bondwelle.

- 54 -

10. Verfahren zur Ermittlung eines Verlaufs einer Bondwelle in einem Spalt (3) zwischen einem ersten Substrat (2) und einem zweiten Substrat (4), insbesondere mit einer Messeinrichtung (1) gemäß den vorhergehenden Patentansprüchen, mit folgenden Schritten, insbesondere folgendem Ablauf:
- Anordnung mindestens eines Senders (7) an einem Umfangsrand (3u) des Spalts (3),
 - Anordnung mindestens eines Empfängers (8, 8') am Umfangsrand (3u) des Spalts (3),
 - Aussendung von Signalen (9) in Form elektromagnetischer Wellen durch den oder die am Umfangsrand (3u) angeordneten Sender (7) entlang einer durch den Spalt (3) verlaufenden Signalstrecke,
 - Empfang der Signale (9) durch den oder die am Umfangsrand (3u) angeordneten Empfänger (8, 8') zum Empfang der von dem oder den Sender(n) (9) durch den Spalt (3) gesendeten und vor dem Bonden und/oder beim Bonden veränderbaren Signale (9) der Signalstrecke.

- 55 -

11. Verfahren zum Bonden zweier Substrate (2, 4), wobei der Verlauf der Bondwelle mit einem Verfahren gemäß dem vorhergehenden Patentanspruch ermittelt wird.
12. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Bondwelle in Abhängigkeit des Verlaufs der Bondwelle beeinflusst wird.