



## Beschreibung

### VERFAHREN ZUM AUFBRINGEN EINER BONDSCHICHT

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß Anspruch 1.

**[0002]** Im Stand der Technik existieren unzählige Verfahren, um unterschiedliche Materialien miteinander zu verbinden. In der Halbleiterindustrie hat sich in den vergangenen Jahren vor allem die Bondingtechnologie durchgesetzt, um zwei Substrate temporär oder permanent miteinander zu verbinden. Sehr oft erfolgt der Bondvorgang zwischen Halbleiter(n) und/oder Metallstrukturen auf dem Substrat. Die bekannteste Metallbondtechnologie der neueren Zeit ist das Kupferbonds. Substrate sind die Träger für funktionelle Baugruppen wie Mikrochips, Speicherchips oder MEMS Baugruppen. In den letzten Jahren wurde zunehmend versucht, eine Verbindung zwischen, auf unterschiedlichen Substraten angeordneten, Baugruppen herzustellen, um einen kostensparenden, aufwendigen und fehleranfälligen Drahtbondprozess zwischen den Baugruppen zu umgehen. Des Weiteren hat die Direktbondvariante den enormen Vorteil der erhöhten Baugruppendichte. Die Baugruppen müssen nicht mehr nebeneinander positioniert und über Drähte verbunden werden, sondern werden übereinander gestapelt und durch unterschiedliche Technologien miteinander vertikal verbunden. Die vertikalen Verbindungen werden meist über Kontaktstellen hergestellt. Die Kontaktstellen unterschiedlicher Substrate müssen zueinander deckungsgleich sein und vor dem eigentlichen Bondvorgang zueinander ausgerichtet werden.

**[0003]** Ein weiterer, weniger verbreiteter Prozess ist das Aluminiumbonds. Bei diesem Prozess sollen aluminierete Stellen an der Oberfläche eines Substrats mit einem auf einem zweiten Substrat liegenden Material verbondet werden. Dabei kann es sich um Aluminium oder ein geeignetes anderes Material handeln. Ein Nachteil von Aluminium ist seine extreme Sauerstoffaffinität. Bereits beim Kupfer ist die Sauerstoffaffinität so hoch, dass regelmäßig Kupferoxide vor einem Bondvorgang entfernt werden müssen. Beim Aluminium ist die Sauerstoffaffinität um ein Vielfaches höher. Noch dazu bildet Aluminium relativ dicke, passivierende Aluminiumoxidschichten aus, die schwer zu entfernen sind. Aluminium wird im Gegensatz zum Kupfer daher weniger für Bonding Verbindungen verwendet, da derzeit aufgrund der sehr stabilen Oxidschichten kein verlässliches Bondingergebnis mit vertretbarem Aufwand erzielbar ist. Dennoch findet Aluminium im Halbleiterbereich verbreitete Anwendung, um Metallverbindungen auf der Chipoberfläche in lateraler Richtung herzustellen. Hier zeichnet sich Aluminium dadurch aus, dass es wesentlich langsames Diffusionsverhalten in Silizium hat als beispielsweise Kupfer oder Gold. In Silizium eindiffundierendes Metall würde die Charakteristik von Transistoren beeinträchtigen bzw. diese völlig funktionsuntüchtig machen. Basierend auf diesem vorteilhaften Diffusionsverhalten, gepaart mit geringen Kosten und relativ guter elektrischer Leitfähigkeit hat sich Aluminium über viele Jahre als das hauptsächlich verwendete Material zur Herstellung elektrischer Verbindungen lateral auf Halbleiterchips etabliert. Zwar wird Aluminium in letzter Zeit bei Chips der neuesten Generation zunehmend durch Kupfer aufgrund seiner besseren elektrischen Leitfähigkeit ersetzt, Aluminium genießt jedoch dennoch nach wie vor eine große Bedeutung, vor allem bei Fertigung von Chips auf 200mm Substraten mit etwas älterer Fertigungstechnologie. Genau diese Fertigungsumgebungen / Fabriken finden in letzter Zeit verstärkt Verwendung für die Fertigung von MEMS (Mikroelektromechanische Systeme) Bauteilen. Die Fertigung dieser MEMS Bauteile wiederum benötigt häufig Bonding Prozesse, sodass die Nachfrage nach einem verlässlichen Aluminium Bonding Prozess steigt. Aluminium ist auch außerhalb der Halbleiterindustrie ein gefragtes, da leichtes, billiges und vor allem aushärtbares Konstruktionsmaterial. In der Halbleiterindustrie wird aufgrund oben genannter Gründe seit längerem versucht, Prozesse zu entwickeln, die Aluminium als Strukturmaterial und insbesondere Material für Bonding-Verbindungen verwendbar machen.

**[0004]** Das größte Problem bei der Verwendung von sauerstoffaffinen Materialien wie Kupfer und Aluminium ist die Vermeidung der Oxidation an Bondflächen und/oder die restlose Entfernung des Oxids von Bondflächen vor einem Bondvorgang. Extrem sauerstoffaffine Materialien wie Aluminium erzeugen darüber hinaus starke und schwer reduzierbare Oxide. Anlagen zur Oxidentfernung sind teuer, aufwendig und unter Umständen gefährlich (Giftstoffe).

**[0005]** Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren sowie ein mit einer Bondschicht versehenes Substrat anzugeben, mit dem ein oxidierbares Material (wie insbesondere Aluminium) zum Bonden verwendet werden kann.

**[0006]** Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben. In den Rahmen der Erfindung fallen auch sämtliche Kombinationen aus zumindest zwei von in der Beschreibung, den Ansprüchen und/oder den Figuren angegebenen Merkmalen. Bei angegebenen Wertebereichen sollen auch innerhalb der genannten Grenzen liegende Werte als Grenzwerte offenbart und in beliebiger Kombination beanspruchbar sein.

**[0007]** Grundgedanke der vorliegenden Erfindung ist es, eine aus einer Grundschicht und einer Schutzschicht bestehende Bondschicht, insbesondere als Diffusionspaar, auf dem Substrat vorzusehen, wobei ein Grundmaterial der Grundschicht oxidierbar ist, während ein Schutzmaterial der Schutzschicht zumindest weniger leicht oxidierbar ist.

**[0008]** Offenbart wird ein Verfahren zum Aufbringen einer aus einer Grundschicht und einer Schutzschicht bestehenden Bondschicht auf ein Substrat mit folgenden Verfahrensschritten:

- Aufbringen eines oxidierbaren Grundmaterials als Grundschicht auf eine Bondseite des Substrats,
- zumindest teilweises Bedecken der Grundschicht mit einem in dem Grundmaterial zumindest teilweise lösbaren Schutzmaterial als Schutzschicht.

**[0009]** Offenbart wird weiterhin ein mit einer Bondschicht versehenes Substrat, wobei, die Bondschicht gebildet ist aus:

- einer aus einem oxidierbaren Grundmaterial an einer Bondseite des Substrats ausgebildeten Grundschicht und
- einer zumindest teilweise die Grundschicht bedeckenden, aus einem in dem Grundmaterial zumindest teilweise lösbaren Schutzmaterial gebildeten Schutzschicht.

**[0010]** Die Erfindung handelt daher insbesondere von einem Prozess, bei dem die Oxidation von sauerstoffaffinen Materialien wie insbesondere Aluminium (bevorzugt) oder Kupfer von vornherein verhindert wird. Der Schutz des sauerstoffaffinen Grundmaterials wird erfindungsgemäß insbesondere durch die Abscheidung eines Schutzmaterials erreicht, welches das Grundmaterial zumindest teilweise, insbesondere überwiegend, vorzugsweise vollständig, bedeckt.

**[0011]** Die objektive Einteilung der Elemente in Bezug auf ihre Sauerstoffaffinität lässt sich am einfachsten durch die elektrochemische Spannungsreihe definieren. Sauerstoffaffine Elemente wie Lithium sind extrem unedel, werden leicht oxidiert, wirken daher als Reduktionsmittel, geben leicht Elektronen ab und besitzen daher ein extrem negatives Standardelektrodenpotential. Dagegen werden Elemente mit einer geringen Sauerstoffaffinität als edel bezeichnet, da diese leicht reduziert werden können und daher als Oxidationsmittel wirken, Elektronen aufnehmen sowie ein extrem positives Standardelektrodenpotential besitzen. Als Grundmaterial wird insbesondere ein Material mit einem Standardelektrodenpotential verwendet, das kleiner ist als 2.00 V, mit Vorzug kleiner als 1.00 V, mit größerem Vorzug kleiner ist als 0.0 V, mit größtem Vorzug kleiner ist als -1.0 V, mit allergrößtem Vorzug kleiner ist als -2.0 V, am bevorzugtesten kleiner ist als -3.0 V. Kupfer besitzt ein Standardelektrodenpotential von ca. 0.16 V, Aluminium von ca. -1.66 V. Das edelste Metall ist Gold mit einem Standardelektrodenpotential von ca. 1.69 V (für die erste Oxidationsstufe).

**[0012]** In einer besonders bevorzugten Variante befinden sich das Grundmaterial und das Schutzmaterial als voneinander getrennte Targets in einer Beschichtungskammer und werden unter Vakuum nacheinander aufgetragen, sodass kein Kontakt des Grundmaterials mit einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre entsteht.

**[0013]** Eine Ausführungsform der Erfindung besteht darin, das Schutzmaterial während des Bondprozesses auf dem Grundmaterial zu belassen und das Schutzmaterial auf Grund seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften während des Bondprozesses im Grundmaterial zumindest teilweise, insbesondere überwiegend, vorzugsweise vollständig, zu lösen. Die Auswahl der

Grundmaterial-Schutzmaterialkombination erfolgt derart, dass diese einen Festkörperlösungsprozess zulässt. Bevorzugt ist das Schutzmaterial besser in dem Grundmaterial lösbar als umgekehrt.

**[0014]** Das Schutzmaterial löst sich insbesondere bei bestimmten Prozessbedingungen im Grundmaterial. Das Grundmaterial besitzt daher eine Randlöslichkeit für das Schutzmaterial und/oder das Grundmaterial ist mit dem Grundmaterial zumindest teilweise, insbesondere überwiegend, vorzugsweise vollständig, mischbar. Bei einer vorhandenen Randlöslichkeit des Schutzmaterials im Grundmaterial ist die Randlöslichkeit bei Raumtemperatur insbesondere groß genug, um eine gewisse Menge des Schutzmaterials gelöst zu halten. Auf diese Weise kann das Schutzmaterial erfindungsgemäß als extrem dünne Schicht aufgetragen werden, um während des Diffusionsprozesses des Schutzmaterials in das Grundmaterial lokale Konzentrationsüberhöhungen zu vermeiden, die zu einer (ungewollten) Ausscheidung führen können.

**[0015]** Ein weiterer, erfindungsgemäßer und vorteilhafter Aspekt der vorliegenden Erfindung besteht darin, einen Kontakt des sauerstoffaffinen Grundmaterials mit einer sauerstoffhaltigen oder sauerstoffreichen Atmosphäre zu vermeiden, insbesondere durch zumindest überwiegendes Bedecken der nicht vom Substrat bedeckten Flächen der Grundschicht mit der Schutzschicht.

**[0016]** Das Schutzmaterial selbst ist vorzugsweise ein Festkörper, insbesondere zumindest bei Raumtemperatur. Dieser ist daher nicht flüssig und erlaubt den Transport des geschützten Grundmaterials durch eine sauerstoffhaltige Atmosphäre.

**[0017]** In einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird das Schutzmaterial so ausgewählt, dass dieses weniger sauerstoffaffin ist als das Grundmaterial oder ein etwaiges, auf dem Schutzmaterial gebildetes Oxid mit einfacheren Mitteln entfernbar ist als es bei einem auf dem Grundmaterial gebildeten Oxid der Fall wäre. Mit Vorteil wird oxidausbildendes Material für die Schutzschicht derart gewählt, dass neben der einfachen Entfernung des Oxids nach der Oxidentfernung neues Oxid auch nur langsam wieder gebildet wird. Insbesondere verstreichen mindestens 2 min, mit Vorzug mindestens 5 min, mit größerem Vorzug mindestens 10 min und mit größtem Vorzug mindestens 15 min, bis weniger als 0,3 nm Oxid, mit Vorzug weniger als 0,1 nm Oxid nachgebildet werden.

**[0018]** Eine Aufnahme eines etwaigen, auf der Schutzschicht gebildeten Oxids in das Grundmaterial wird erfindungsgemäß insbesondere zumindest überwiegend verhindert. Hierzu wird das Oxid des Schutzmaterials insbesondere unmittelbar vor einem Bondvorgang entfernt. Bei geringer Menge an gebildetem Oxid sind auch ein Brechen des Oxids während des später erwünschten Bondvorgangs und ein direkter Einbau in die Grenzschicht denkbar. Bevorzugt werden Schutzmaterialien mit einer oder mehreren der nachfolgend aufgeführten Eigenschaften verwendet:

- Eine geringe Sauerstoffaffinität, insbesondere definiert durch ein Standardelektrodenpotential von mehr als 0 V, mit Vorzug mehr als 1.00 V, mit größerem Vorzug mehr als 2.00 V, vorzugsweise geringer als die Sauerstoffaffinität des Grundmaterials,
- Eine hohe Löslichkeit im Grundmaterial, insbesondere mehr als  $10^{-5}$  mol %, mit Vorzug mehr als  $10^{-3}$  mol %, mit größerem Vorzug mehr als 1 mol %, mit größtem Vorzug mehr als 10 mol %, mit allergrößtem Vorzug mehr als 40 mol %
- Die Eigenschaften des Grundmaterials nicht negativ beeinflussen, daher bei gewünschter hoher Leitfähigkeit die Leitfähigkeit nicht verschlechtern, bei gewünschter hoher Festigkeit, die Festigkeit nicht verringern,
- Gegenüber der Atmosphäre dicht,
- Kostengünstig,
- Hohe Verfügbarkeit,
- Gering toxisch, insbesondere nicht toxisch, und/oder
- gute Bondeigenschaften.

**[0019]** Die Erfindung betrifft demnach insbesondere eine Methode, ein zur Oxidation neigendes erstes Material, das Grundmaterial, insbesondere ein Metall oder einen Halbleiter, mit einem zweiten Material, dem Schutzmaterial, zu bedecken, insbesondere beschichten. Das Schutzma-

terial wird insbesondere in einem weiteren Prozessschritt durch einen Lösungsprozess vom Grundmaterial zumindest teilweise, insbesondere überwiegend, vorzugsweise vollständig, gelöst und/oder bildet in einer ganz speziellen, erweiterten Ausführungsform teilweise, insbesondere überwiegend, vorzugsweise vollständig, Ausscheidungen. Die erfindungsgemäß bevorzugte Ausführungsform umfasst eine vollständige Lösung des Schutzmaterials im Grundmaterial, wobei in diesem Fall keine Ausscheidungen entstehen. Die Aufgabe der aus dem Schutzmaterial gebildeten Schutzschicht besteht insbesondere in der Verhinderung der Oxidation des Grundmaterials. Das Schutzmaterial kann selbst bei Kontakt mit einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre oxidieren und wird gegebenenfalls vom Oxid befreit, bevor der erfindungsgemäße Lösungsprozess im Grundmaterial beginnt. In einer ganz besonderen Ausführungsform wird die Entfernung dieses Oxids auf der Schutzschicht in einer Anlage durchgeführt, in der eine erneute Oxidation der Schutzschicht auf dem Weg zum Bonden kontruktionsbedingt verhindert wird. Denkbar wäre beispielsweise die Verwendung eines Oxidentfernungsmoduls und einer Bondkammer in einem entsprechenden Vakuumcluster, der die Module von der umgebenden, sauerstoffhaltigen Atmosphäre trennt. Dem Fachmann sind derartige Clustersysteme bestens bekannt.

**[0020]** Das bevorzugte Ziel des erfindungsgemäßen Prozesses besteht vor allem darin, sauerstoffaffine Grundmaterialien, insbesondere Aluminium aber auch Kupfer, die in einem weiteren Prozessschritt gebondet werden sollen, bis zum eigentlichen Bondschritt vor einer Oxidation zu schützen. Die Entfernung von etwaigen Oxiden des Schutzmaterials, das vorzugsweise eine viel geringere Sauerstoffaffinität als das zu schützende Grundmaterial aufweist, ist erheblich einfacher, schneller und vor allem verlässlicher, so dass der Prozess beschleunigt werden kann.

**[0021]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das Schutzmaterial, insbesondere nach einer Entfernung von Oxiden des Schutzmaterials, anschließend mit einem weiteren, insbesondere erfindungsgemäß gebildeten, Substrat gebondet. Bevorzugt wird das Schutzmaterial noch während des Bondprozesses im Grundmaterial zumindest teilweise, insbesondere überwiegend, vorzugsweise vollständig, gelöst, sodass im Idealfall bis zum Bonden kein Kontakt zwischen dem Grundmaterial und der sauerstoffreichen Atmosphäre entsteht.

**[0022]** Die erfindungsgemäße Methode eignet sich daher vor allem dazu, sauerstoffaffine Grundmaterialien, insbesondere Aluminium oder Kupfer, direkt nach der Beschichtung auf einem Substrat, temporär mit dem Schutzmaterial zu schützen.

**[0023]** Soweit das Grundmaterial nicht vollflächig, sondern insbesondere strukturiert und/oder nur in Teilbereichen (beispielsweise Kupferkontakte oder Aluminiumbegrenzungen, die Teil eines hermetisch verschlossenen Raumes eines MEMS-Bauteile werden sollen), auf dem Substrat aufgebracht wird, wird das Schutzmaterial als möglichst gleichmäßig dicker, insbesondere geschlossener Film aufgebracht. Erfindungsgemäß wichtig ist vor allem das Verhältnis der (insbesondere mittleren) Schichtdicke des Grundmaterials zur Schichtdicke des Schutzmaterials. Außerdem spielt das chemische, physikalische und/oder metallurgische Verhalten des Grundmaterials mit dem Schutzmaterial erfindungsgemäß eine Rolle.

**[0024]** Das Grundmaterial ist bevorzugt ein festes Lösungsmittel. Insbesondere kann das Grundmaterial ein Mehrphasen-Mehrkomponentensystem sein. Im Falle eines Mehrphasenmaterials gelten alle Überlegungen für den Lösungsprozess zumindest für eine Phase, im Idealfall für alle Phasen. Bevorzugt wird als Grundmaterial ein einzelnes chemisches Element ausgewählt, insbesondere ein Metall, ein Halbmetall oder ein Nichtmetall, insbesondere Silizium, Gallium, Aluminium, Nickel, Titan oder Kupfer. Diese Metalle sind die am häufigsten in der Halbleiterindustrie verwendeten Materialien zur Herstellung von leitfähigen Verbindungen, Kontakten oder Strukturbausteinen (beispielsweise von MEMS-Baugruppen).

**[0025]** Um den erfindungsgemäßen Prozess möglichst einfach zu offenbaren, wird beispielhaft, aber nicht einschränkend, der erfindungsgemäße Prozess am Grundmaterial Aluminium beschrieben. Aluminium ist erfindungsgemäß besonders geeignet, da es ein hoch verfügbares, kostengünstiges Strukturmaterial ist.

**[0026]** Das Schutzmaterial kann insbesondere ebenfalls ein Mehrphasen-Mehrkomponentensystem

tem sein, ist aber vorzugsweise ein einfaches chemisches Element, das vorzugsweise nur in einer Phase vorkommt. Mit Vorzug handelt es sich dabei um ein Metall, ein Halbmetall, ein Alkali- oder ein Erdalkalimetall. Erfindungsgemäß denkbar wäre auch die Verwendung von nichtmetallischen Elementen wie Kohlenstoff, solange die chemisch-physikalischen Eigenschaften zwischen dem Nichtmetall mit Grundmaterial im Sinne des erfindungsgemäßen Prozesses korrespondieren.

**[0027]** Folgende Materialien kommen erfindungsgemäß grundsätzlich als Grundmaterial und/oder Schutzmaterial in Betracht. Die erfindungsgemäßen Prozesse setzen dabei voraus, dass das Schutzmaterial im Grundmaterial zumindest teilweise, insbesondere überwiegend, vorzugsweise vollständig, lösbar ist.

- Metalle, insbesondere
  - Cu, Ag, Au, Al, Fe, Ni, Co, Pt, W, Cr, Pb, Ti, Te, Sn, Zn, Ga
- Alkalimetalle, insbesondere
  - Li, Na, K, Rb, Cs
- Erdalkalimetalle, insbesondere
  - Mg, Ca, Sr, Ba,
- Legierungen,
- Halbleiter, insbesondere mit entsprechender Dotierung versehen,
  - Elementhalbleiter, insbesondere
    - Si, Ge, Se, Te, B, Sn,
  - Verbindungshalbleiter, insbesondere
    - GaAs, GaN, InP,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , InSb, InAs, GaSb, AlN, InN, GaP, BeTe, ZnO,  $\text{CuInGaSe}_2$ , ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe,  $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$ , BeSe, HgS,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , GaS, GaSe, GaTe, InS, InSe, InTe,  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CuInS}_2$ ,  $\text{CuInGaS}_2$ , SiC, SiGe.

**[0028]** Zur Entfernung von Oxidschichten des Schutzmaterials eignen sich bevorzugt folgende Prozesse:

- Chemische Oxidentfernung, insbesondere durch ein
  - gasförmiges Reduktionsmittel und/oder
  - flüssiges Reduktionsmittel
- Physikalische Oxidentfernung, insbesondere mit Plasma,
- Ion Assisted Chemical Etching, insbesondere
  - Fast Ion Bombardement (FAB, Sputtern),
  - Schleifen und/oder
  - Polieren.

**[0029]** Zur Abscheidung, daher Synthese des Grundmaterials und/oder der Schutzschicht, kommen folgende Prozesse in Frage

- Physikalische Gasphasenabscheidungen (engl.: physical vapour deposition, PVD)
- Chemische Gasphasenabscheidungen (engl.: chemical vapour deposition, CVD)
- Galvanische Verfahren
- Sol-Gel Verfahren

**[0030]** Die erfindungsgemäßen Systeme aus Grundschicht und Schutzschicht werden als Schichtsysteme konzipiert und stellen insbesondere ein System dar, das sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Dadurch wird bei gegenüber Raumtemperatur erhöhter Temperatur eine Interdiffusion, vorzugsweise zumindest überwiegend, insbesondere ausschließlich, eine Diffusion des Schutzmaterials in das Grundmaterial, zwischen Grundmaterial und Schutzmaterial bewirkt.

**[0031]** Die erfindungsgemäßen Systeme sind insbesondere als Diffusionspaar ausgelegt. Die beschriebenen Phasendiagramme sowie etwaige Phasendiagramme der vorgenannten Materialkombinationen stellen Gleichgewichtszustände mehrerer Phasen bei unterschiedlichen Temperaturen und Konzentrationen dar. Die Schlüsse, die man aus Gleichgewichtsdigrammen wie den Phasendiagrammen in Bezug auf kinetische Prozesse wie Diffusion ziehen kann, sind sehr be-

schränkt. Grundsätzlich erlauben Gleichgewichtsdiagramme keine Aussage über kinetische Prozesse. Die Phasendiagramme dienen daher ausschließlich dazu, eine Abschätzung zu treffen, ob sich das Schutzmaterial generell bei einer gewissen Temperatur im Grundmaterial lösen könnte. Soweit es während des Diffusionsprozesses des Schutzmaterials in das Grundmaterial zu lokalen Konzentrationsanhäufungen kommt, welche die Löslichkeit des Schutzmaterials im Grundmaterial überschreiten und damit zu einer möglichen Entmischung, Phasenbildung oder ähnlichem führen, wird dies bei der nachfolgenden Beschreibung vernachlässigt. Im weiteren Verlauf wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Diffusion des Schutzmaterials in das Grundmaterial so schnell erfolgt, dass bei gegebener Temperatur zu keinem Zeitpunkt in keinem Punkt des Grundmaterials die maximale Löslichkeit an Schutzmaterial überschritten wird. Dies wird erfindungsgemäß insbesondere erreicht, je größer die Löslichkeit des Schutzmaterials im Grundmaterial bei gegebener Temperatur ist, je schneller das Schutzmaterial im Grundmaterial diffundiert und/oder je geringer der Übergang an Schutzmaterial in das Grundmaterial in der Grenzfläche Schutzmaterial-Grundmaterial sind.

**[0032]** Die abgebildeten und beschriebenen Phasendiagramme wurden metallurgisch ermittelt. Manche Komponenten besitzen eine sehr geringe Löslichkeit in der jeweils zweiten Komponente, so dass die Löslichkeitsgrenze auf Grund der Darstellung kaum erkennbar ist.

**[0033]** Um den erfindungsgemäßen Gedanken besser beschreiben zu können, wird der erfindungsgemäße Gedanke an mehreren, möglichst einfachen Systemen beschrieben. Als Grundmaterial wird das technisch sehr wichtige und bisher sehr schwer zu bondende Material Aluminium verwendet. Es handelt sich daher beim Grundmaterial nach der Abscheidung auf der Bondseite des Substrats um ein Einkomponenten-Einphasensystem.

**[0034]** Als Schutzmaterialien für die Schutzschicht werden nachfolgend beispielhaft vier wichtige Materialien vorgestellt, welche die erfindungsgemäß notwendigen Eigenschaften besitzen, nämlich Germanium, Gallium, Zink und Magnesium. Es handelt sich daher beim Schutzmaterial nach der Abscheidung ebenfalls um ein Einkomponenten-Einphasensystem. Die vorgenannten Materialkombination sind erfindungsgemäß bevorzugt, wobei auf die nachfolgend beschriebenen Beispiele mit den genannten Vorteilen bezogen auf die individuelle Materialkombination verwiesen wird.

**[0035]** Das System Grundmaterial-Schutzmaterial der Bondschicht ist demnach ein Schichtsystem, welches vorzugsweise während des Bondprozesses durch einen Lösungsprozess in ein Zweikomponenten-Einphasensystem überführt wird. Dabei entsteht vorzugsweise ein Mischkristall aus Grundmaterial und Schutzmaterial. Der Bondprozess selbst findet entweder in einer Inertgasatmosphäre, bevorzugter allerdings im Vakuum statt.

**[0036]** In einer vorteilhaften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sind Ausscheidungen erwünscht, insbesondere indem nach dem (erfolgreichen) Bondvorgang mindestens eine Wärmebehandlung erfolgt, um durch zumindest teilweise, insbesondere überwiegende, vorzugsweise vollständige, Ausscheidung des Schutzmaterials aus dem Grundmaterial ein Zweikomponenten-Zweiphasensystem zu erzeugen.

**[0037]** Nachfolgend wird an Hand vorteilhafter Ausführungsbeispiele die Erfindung erläutert, wobei die Ausführungsbeispiele jeweils für sich betrachtet eigenständige Erfindungsaspekte sein können, die als separate Erfindungen offenbart und beanspruchbar sein sollen, insbesondere in Kombination mit der obigen allgemeinen Offenbarung.

## ERSTES AUSFÜHRUNGSBEISPIEL

**[0038]** Ein erstes System, an dem der erfindungsgemäße Gedanke angewandt werden kann ist das System Aluminium-Germanium, kurz Al-Ge. Das binäre System Al-Ge ist ein rein eutektisches System mit einer teilweisen Randlöslichkeit für Germanium in Aluminium und einer verschwindend geringen Randlöslichkeit von Aluminium in Germanium. Als Grundmaterial wird daher das Aluminium gewählt.

**[0039]** Um das Aluminium vor Oxidation zu schützen, wird es nach der erfolgreichen Abschei-

dung auf dem Substrat sofort mit einer Germaniumschicht als Schutzschicht bedeckt. Germanium ist daher das erfindungsgemäße Schutzmaterial.

**[0040]** Die Germaniumschicht ist insbesondere kleiner als  $10\mu\text{m}$ , mit Vorzug kleiner als  $1\mu\text{m}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $100\text{nm}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $10\text{nm}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $1\text{nm}$ .

**[0041]** Die Abscheidung erfolgt bei möglichst geringen Temperaturen, um eine teilweise oder sogar vollständige Diffusion des Germaniums bei erhöhter Temperatur in das Aluminium zu verhindern oder zumindest zu unterdrücken.

**[0042]** Die Temperatur des Aluminiums ist bei der Abscheidung des Germaniums kleiner als  $600^\circ\text{C}$ , mit Vorzug kleiner als  $500^\circ\text{C}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $400^\circ\text{C}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $300^\circ\text{C}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $200^\circ\text{C}$ , am bevorzugtesten kleiner als  $100^\circ\text{C}$ . In besonderen Fällen kann das Aluminium sogar aktiv gekühlt werden um die Temperatur weiter zu senken. Durch die möglichst niedrige Temperatur wird ein auf dem Aluminium abgedehntes Germanium sofort in seiner thermischen Bewegung behindert und verbleibt vorzugsweise an der Oberfläche, diffundiert daher nicht in das Aluminium.

**[0043]** Des Weiteren wird durch die besonders geringe Löslichkeit des Germaniums im Aluminium bei niedrigen Temperaturen die Diffusion des Germaniums in das Aluminium erschwert. Germanium dient ab diesem Zeitpunkt als Schutzmaterial für das Aluminium. Wird das System einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre ausgesetzt, oxidiert zumindest überwiegend, vorzugsweise vollständig, das Germanium und dieses schützt somit das Aluminium vor Oxidation, indem es das Aluminium gegenüber der Atmosphäre abdichtet.

**[0044]** Zu beachten ist hierbei, dass das Standardelektrodenpotential von Germanium ca.  $0.12\text{V}$ , das des Aluminiums ca.  $-1.66\text{V}$  beträgt. Germanium ist daher edler als Aluminium und ist demzufolge nicht in der Lage, Aluminium chemisch als Opferanode zu schützen. Dementsprechend wird die Germaniumschicht aufgebracht, um eine physikalische Barriere zwischen dem Aluminium und der Atmosphäre aufzubauen.

**[0045]** Um einen Bond zwischen Aluminium und einem gewünschten zweiten Material durchzuführen, werden zuerst die allfällig gebildeten Germaniumoxide vom Germanium entfernt. Die Entfernung der Germaniumoxide erfolgt auf physikalischem und/oder chemischem Wege. Denkbar ist ein Abspüttern der Oxide, eine nasschemische Entfernung durch reduzierende Säuren, eine Reduktion durch Wasserstoff oder andere gasförmige Reduktionsmittel. Nach der Entfernung der Germaniumoxide erfolgt möglichst schnell die Kontaktierung der reinen Germaniumoberfläche mit der zu bondenden Oberfläche, insbesondere einem analog, insbesondere erfindungsgemäß, aufgebauten Substrat.

**[0046]** Der Bondprozess erfolgt bei gegenüber Raumtemperatur erhöhter Bondtemperatur. Die Bondtemperatur ist dabei insbesondere größer als  $25^\circ\text{C}$ , mit Vorzug größer als  $100^\circ\text{C}$ , mit größerem Vorzug größer als  $200^\circ\text{C}$ , mit größtem Vorzug größer als  $300^\circ\text{C}$ , mit allergrößtem Vorzug größer als  $400^\circ\text{C}$ , am bevorzugtesten um die  $426^\circ\text{C}$ . Aluminium besitzt laut Phasendiagramm bei ca.  $426^\circ\text{C}$  die größte Löslichkeit für Germanium von ca.  $2.5\text{ Mol \%}$ . Erfindungsgemäß wird in bevorzugter Ausführung die Ausbildung einer flüssigen, eutektischen Phase im Grenzbereich verhindert, indem die bevorzugte Bondtemperatur unterhalb der eutektischen Temperatur, insbesondere zwischen  $400^\circ\text{C}$ -  $420^\circ\text{C}$ , liegt. In diesem Temperaturbereich ist die Löslichkeit des Germaniums im Aluminium immer noch hoch genug, um eine Lösung des Germaniums im Aluminium zu begründen. Erfindungsgemäß wird die Bondtemperatur während des Bondprozesses bis zum zumindest überwiegenden, vorzugsweise vollständigen, Lösen des Germaniums im Aluminium bei dieser Temperatur konstant gehalten.

**[0047]** Die für das Lösen benötigte Zeit kann durch die Lösung der eindimensionalen Diffusionsgleichung bei Kenntnis der Diffusionskonstanten von Germanium in Aluminium berechnet werden. Dennoch kann es notwendig und sinnvoll sein, die Temperatur kürzer oder länger zu halten. Die Zeitspanne zum Lösen des Germaniums im Aluminium wird erfindungsgemäß insbesondere größer als  $1\text{ Minute}$ , mit Vorzug größer als  $10\text{ Minuten}$ , mit größerem Vorzug größer als  $30\text{ Minu-}$

ten, mit größtem Vorzug größer als 1 Stunde, mit allergrößtem Vorzug größer als 2 Stunden, am bevorzugtesten größer als 5 Stunden, eingestellt.

**[0048]** Während des Lösungsvorgangs wird mit Vorzug der Druck auf die miteinander zu bondenden Substrat aufrechterhalten oder erhöht. Der auf die Bondschicht einwirkende Druck ist insbesondere größer als 1 Pa, mit Vorzug größer als 100 Pa, mit größerem Vorzug größer als 10000 Pa, mit größtem Vorzug größer als 1 MPa, mit allergrößtem Vorzug größer als 10 MPa, am bevorzugtesten größer als 100 MPa. Die verwendeten Kräfte, insbesondere bezogen auf Standardwafer, sind größer als 10 N, mit Vorzug größer als 100 N, mit größtem Vorzug größer als 1000 N, mit allergrößtem Vorzug größer als 10000 N, am bevorzugtesten größer als 100000 N.

**[0049]** Während des Lösungsvorgangs löst sich das Germanium bevorzugt im gesamten Aluminium auf. Auf Grund der Tatsache, dass die Menge an aufzulösendem Germanium sehr gering, gleichzeitig die Menge des lösenden Aluminiums sehr groß ist, ist die Gesamtkonzentration des Germaniums im Aluminium sehr klein. Die Gesamtkonzentration des Germaniums im Aluminium ist insbesondere kleiner als 1 mol %, mit Vorzug kleiner als  $10^{-3}$  mol %, mit Vorzug kleiner als  $10^{-5}$  mol %, mit größtem Vorzug kleiner als  $10^{-7}$  mol %. Das Germanium löst sich mit Vorzug nicht nur ausschließlich in der oberflächennahen Region des Aluminiums sondern diffundiert möglichst tief in das Aluminium, mit Vorzug so tief, dass man nach einer gewissen Zeit eine Gleichverteilung des Germaniums im Aluminium erreicht hat.

**[0050]** In einer ersten erfindungsgemäßen Vorgehensweise wird dafür gesorgt, dass es während des Abkühlungsprozesses nicht zur Überschreitung der Randlöslichkeit des Germaniums im Aluminium kommt, sodass Germanium immer vollständig im Aluminium gelöst bleibt. Dadurch wird die Ausscheidung von Germanium in der Aluminiummatrix im gesamten Temperaturbereich verhindert. Dies wird erfindungsgemäß realisiert, indem ein erfindungsgemäßes Verhältnis von Aluminiumschichtdicke zu Germaniumschichtdicke gewählt wird und der Diffusionsprozess eine bestimmte Zeit läuft, bis das Germanium insbesondere überwiegend, vorzugsweise vollständig, und vor allem über den gesamten zur Verfügung stehenden Raum im Aluminium verteilt wird. Das Verhältnis zwischen der Germaniumschichtdicke und Aluminiumschichtdicke ist dabei kleiner als 1, mit Vorzug kleiner als  $10^{-3}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $10^{-5}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $10^{-7}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $10^{-9}$ , am bevorzugtesten kleiner als  $10^{-11}$ .

**[0051]** In einer alternativen erfindungsgemäßen Vorgehensweise wird die Germaniumschichtdicke so eingestellt, dass bei höheren Temperaturen eine, insbesondere zumindest überwiegende, vorzugsweise vollständige, Lösung des Germaniums erfolgt, beim Abkühlen allerdings ein übersättigter Mischkristall entsteht, der zu Germaniumausscheidungen führt. Diese Germaniumausscheidungen können die Festigkeitseigenschaften des Aluminiums positiv beeinflussen. Mit Vorzug führen sie zu einer Festigkeitssteigerung des Aluminiums, insbesondere in Kombination mit einer zusätzlichen Wärmebehandlung.

## ZWEITES AUSFÜHRUNGSBEISPIEL

**[0052]** Ein zweites System, an dem der erfindungsgemäße Gedanke angewandt werden kann, ist Aluminium-Gallium, kurz Al-Ga. Das binäre System Aluminium-Gallium ist ein rein eutektisches System mit einer sehr starken Entartung. Die eutektische Konzentration liegt sehr nahe an der Konzentration des reinen Galliums.

**[0053]** Die Randlöslichkeit des Galliums in Aluminium ist außergewöhnlich hoch und erreicht ihr Maximum von ca. 7.5-8.0 Mol-% bei Temperaturen um die 125°C. Die Randlöslichkeit von Aluminium in Gallium ist dagegen verschwindend gering.

**[0054]** Als Grundmaterial wird daher erfindungsgemäß das Aluminium gewählt. Um das Aluminium vor Oxidation zu schützen, wird es nach der erfolgreichen Abscheidung sofort mit einer Gallium Schicht bedeckt. Die Galliumschicht wird insbesondere kleiner als 10  $\mu\text{m}$ , mit Vorzug kleiner als 1  $\mu\text{m}$ , mit größerem Vorzug kleiner als 100 nm, mit größtem Vorzug kleiner als 10nm, mit allergrößtem Vorzug kleiner als 1nm ausgebildet.

**[0055]** Die Abscheidung erfolgt bei möglichst geringen Temperaturen, um eine teilweise oder sogar vollständige Diffusion des Galliums bei erhöhter Temperatur in das Aluminium zu verhindern oder zumindest zu unterdrücken. Gallium besitzt einen sehr geringen Schmelzpunkt von ca. 30°C. Um zu verhindern, dass die auf das Aluminium aufgebrachte Galliumschicht verflüssigt, wird eine Temperatur unterhalb von 30°C eingestellt. Erfindungsgemäß denkbar wäre es allerdings auch, dass das Gallium bei höheren Temperaturen in flüssiger Form auf dem Aluminium verbleibt, ohne die Handhabung des gesamten Wafers zu erschweren. Der Grund dürfte vor allem in der extrem geringen Menge an abgeschiedenem Gallium liegen, welches eine genügend hohe Oberflächenspannung und eine genügend hohe Adhäsion zum Aluminium aufweist, um als flüssiger Metallfilm weiter zu existieren.

**[0056]** Bei der zweiten Ausführungsform ist es erfindungsgemäß vorgesehen, dass das Gallium bei moderaten Temperaturen in das Aluminium diffundiert. Daher wird der anschließende Bondprozess möglichst kurz nach der Bedeckung der Grundschicht mit der Schutzschicht durchgeführt.

**[0057]** Die Temperatur des Aluminiums ist bei der Abscheidung des Galliums kleiner als 300°C, mit Vorzug kleiner als 200°C, mit größerem Vorzug kleiner als 100°C, mit größtem Vorzug kleiner als 50°C, mit allergrößtem Vorzug kleiner als 30°C, am bevorzugtesten kleiner als 0°C. In besonderen Fällen kann das Aluminium sogar aktiv gekühlt werden um die Temperatur weiter zu senken. Wird das System einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre ausgesetzt, oxidiert mit Vorzug das Gallium und schützt somit das Aluminium.

**[0058]** Zu beachten ist hierbei, dass das Standardelektrodenpotential von Gallium ca. -0.53V, das des Aluminiums ca. -1.66V beträgt. Gallium ist daher edler als Aluminium und ist dem zu Folge nicht in der Lage, Aluminium chemisch als Opferanode zu schützen. Dementsprechend dicht wird die Galliumschicht aufgebracht, um eine physikalische Barriere zwischen dem Aluminium und der Atmosphäre aufzubauen.

**[0059]** Die Randlöslichkeit von Gallium in Aluminium ist auch bei Raumtemperatur noch extrem hoch, wenn nicht sogar knapp am Maximum von den bereits genannten 7.5-8.0 Mol %. Die Randlöslichkeit des Galliums im Aluminium nimmt erst unterhalb der Raumtemperatur wieder ab. Eine Ausscheidung von gelöstem Gallium in Aluminium kann daher bei dieser Ausführung der Erfindung vermieden werden.

**[0060]** Durch die besonders hohe Löslichkeit des Galliums in Aluminium, insbesondere auch noch bei Raumtemperatur, eignet sich das Material Gallium besonders dafür, in Aluminium gelöst zu werden. Erfindungsgemäß werden die Prozessparameter so eingestellt, dass die Konzentration des Galliums im Aluminium zu jeder Zeit kleiner ist als die Randlöslichkeit, da sonst ein Zweiphasensystem aus einem Aluminiummischkristall mit Gallium und einer flüssigen Phase entstehen kann. Dies würde dazu führen, dass der Bond nicht mehr durchführbar ist, da die flüssige Phase auch noch bei Raumtemperatur existent ist.

**[0061]** Andererseits sind gerade der niedrige Schmelzpunkt und die Möglichkeit, sich bei extrem geringen Temperaturen zu verflüssigen, eine optimale Voraussetzung für einen späteren Bondprozess. Durch geringste Temperaturerhöhungen wird Gallium an der Oberfläche des Aluminiums verflüssigt und passt sich so als flüssige Phase den Konturen der beiden miteinander zu verbindenden Oberflächen an. Obwohl es der eigentliche erfindungsgemäße Gedanke der Erfindung ist, das Gallium im Aluminium zu lösen, ist die Fähigkeit zur Verflüssigung bei niedrigen Temperaturen zur Unterstützung des Bondvorganges vor dem eigentlichen Lösungsvorgang als eigenständiger Erfindungsaspekt hierdurch offenbart.

**[0062]** Um einen Bond zwischen Aluminium und einem gewünschten zweiten Material durchzuführen, werden zuerst die allfällig gebildeten Galliumoxide vom Gallium entfernt. Gallium überzieht sich genauso wie Aluminium mit einer dichten Oxidschicht und wird dadurch passiviert. Mit Wasser bildet Gallium eine Galliumhydroxidschicht. Die Entfernung der Galliumoxide erfolgt auf physikalischem und/oder chemischem Wege.

**[0063]** Denkbar ist ein Abspattern der Oxide, eine nasschemische Entfernung durch reduzie-

rende Säuren und/oder Laugen, eine Reduktion durch Wasserstoff oder andere gasförmige Reduktionsmittel. Nach der Entfernung der Galliumoxide erfolgt möglichst schnell die Kontaktierung der reinen Galliumoberfläche mit der zu bondenden Oberfläche, insbesondere einem analog, insbesondere erfindungsgemäß, aufgebauten Substrat.

**[0064]** Der Bondprozess erfolgt bei gegenüber Raumtemperatur erhöhter Temperatur. Die Bondtemperatur ist dabei insbesondere größer als 25°C, mit Vorzug größer als 100°C, mit größerem Vorzug größer als 200°C, mit größtem Vorzug größer als 300°C, mit allergrößtem Vorzug größer als 400°C, am bevorzugtesten um die 426°C. Aluminium besitzt laut Phasendiagramm zwischen 77°C und 177°C die größte Löslichkeit für Germanium von ca. 8 Mol-%.

**[0065]** Das Verhindern der Ausbildung einer flüssigen, eutektischen Phase im Grenzbereich wird bei einem Al-Ga-Diffusionspaar sehr schwierig. Da die Lösung des Galliums im Aluminium erfindungsgemäß bevorzugt ist und die Diffusion möglichst rasch von statten gehen soll, wird eine kurzzeitige Existenz einer flüssigen Phase erfindungsgemäß in Kauf genommen. Erfindungsgemäß wird die Bondtemperatur während des Bondprozesses bis zum zumindest überwiegenden, vorzugsweise vollständigen, Lösen des Galliums im Aluminium bei dieser Temperatur konstant gehalten.

**[0066]** Die benötigte Zeit kann durch die Lösung der eindimensionalen Diffusionsgleichung bei Kenntnis der Diffusionskonstanten von Gallium in Aluminium berechnet werden. Dennoch kann es notwendig und sinnvoll sein, die Temperatur kürzer oder länger zu halten. Die Zeitspanne zum Lösen des Galliums im Aluminium ist dabei größer als 1 Minute, mit Vorzug größer als 10 Minuten, mit größerem Vorzug größer als 30 Minuten, mit größtem Vorzug größer als 1 Stunde, mit allergrößtem Vorzug größer als 2 Stunden, am bevorzugtesten größer als 5 Stunden.

**[0067]** Während des Lösungsvorgangs wird mit Vorzug der Druck auf die miteinander zu bondenden Substrat aufrechterhalten, oder sogar erhöht. Der einwirkende Druck ist insbesondere größer als 1 Pa, mit Vorzug größer als 100 Pa, mit größerem Vorzug größer als 10000 Pa, mit größtem Vorzug größer als 1 MPa, mit allergrößtem Vorzug größer als 10 MPa, am bevorzugtesten größer als 100 MPa. Die verwendeten Kräfte, insbesondere bezogen auf Standardwafer, sind größer als 10 N, mit Vorzug größer als 100 N, mit größtem Vorzug größer als 1000 N, mit allergrößtem Vorzug größer als 10000 N, am bevorzugtesten größer als 100000 N.

**[0068]** Während des Lösungsvorganges löst sich das Gallium bevorzugt im gesamten Aluminium auf. Auf Grund der Tatsache, dass die Menge an aufzulösendem Gallium sehr gering, die Menge des lösenden Aluminiums allerdings sehr groß ist, ist die Gesamtkonzentration des Galliums im Aluminium sehr klein. Die Gesamtkonzentration des Galliums im Aluminium ist insbesondere kleiner als 10 mol %, mit Vorzug kleiner als 5 mol %, mit Vorzug kleiner als 1 mol %, mit größtem Vorzug kleiner als  $10^{-3}$  mol %. Das Gallium löst sich mit Vorzug nicht nur ausschließlich in der oberflächennahen Region des Aluminiums sondern diffundiert möglichst tief in das Aluminium, mit Vorzug so tief, dass man nach einer gewissen Zeit eine Gleichverteilung des Gallium im Aluminium erreicht hat.

**[0069]** In einer erfindungsgemäßen Vorgehensweise wird nun dafür gesorgt, dass es während des Abkühlungsprozesses niemals zur Überschreitung der Randlöslichkeit des Galliums im Aluminium kommt, sodass das Gallium immer vollständig im Aluminium gelöst bleibt. Dadurch wird die Ausscheidung von Gallium in der Aluminiummatrix im gesamten Temperaturbereich verhindert. Im System Al-Ga ist das technisch sehr einfach zu bewerkstelligen, da die Änderung der Randlöslichkeit vom Gallium im Aluminium im Temperaturbereich zwischen ca. 130°C und Raumtemperatur marginal ist, daher sich nicht besonders stark ändert. Dadurch besteht während des Abkühlprozesses praktisch keine Gefahr, dass es zu einer (nennenswerten) Ausscheidung von Gallium im Aluminium kommt. Das Verhältnis zwischen der Galliumschichtdicke und Aluminiumschichtdicke ist dabei kleiner als 1, mit Vorzug kleiner als  $10^{-3}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $10^{-5}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $10^{-7}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $10^{-9}$ , am bevorzugtesten kleiner als  $10^{-11}$ .

## DRITTES AUSFÜHRUNGSBEISPIEL

**[0070]** Ein drittes System, an dem der erfindungsgemäße Gedanke angewandt werden kann ist das System Aluminium-Zink, kurz Al-Zn. Das binäre System Aluminium-Zink ist binäres System, das ein zinkreiches Eutektikum und ein zinkreiches Eutektoid besitzt. Für den erfindungsgemäßen Gedanken sind insbesondere die Randlöslichkeiten der Systempartner von Bedeutung. Laut des Phasendiagramms Al-Zn besitzt Aluminium eine Randlöslichkeit für Zink und Zink eine, wenn auch geringe, Randlöslichkeit für Aluminium. Da Aluminium bevorzugt als Grundmaterial und Zink bevorzugt als Schutzschicht verwendet wird, ist nur die aluminiumreiche Seite des Phasendiagramms von Bedeutung.

**[0071]** Um das Aluminium vor Oxidation zu schützen wird es nach der erfolgreichen Abscheidung auf dem Substrat sofort mit einer Zinkschicht als Schutzschicht bedeckt. Zink ist somit das Schutzmaterial zum Schutz der Grundschicht vor Oxidation.

**[0072]** Die Zinkschicht ist insbesondere kleiner als  $10\mu\text{m}$ , mit Vorzug kleiner als  $1\mu\text{m}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $100\text{nm}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $10\text{nm}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $1\text{nm}$ .

**[0073]** Die Abscheidung erfolgt bei möglichst geringen Temperaturen, um eine teilweise oder sogar vollständige Diffusion des Zinks bei erhöhter Temperatur in das Aluminium zu verhindern oder zumindest zu unterdrücken.

**[0074]** Die Temperatur des Aluminiums ist bei der Abscheidung des Zinks kleiner als  $600^\circ\text{C}$ , mit Vorzug kleiner als  $500^\circ\text{C}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $400^\circ\text{C}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $300^\circ\text{C}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $200^\circ\text{C}$ , am bevorzugtesten kleiner als  $100^\circ\text{C}$ . In besonderen Fällen kann das Aluminium sogar aktiv gekühlt werden, um die Temperatur weiter zu senken. Durch die möglichst niedrige Temperatur wird das auf dem Aluminium abgeschiedene Zink sofort in seiner thermischen Bewegung behindert und verbleibt vorzugsweise an der Oberfläche, diffundiert daher nicht in das Aluminium.

**[0075]** Des Weiteren wird durch die besonders geringe Löslichkeit des Zinks im Aluminium bei niedrigen Temperaturen die Diffusion des Zinks in das Aluminium erschwert. Zink dient ab diesem Zeitpunkt als Schutzmaterial für das Aluminium. Wird das System einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre ausgesetzt, oxidiert zumindest überwiegend, vorzugsweise vollständig das Zink und dieses schützt somit das Aluminium vor Oxidation, insbesondere indem es das Aluminium gegenüber der Atmosphäre abdichtet.

**[0076]** Zu beachten ist hierbei, dass das Standardelektrodenpotential von Zink ca.  $-0.76\text{V}$ , das des Aluminium ca.  $-1.66\text{V}$  beträgt. Zink ist daher edler als Aluminium und ist dem zu Folge nicht in der Lage, Aluminium chemisch als Opferanode zu schützen. Dementsprechend wird die Zinkschicht aufgebracht, um eine physikalische Barriere zwischen Aluminium und der Umgebung, insbesondere der Atmosphäre, aufzubauen.

**[0077]** Um einen Bond zwischen Aluminium und einem gewünschten zweiten Material durchzuführen, werden zuerst die allfällig gebildeten Zinkoxide vom Zink entfernt. Die Entfernung der Zinkoxide erfolgt insbesondere auf physikalischem und/oder chemischem Wege. Erfindungsgemäß denkbar ist ein Absputtern der Oxide, eine nasschemische Entfernung durch reduzierende Säuren, eine Reduktion durch Wasserstoff oder andere gasförmige Reduktionsmittel, insbesondere Kohlenmonoxid.

**[0078]** Nach der Entfernung der Zinkoxide erfolgt möglichst schnell die Kontaktierung der reinen Zinkoberfläche mit der zu bondenden Oberfläche. Der Bondprozess erfolgt bei gegenüber Raumtemperatur erhöhter Temperatur. Die Bondtemperatur ist dabei größer als  $25^\circ\text{C}$ , mit Vorzug größer als  $100^\circ\text{C}$ , mit größerem Vorzug größer als  $200^\circ\text{C}$ , mit größtem Vorzug größer als  $300^\circ\text{C}$ , mit allergrößtem Vorzug größer als  $400^\circ\text{C}$ , am bevorzugtesten um die  $380^\circ\text{C}$ . Zink besitzt laut Phasendiagramm zwischen ca.  $350^\circ\text{C}$  und ca.  $380^\circ\text{C}$  einen extrem großen Bereich mit einer hohen Löslichkeit für Zink in Aluminium.

**[0079]** Erfindungsgemäß wird die Menge an abgeschiedenem Zink so gering eingestellt, dass

sich nach der vollständigen und vor allem gleichmäßigen Verteilung des Zink im Aluminium keine Konzentrationen in einem Bereich über 1 Mol-% Zink, geschweige denn 50-60 Mol % Zink einstellen werden. Der große Löslichkeitsbereich ist gut dafür geeignet, allfällige lokale Konzentrationsüberhöhungen zu vermeiden, ohne den erfindungsgemäß erwünschten Konzentrationsbereich eines Mischkristalls zu verlassen. Durch eine entsprechend lange thermische Behandlung wird sich eine etwaige Konzentrationsüberhöhung des Zink im Aluminium durch eine gleichmäßige Verteilung des Zink im Aluminium wieder abbauen, sodass die abschließende, vor dem Abkühlprozess erreichte, Endkonzentration des Zink im Aluminium vorzugsweise unter der Randlöslichkeit des Zinks im Aluminium bei Raumtemperatur liegt.

**[0080]** Erfindungsgemäß hält man daher bevorzugt während des Bondprozesses das System für die Zeitspanne, die benötigt wird um das gesamte Zink im Aluminium zu lösen, innerhalb dieses Temperaturbereichs. Dennoch ist bereits bei ca. 280°C die Randlöslichkeit des Zinks in Aluminium groß genug, um den erfindungsgemäßen Prozess durchzuführen. Die benötigte Zeit kann durch die Lösung der eindimensionalen Diffusionsgleichung bei Kenntnis der Diffusionskonstanten von Zink in Aluminium berechnet werden. Dennoch kann es erfindungsgemäß sinnvoll sein, die Temperatur kürzer oder länger zu halten.

**[0081]** Die Zeitspanne zum Lösen des Zinks im Aluminium wird insbesondere größer als 1 Minute, mit Vorzug größer als 10 Minuten, mit größerem Vorzug größer als 30 Minuten, mit größtem Vorzug größer als 1 Stunde, mit allergrößtem Vorzug größer als 2 Stunden, am bevorzugtesten größer als 5 Stunden, eingestellt.

**[0082]** Während des Lösungsvorgangs wird mit Vorzug der Druck auf die miteinander zu bondenden Substrat aufrechterhalten oder erhöht. Der einwirkende Druck ist insbesondere größer als 1 Pa, mit Vorzug größer als 100 Pa, mit größerem Vorzug größer als 10000 Pa, mit größtem Vorzug größer als 1 MPa, mit allergrößtem Vorzug größer als 10 MPa, am bevorzugtesten größer als 100 MPa. Die verwendeten Kräfte, insbesondere bezogen auf Standardwafer, sind größer als 10 N, mit Vorzug größer als 100 N, mit größtem Vorzug größer als 1000 N, mit allergrößtem Vorzug größer als 10000 N, am bevorzugtesten größer als 100000 N.

**[0083]** Während des Lösungsvorganges löst sich das Zink bevorzugt im gesamten Aluminium auf. Auf Grund der Tatsache, dass die Menge an aufzulösendem Zinks sehr gering, die Menge des lösenden Aluminiums allerdings sehr groß ist, ist die Gesamtkonzentration des Zinks im Aluminium sehr klein. Das Zink löst sich mit Vorzug nicht nur ausschließlich in der oberflächennahen Region des Aluminiums sondern diffundiert möglichst tief in das Aluminium, mit Vorzug so tief, dass man nach einer gewissen Zeit eine Gleichverteilung des Zinks im Aluminium erreicht hat.

**[0084]** In einer ersten erfindungsgemäßen Vorgehensweise wird nun dafür gesorgt, dass es während des Abkühlungsprozesses nicht zur Überschreitung der Randlöslichkeit des Zinks im Aluminium kommt, sodass Zink immer vollständig im Aluminium gelöst bleibt. Dadurch wird die Ausscheidung von Zink in der Aluminiummatrix im gesamten erfindungsgemäßen Temperaturbereich verhindert. Dies wird erfindungsgemäß realisiert, indem man ein erfindungsgemäßes Verhältnis von Aluminiumschichtdicke zu Zinkschichtdicke gewählt wird und der Diffusionsprozess eine bestimmte Zeit läuft, bis das Zink vollständig, insbesondere im gesamten zur Verfügung stehenden Raum, im Aluminium verteilt ist. Das Verhältnis zwischen der Zinkschichtdicke und Aluminiumschichtdicke ist dabei kleiner als 1, mit Vorzug kleiner als  $10^{-3}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $10^{-5}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $10^{-7}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $10^{-9}$ , am bevorzugtesten kleiner als  $10^{-11}$ .

**[0085]** Gemäß einer weiteren erfindungsgemäßen Vorgehensweise wird die Zinkschichtdicke so eingestellt, dass bei höheren Temperaturen eine, insbesondere zumindest überwiegende, vorzugsweise vollständige, Lösung des Zinks im Aluminium erfolgt, beim Abkühlen allerdings ein übersättigter Mischkristall entsteht, der zu Zinkausscheidungen führt. Diese Zinkausscheidungen können die Festigkeitseigenschaften des Aluminiums positiv beeinflussen. Mit Vorzug führen sie zu einer Festigkeitssteigerung des Aluminiums, insbesondere in Kombination mit einer Wärmebehandlung.

## VIERTES AUSFÜHRUNGSBEISPIEL

**[0086]** Ein viertes System, an dem der erfindungsgemäße Gedanke angewandt werden kann, ist das System Aluminium-Magnesium, kurz Al-Mg. Das binäre System Al-Mg ist ein aus zwei Eutektika bestehendes binäres System mit Randlöslichkeit für Magnesium in Aluminium, sowie einer Randlöslichkeit für Aluminium in Magnesium. Als Grundmaterial wird bevorzugt das Aluminium gewählt.

**[0087]** Um das Aluminium vor Oxidation zu schützen, wird es nach der erfolgreichen Abscheidung des Magnesiummaterials sofort mit einer Magnesiumschicht bedeckt. Magnesium ist, vor allem in seiner reinen Form, ein sehr reaktives Erdalkalimetall.

**[0088]** Die Magnesiumschicht ist insbesondere kleiner als  $10\mu\text{m}$ , mit Vorzug kleiner als  $1\mu\text{m}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $100\text{nm}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $10\text{nm}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $1\text{nm}$ .

**[0089]** Die Abscheidung erfolgt bei möglichst geringen Temperaturen, um eine teilweise oder sogar vollständige Diffusion des Magnesiums bei erhöhter Temperatur in das Aluminium zu verhindern oder zumindest zu unterdrücken.

**[0090]** Die Temperatur des Aluminiums ist bei der Abscheidung des Magnesiums kleiner als  $600^\circ\text{C}$ , mit Vorzug kleiner als  $500^\circ\text{C}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $400^\circ\text{C}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $300^\circ\text{C}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $200^\circ\text{C}$ , am bevorzugtesten kleiner als  $100^\circ\text{C}$ . In besonderen Fällen kann das Aluminium sogar aktiv gekühlt werden um die Temperatur weiter zu senken. Durch die möglichst niedrige Temperatur wird ein auf dem Aluminium abgeschiedenes Magnesium sofort in seiner thermischen Bewegung behindert und verbleibt vorzugsweise an der Oberfläche, diffundiert daher nicht in das Aluminium.

**[0091]** Des Weiteren wird durch die besonders geringe Löslichkeit des Magnesiums im Aluminium bei niedrigen Temperaturen die Diffusion des Magnesiums in das Aluminium erschwert. Magnesium dient ab diesem Zeitpunkt als Schutzmaterial für das Aluminium. Wird das System einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre ausgesetzt, oxidiert mit Vorzug das Magnesium und schützt somit das Aluminium.

**[0092]** Zu beachten ist hierbei, dass das Standardelektrodenpotential von Magnesium ca.  $-2.36$ , das des Aluminiums ca.  $-1.66\text{V}$  beträgt. Magnesium ist daher unedler als Aluminium und ist dem zu Folge in der Lage, Aluminium chemisch als Opferanode zu schützen. Denkbar wäre vielleicht sogar, dass das abgeschiedene Magnesium direkt als Reduktionsmittel für bereits zumindest teilweise gebildetes oder nicht vollständig entferntes, Aluminiumoxid verwendet wird. Der Reduktionsprozess kann durch einen eigenen, zusätzlichen Wärmebehandlungsschritt durchgeführt werden und reduziert mit Vorzug das vom Magnesium bedeckte Aluminiumoxid zu reinem Aluminium unter Bildung von Magnesiumoxid. Hierin wird insbesondere ein eigenständiger Erfindungsaspekt gesehen, der in Kombination mit beliebigen weiteren Verfahrensmerkmalen offenbart gelten und beanspruchbar sein soll.

**[0093]** Um einen Bond zwischen Aluminium und einem gewünschten zweiten Material durchzuführen, müssen zuerst die allfällig gebildeten Magnesiumoxide vom Magnesium entfernt werden. Die Entfernung der Magnesiumoxide erfolgt auf physikalischem und/oder chemischem Wege. Erfindungsgemäß denkbar ist ein Absputtern der Oxide, eine nasschemische Entfernung durch reduzierende Säuren, eine Reduktion durch Wasserstoff oder andere gasförmige Reduktionsmittel. Zu bedenken ist hierbei, dass Magnesiumoxide ziemlich stabile Strukturen sein dürften, die auf nasschemischem Weg nur sehr schwer vollständig zu entfernen sind, wodurch sich physikalische Methoden erfindungsgemäß eher eignen.

**[0094]** Nach der Entfernung der Magnesiumoxide erfolgt möglichst schnell die Kontaktierung der reinen Magnesiumoberfläche mit der zu bondenden Oberfläche. Der Bondprozess erfolgt bei erhöhter Temperatur. Die Bondtemperatur ist dabei größer als  $25^\circ\text{C}$ , mit Vorzug größer als  $100^\circ\text{C}$ , mit größerem Vorzug größer als  $200^\circ\text{C}$ , mit größtem Vorzug größer als  $300^\circ\text{C}$ , mit allergrößtem Vorzug größer als  $400^\circ\text{C}$ , am bevorzugtesten um die  $426^\circ\text{C}$ .

**[0095]** Aluminium besitzt laut Phasendiagramm bei ca. 452°C die größte Löslichkeit für Magnesium von ca. 16 Mol %. Möchte man allerdings die Ausbildung einer flüssigen Phase im Grenzbereich verhindern und nur dafür sorgen, dass das feste Magnesium im festen Aluminium gelöst wird, liegt die bevorzugte Bondtemperatur unterhalb der genannten 452°C. In diesem Temperaturbereich ist die Löslichkeit des Magnesiums im Aluminium immer noch hoch genug, um eine merkliche Lösung des Magnesiums im Aluminium zu bewirken. Erfindungsgemäß wird die Temperatur für die Zeit der, insbesondere überwiegenden, vorzugsweise vollständigen, Lösung des Magnesiums im Aluminium gehalten. Die benötigte Zeit kann durch die Lösung der eindimensionalen Diffusionsgleichung bei Kenntnis der Diffusionskonstanten von Magnesium in Aluminium berechnet werden. Erfindungsgemäß kann es sinnvoll sein, die Temperatur kürzer oder länger zu halten.

**[0096]** Die Zeitspanne zum Lösen des Magnesiums im Aluminium wird insbesondere größer als 1 Minute, mit Vorzug größer als 10 Minuten, mit größerem Vorzug größer als 30 Minuten, mit größtem Vorzug größer als 1 Stunde, mit allergrößtem Vorzug größer als 2 Stunden, am bevorzugtesten größer als 5 Stunden, eingestellt.

**[0097]** Während des Lösungsvorgangs wird mit Vorzug der Druck auf die miteinander zu bondenden Substrate aufrechterhalten oder erhöht. Der einwirkende Druck ist insbesondere größer als 1 Pa, mit Vorzug größer als 100 Pa, mit größerem Vorzug größer als 10000 Pa, mit größtem Vorzug größer als 1 MPa, mit allergrößtem Vorzug größer als 10 MPa, am bevorzugtesten größer als 100 MPa. Die verwendeten Kräfte, die auf den Wafer einwirken sind größer als 10 N, mit Vorzug größer als 100 N, mit größtem Vorzug größer als 1000 N, mit allergrößtem Vorzug größer als 10000 N, am bevorzugtesten größer als 100000 N.

**[0098]** Während des Lösungsvorgangs löst sich das Magnesium bevorzugt im gesamten Aluminium auf. Auf Grund der Tatsache, dass die Menge an aufzulösendem Magnesium sehr gering, die Menge des lösenden Aluminiums sehr groß ist, ist die Gesamtkonzentration des Magnesiums im Aluminium sehr klein. Das Magnesium löst sich mit Vorzug nicht nur ausschließlich in der oberflächennahen Region des Aluminiums sondern diffundiert möglichst tief in das Aluminium, mit Vorzug so tief, dass man nach einer gewissen Zeit eine Gleichverteilung des Germaniums im Aluminium erreicht hat.

**[0099]** In einer ersten erfindungsgemäßen Vorgehensweise wird dafür gesorgt, dass es während des Abkühlungsprozesses nicht zu einer Überschreitung der Randlöslichkeit des Magnesiums im Aluminium kommt, sodass Magnesium vollständig im Aluminium gelöst bleibt. Dadurch wird die Ausscheidung einer stöchiometrischen Aluminium-Magnesiumphase in der Aluminiummatrix im gesamten, erfindungsgemäßen Temperaturbereich verhindert. Dies wird erfindungsgemäß realisiert, indem man ein erfindungsgemäßes Verhältnis von Aluminiumschichtdicke zu Magnesiumschichtdicke wählt und dem Diffusionsprozess genug Zeit gibt, das Magnesium vollständig, und vor allem über den gesamten zur Verfügung stehenden Raum, im Aluminium zu verteilen. Das Verhältnis zwischen der Magnesiumschichtdicke und Aluminiumschichtdicke wird insbesondere kleiner als 1, mit Vorzug kleiner als  $10^{-3}$ , mit größerem Vorzug kleiner als  $10^{-5}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $10^{-7}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $10^{-9}$ , am bevorzugtesten kleiner als  $10^{-11}$ , gewählt.

**[00100]** In einer alternativen, erfindungsgemäßen Vorgehensweise wird die Magnesiumschichtdicke so eingestellt, dass bei höheren Temperaturen zwar eine, insbesondere überwiegende, vorzugsweise vollständige, Lösung des Magnesiums erfolgt, beim Abkühlen allerdings ein übersättigter Mischkristall entsteht, der zur Ausscheidung der stöchiometrischen Aluminium-Magnesiumphase führt. Die Aluminium-Magnesiumphasenausscheidungen können die Festigkeitseigenschaften des Aluminiums positiv beeinflussen. Mit Vorzug führen sie zu einer Festigkeitssteigerung des Aluminiums, insbesondere in Kombination mit einer Wärmebehandlung.

**[00101]** In ganz besonderen Ausführungsformen wird das Grundmaterial vor der Abscheidung des Schutzmaterials geschliffen und/oder poliert. Dabei kommt es zu einer Planarisierung der Oberfläche, die für den späteren Bondprozess von entscheidender Bedeutung ist. Die mittlere Rauheit und/oder die quadratische Rauheit sind kleiner als 100µm, mit Vorzug kleiner als 10µm,

mit größerem Vorzug kleiner als  $1\mu\text{m}$ , mit größtem Vorzug kleiner als  $100\text{nm}$ , mit allergrößtem Vorzug kleiner als  $10\text{nm}$ , am bevorzugtesten kleiner als  $1\text{nm}$ . Das Polieren kann auf rein mechanischem und/oder chemischem Wege geschehen. Am optimalsten ist ein chemisch-mechanisches Polieren (engl.: chemical mechanical polishing, CMP).

**[00102]** Sollte sich auf dem Grundmaterial eine Oxidschicht gebildet haben, wird diese mit Vorzug durch die genannten Prozesse bereits entfernt. Sollte die Entfernung des Oxids durch die eben genannten Prozesse nicht ausreichen, können die bereits genannten Prozesse zur Oxidentfernung, wie beispielsweise Sputtern, Verwendung von reduzierenden Gasen und/oder Säuren zusätzlich verwendet werden. Nach der Planarisierung und eventuellen Reinigung von Oxid, erfolgt dann die Beschichtung der Schutzschicht.

**[00103]** Für alle erfindungsgemäßen Ausführungsformen gilt gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung, dass der Bondprozess von einem zweiten, später stattfindenden Wärmebehandlungsprozess, insbesondere räumlich, getrennt stattfinden kann. In der Bondinganlage wird mit Vorzug nur der eigentliche Bondvorgang durchgeführt. Der Bondvorgang dauert insbesondere weniger als 5 Stunden, mit Vorzug weniger als 1 Stunde, mit größerem Vorzug weniger als 30 Minuten, mit größtem Vorzug weniger als 15 Minuten, mit allergrößtem Vorzug weniger als 5 Minuten.

**[00104]** Sobald der Bondschritt beendet wurde und eine genügend hohe Adhäsion zwischen beiden Substraten besteht, kann das gebondete Substratpaar aus dem Bonder entnommen werden, um in einer anderen Anlage weiterbehandelt, insbesondere wärmebehandelt, zu werden. Bei einer derartigen Wärmebehandlungsanlage handelt es sich mit Vorzug um eine Batchanlage, daher eine Anlage, die eine große Anzahl von Wafern gleichzeitig, vielleicht sogar kontinuierlich aufnehmen kann. Die Wärmebehandlung in einer derartigen Wärmebehandlungsanlage erfolgt erfindungsgemäß insbesondere länger als 5 Minuten, mit Vorzug länger als 30 Minuten, mit größerem Vorzug länger als 1 Stunde, mit größtem Vorzug länger als 5 Stunden. Die Temperatur in einer solchen Wärmebehandlungsanlage ist bevorzugt einstellbar, mit Vorzug entlang eines Weges und/oder als Funktion der Zeit einstellbar, so dass die prozessierten Substrate exakte Temperaturprofile durchlaufen können. Die verwendeten Temperaturen sind insbesondere größer als  $25^\circ\text{C}$ , mit Vorzug größer als  $100^\circ\text{C}$ , mit größerem Vorzug größer als  $300^\circ\text{C}$ , mit größerem Vorzug größer als  $500^\circ\text{C}$ , mit allergrößtem Vorzug größer als  $800^\circ\text{C}$ . Die Wärmebehandlung kann bevorzugt in einer Inertgasatmosphäre stattfinden, um die freiliegenden Oberflächen der Substrate vor unnötiger bzw. nichtgewollter Oxidation zu schützen.

**[00105]** In einer derartigen Wärmebehandlungsanlage können alle denkbaren Wärmebehandlungsschritte durchgeführt werden. Denkbar wäre insbesondere, dass die eigentliche Lösung der erfindungsgemäßen Schutzschicht im Grundmaterial erst in der Wärmebehandlungsanlage erfolgt. Die Wärmebehandlungsanlage kann mehrere Substratpaare gleichzeitig auf eine höhere Temperatur bringen, als das in einer Bondinganlage der Fall wäre. Im Falle einer kontinuierlich arbeitenden Wärmebehandlungsanlage, welche an einer Seite Substratpaare aufnimmt, sie kontinuierlich durch die Anlage befördert, beispielsweise durch ein Fließband, und an einem anderen Ende wieder freigibt, wäre sogar die Einstellung eines Temperaturgradienten über den Weg, und daher, insbesondere bei konstanter Fließbandgeschwindigkeit, über die Zeit denkbar. Erfindungsgemäß sollte die Diffusion des Schutzmaterials in das Grundmaterial allerdings nur dann außerhalb einer Bondinganlage erfolgen, wenn zur Herstellung eines entsprechend festen Bonds zwischen den Substraten kein Druck notwendig ist.

**[00106]** Nach einer erfolgreichen Kontaktierung und einem erfolgreichen Bond zwischen den Substraten, insbesondere nach der erfindungsgemäßen Lösung des Schutzmaterials im Grundmaterial, wird eine, möglichst über die gesamte Dicke beider Grundmaterialschichten wirkende, Rekristallisation des Gefüges angestrebt. Diese Rekristallisation kann in der Wärmebehandlungsanlage stattfinden, sofern der Vorgang nicht schon während des eigentlichen Bondvorgangs stattfindet.

**[00107]** Die Rekristallisation führt zu einem Neubau der Körner, insbesondere über die Bondgrenzfläche hinweg, und erzeugt so eine, entlang der gesamten Dicke, durchgehende, mecha-

nisch stabile, feste und permanente Grundmaterialschiicht. Die durch Rekristallisation gebildete, neue Mikrostruktur besitzt das optimale und eigentlich erwünschte Gefüge, da in diesem Gefüge keine Bondgrenzfläche mehr vorkommt. Methoden zur zumindest teilweise steuerbaren Rekristallisation des Gefüges werden bevorzugt angewendet. Dazu zählen insbesondere die Erhöhung der Versetzungsdichte und/oder eine entsprechend hohe Temperatur.

**[00108]** In der bevorzugtesten Ausführungsform erfolgen die erfindungsgemäße Lösung des Schutzmaterials im Grundmaterial sowie die Rekristallisation des Gefüges in einer externen, insbesondere vom Bonder getrennten, Wärmebehandlungsanlage. Dadurch wird der Bonder so schnell wie möglich für den nächsten Substratbond verfügbar. In einer ganz besonderen Ausführungsform finden der erfindungsgemäße Lösungsvorgang, sowie die Rekristallisation gleichzeitig statt. Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele sowie anhand der Zeichnungen. Diese zeigen in:

- [00109]** Figur 1 eine Darstellung des binären Phasendiagramms Al-Ge,
- [00110]** Figur 2 eine Darstellung des binären Phasendiagramms Al-Ga,
- [00111]** Figur 3 eine Darstellung des binären Phasendiagramms Al-Zn,
- [00112]** Figur 4 eine Darstellung des binären Phasendiagramms Al-Mg,
- [00113]** Figur 5a eine schematische Querschnittsdarstellung einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Substrats mit einer vollflächigen Grundschiicht aus einem Grundmaterial und einer vollflächigen Schutzschicht aus einem Schutzmaterial beim Ausrichten,
- [00114]** Figur 5b eine schematische Querschnittsdarstellung gemäß Figur 5a beim Kontaktieren/Bondschiitt und
- [00115]** Figur 5c eine schematische Querschnittsdarstellung gemäß Figur 5a nach dem Bondschiitt.

**[00116]** Die Figur 1 zeigt ein erstes, beispielhaftes binäres System Al-Ge. Der erfindungsgemäß wichtige Teil im Phasendiagramm ist der Mischkristallbereich 7. Der Mischkristallbereich 7 ist durch die Randlöslichkeit 8 von den Zweiphasengebieten 9, 10 getrennt. Die Randlöslichkeit für Germanium nimmt, ausgehend von der eutektischen Temperatur bzw. der Eutektikalen 11 mit abnehmender Temperatur ab. Die Randlöslichkeit für Germanium nimmt, ausgehend von der eutektischen Temperatur bzw. der Eutektikalen 11, mit steigender Temperatur ebenfalls ab.

**[00117]** Die Figur 2 zeigt ein zweites, beispielhaftes binäres System Al-Ga. Der erfindungsgemäß wichtige Teil im Phasendiagramm ist der Mischkristallbereich 7. Der Mischkristallbereich 7 ist durch die Randlöslichkeit 8 von den Zweiphasengebieten 9, 10 getrennt. Die Randlöslichkeit für Gallium nimmt, ausgehend von der eutektischen Temperatur bzw. der Eutektikalen 11, mit abnehmender Temperatur ab. Die Randlöslichkeit für Gallium nimmt, ausgehend von der eutektischen Temperatur bzw. der Eutektikalen 11, mit steigender Temperatur ebenfalls ab. Charakteristisch ist die Entartung des Eutektikums durch einen sehr nahe bei der Konzentration des reinen Germaniums liegenden eutektischen Punkt 6.

**[00118]** Die Figur 3 zeigt ein drittes, beispielhaftes binäres System Al-Zn. Der erfindungsgemäß wichtige Teil im Phasendiagramm ist der Mischkristallbereich 7. Der Mischkristallbereich 7 ist hier sehr ausgeprägt. Er reicht bei Temperaturen um die 370°C bis zu mehr als 65 Mol-% Zink. Der Mischkristallbereich 7 ist durch die Randlöslichkeit 8' von dem Zweiphasengebiet 10 getrennt. Die Randlöslichkeit für Zink nimmt, ausgehend von der eutektoiden Temperatur bzw. der Eutektoiden 11', mit abnehmender Temperatur ab.

**[00119]** Die Figur 4 zeigt ein viertes, beispielhaftes binäres System Al-Mg. Der erfindungsgemäß wichtige Teil im Phasendiagramm ist der Mischkristallbereich 7. Der Mischkristallbereich 7 ist durch die Randlöslichkeit 8 von den Zweiphasengebieten 9, 10 getrennt. Die Randlöslichkeit für Magnesium nimmt, ausgehend von eutektischen Temperatur bzw. der Eutektikalen 11, mit ab-

nehmender Temperatur ab. Die Randlöslichkeit für Magnesium nimmt, ausgehend von eutektischen Temperatur bzw. der Eutektikalen 11, mit steigender Temperatur ebenfalls ab.

**[00120]** Die Figur 5a zeigt ein möglichst einfaches erfindungsgemäßes System, bestehend aus einem ersten Substrat 4 und einem zweiten Substrat 5. Beide Substrate, 4 und 5, sind mit einem Grundmaterial 1 und einem Schutzmaterial 2 beschichtet. In einer erfindungsgemäßen Ausführungsform werden Grundmaterial 1 und Schutzmaterial 2 nicht notwendigerweise vollflächig auf dem ersten Substrat 4 aufgebracht sein, sondern eine gewisse Strukturierung vor dem Bonden erfahren haben. In diesem Schritt sind mögliche Oxidschichten des Schutzmaterials 2 bereits entfernt worden.

**[00121]** Figur 5b zeigt einen Kontaktierungs- bzw. Bondschritt der beiden Substrate 4 und 5. Wären die beiden Substrate strukturierter, hätte ein vorheriger Ausrichtungsschritt die beiden Substrate zueinander ausrichten müssen, bevor der eigentliche Kontaktierungs- bzw. Bondschritt erfolgt wäre.

**[00122]** Die Figur 5c zeigt schließlich den erzeugten Mischkristall 12, der durch die Diffusion des Schutzschichtmaterials 2 in das Grundmaterial 1 erfolgt ist.

## BEZUGSZEICHENLISTE

- 1 Grundmaterial
- 2 Schutzmaterial
- 3 Oxidschicht
- 4 Erstes Substrat
- 5 Zweites Substrat
- 6 Eutektischer Punkt
- 7 Mischkristallbereich
- 8 Randlöslichkeit
- 9 Zweiphasengebiet flüssig, fest
- 10 Zweiphasengebiet fest, fest
- 11, 11' Eutektikale, Eutektoide
- 12 Mischkristall

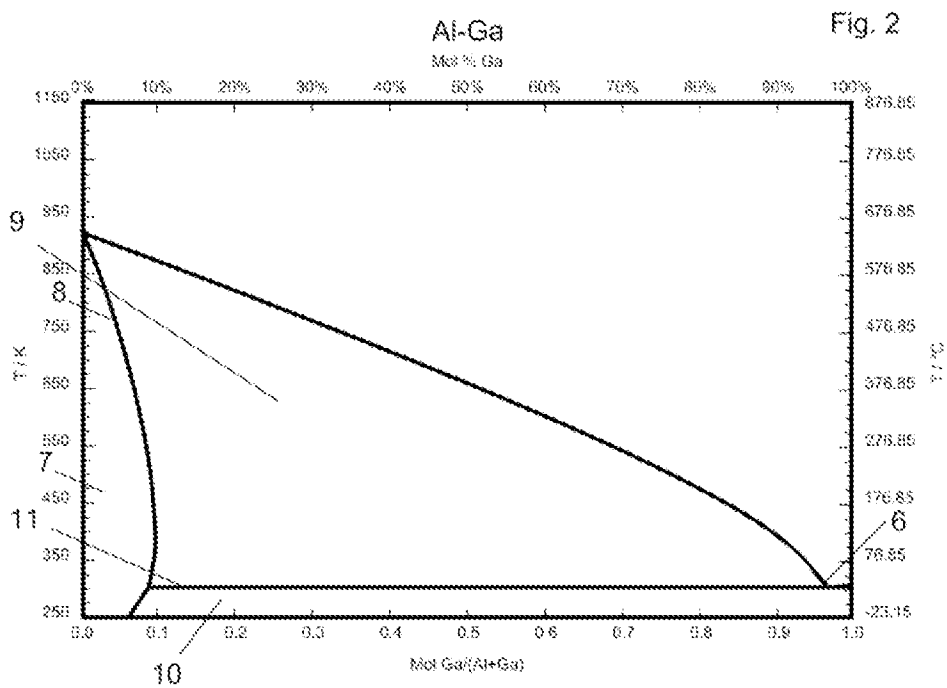
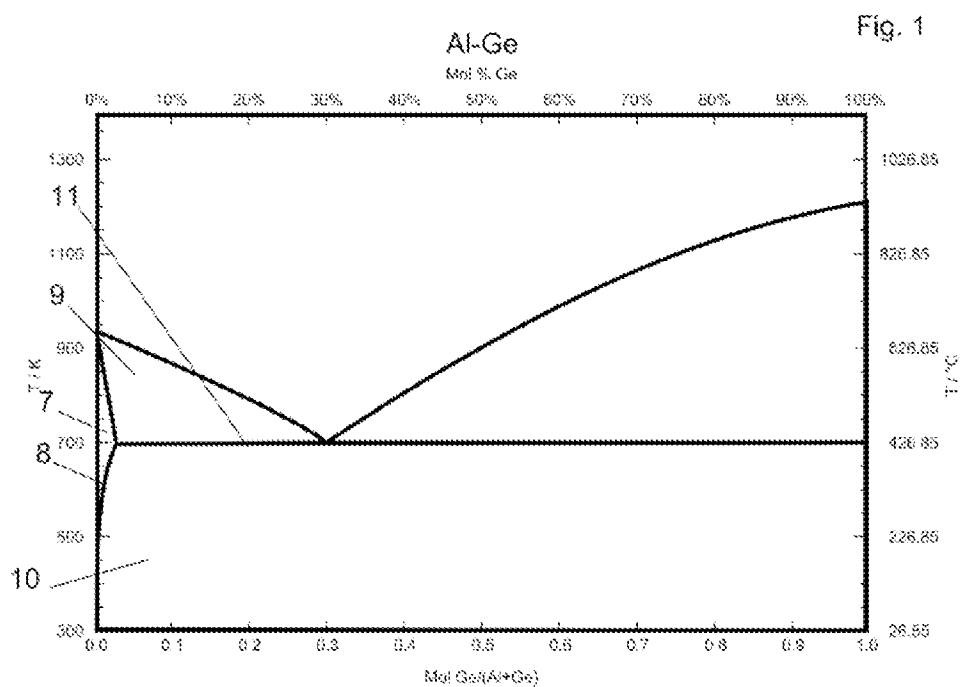
## Patentansprüche

1. Verfahren zum Bonden eines ersten Substrats (4) mit einem zweiten Substrat (5) mit folgenden Schritten:
  - Aufbringen eines oxidierbaren Grundmaterials als Grundschicht auf eine Bondseite des ersten Substrats (4),
  - zumindest teilweises Bedecken der Grundschicht mit einer Schutzschicht, wobei die Schutzschicht eine Dicke von weniger als 100 nm aufweist, wobei die Schutzschicht ein Schutzmaterial aufweist, wobei das Schutzmaterial zumindest ein nichtmetallisches chemisches Element aus der Gruppe aus Si, Se, Te, und B aufweist,
  - Bonden des ersten Substrats (4) mit dem zweiten Substrat (5), wobei das Schutzmaterial vollständig im Grundmaterial gelöst wird während des Bondens,  
**dadurch gekennzeichnet,**
  - dass die Schutzschicht mit einer Dicke von weniger als 10 nm aufgebracht wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1. **dadurch gekennzeichnet,**  
dass das Grundmaterial sauerstoffaffin ist. insbesondere zumindest überwiegend aus Aluminium und/oder Kupfer besteht.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet,**  
dass das Aufbringen des Grundmaterials und/oder das Bedecken des Grundmaterials mit dem Schutzmaterial durch Abscheidung erfolgen.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet,**  
dass die Schutzschicht mit einer Dicke von weniger als 1 nm aufgebracht wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet,**  
dass die Schutzschicht derart aufgebracht wird, dass die Grundschicht zumindest überwiegend, vorzugsweise vollständig gegenüber der Atmosphäre abgedichtet ist.
6. Verfahren nach Anspruch 1,  
**dadurch gekennzeichnet,**  
dass die Schutzschicht vor dem Bondschritt mit einem oder mehreren der folgenden Prozesse behandelt wird:
  - Chemische Oxidentfernung, insbesondere durch ein
    - gasförmiges Reduktionsmittel und/oder
    - flüssiges Reduktionsmittel
  - Physikalische Oxidentfernung, insbesondere mit Plasma,
  - Ion Assisted Chemical Etching, insbesondere
    - Fast Ion Bombardement (FAB, Sputtern),
    - Schleifen und/oder
    - Polieren.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet,**  
dass eines oder mehrere der folgenden Materialien als Grundmaterial ausgewählt werden:
  - Metalle, insbesondere Cu, Ag, Au, Al, Fe, Ni, Co, Pt, W, Cr, Pb, Ti, Te, Sn, Zn, Ga,
  - Alkalimetalle, insbesondere Li, Na, K, Rb, Cs
  - Erdalkalimetalle, insbesondere Mg, Ca, Sr, Ba,
  - Legierungen,
  - Halbleiter, insbesondere mit entsprechender Dotierung versehen,
    - Elementhalbleiter, insbesondere Si, Ge, Se, Te, B, Sn,

- Verbindungshalbleiter, insbesondere GaAs, GaN, InP,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , InSb, InAs, GaSb, AlN, InN, GaP, BeTe, ZnO,  $\text{CuInGaSe}_2$ , ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe,  $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$ , BeSe, HgS,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , GaS, GaSe, GaTe, InS, InSe, InTe,  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CuInS}_2$ ,  $\text{CuInGaS}_2$ , SiC, SiGe.

**Hierzu 3 Blatt Zeichnungen**

1/3



2/3

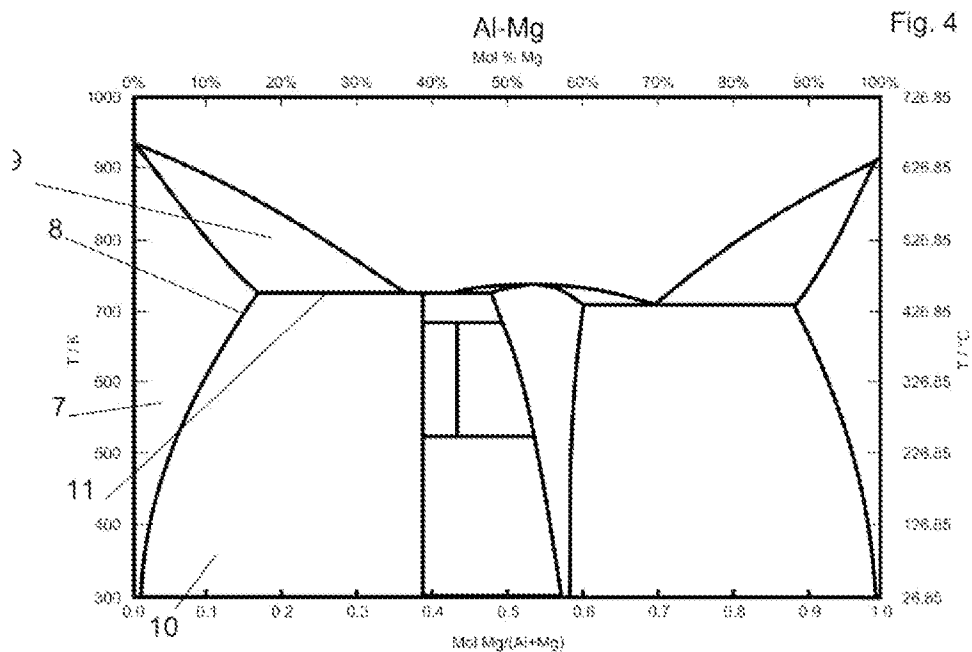
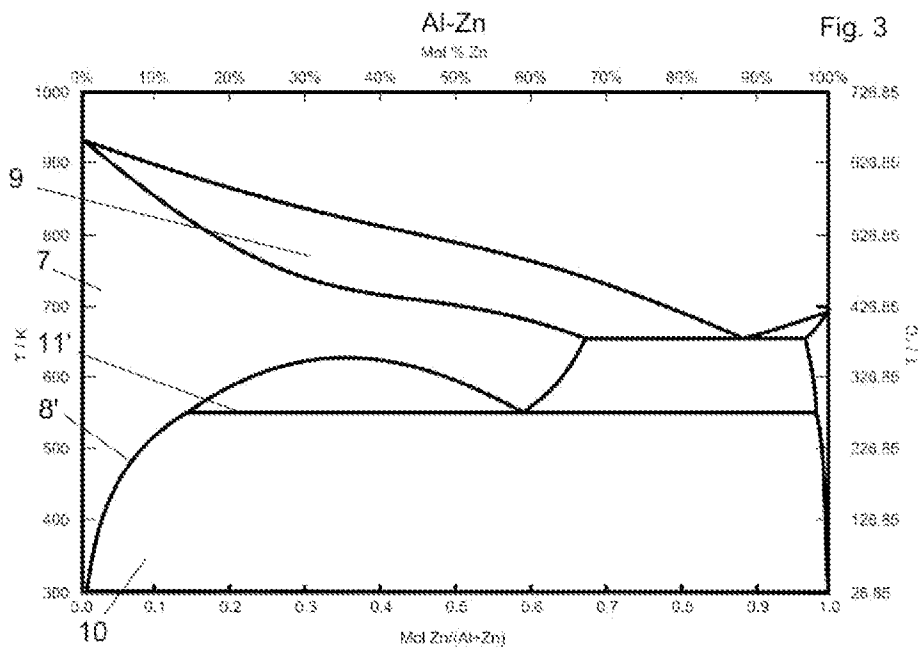


Fig. 5a

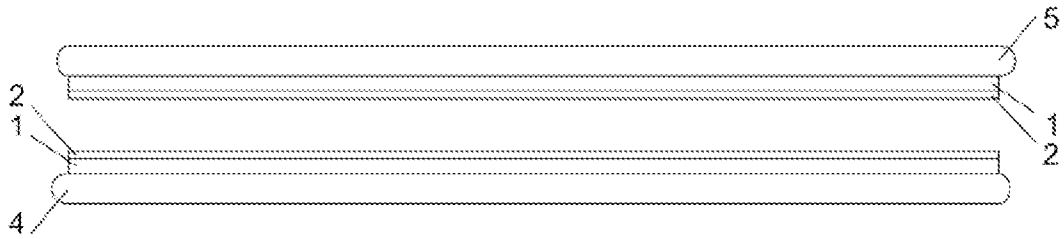


Fig. 5b

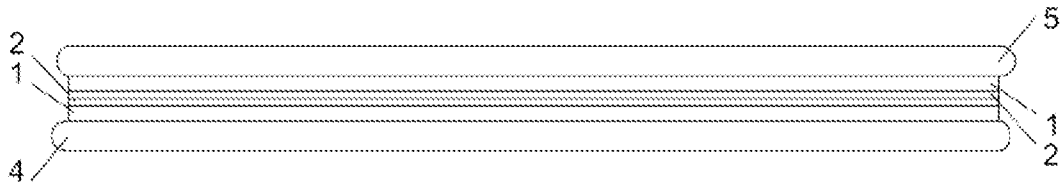


Fig. 5c

