

Verfahren zur Oberflächenbehandlung eines Substrats und Verfahren zum Bonden eines solchen Substrats mit einem weiteren Substrat und eine Vorrichtung zur Durchführung solcher Verfahren

5 Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Oberflächenbehandlung eines Substrats und ein Verfahren zum Bonden des Substrats mit einem weiteren Substrat und eine Vorrichtung zur Durchführung solcher Verfahren.

10 In der Halbleiterindustrie werden bereits seit mehreren Jahren unterschiedliche Bondtechnologien verwendet, um Substrate miteinander zu verbinden. Den Verbindungsvorgang nennt man Bonden. Man unterscheidet zwischen den Temporärbondverfahren und den Permanentbondverfahren. Beim Fusionsbonds werden beispielsweise zwei ebene, reine Substratoberflächen durch Kontaktierung gebondet. In einem ersten Schritt erfolgt eine Kontaktierung der beiden Substrate, wobei eine Vorfixierung der beiden Substrate durch
15 Van-der-Waals-Kräfte stattfindet. Um einen permanenten Fusionsbond zu erzeugen, werden die Substratstapel einer Wärmebehandlung unterzogen.

Um bei geringen Temperaturen bonds zu können, kann vor dem Fusionsbonds eine Plasmabehandlung zur Reinigung und Aktivierung mindestens einer der Substratoberflächen durchgeführt werden.
20

In der Druckschrift US 10,312,217 B2 werden vor dem Bonden die Substratoberflächen für eine bessere Bondstärke bei Raumtemperatur vorbehandelt. Dafür wird eine Bondschicht auf die Substratoberfläche abgeschieden, mittels chemisch-mechanisches Polieren planarisiert und durch Plasmaätzen modifiziert. Die Aktivierung der Oberfläche wird
25 durch RIE Plasmaprozesse oder durch Reaktionen mit reaktiven Gasen oder Flüssigkeiten durchgeführt, sodass die aktivierte Oberfläche aus einer aktivierten Sauerstoff- oder einer aktivierten Stickstoff-Verbindung besteht.

In der Druckschrift US 2021 / 0 225 803 A1 werden Systeme offenbart, die eine Kombination von nasschemischen Prozessen und vakuumbasierten Prozessen für die Vorbehandlung von Substraten vor dem Bonden bei möglichst niedrigen Temperaturen ermöglichen.

5 In der Druckschrift US 2021 / 0 225 803A1 werden passivierende Oxidschichten entfernt weitgehend ohne Bildung von amorphen Schichten oder Implantation von Teilchen auf der Substratoberfläche. Dafür wird ein niederenergetisches Plasma in einer Plasmakammer verwendet, in Kombination mit einer Reihe von zuvor durchgeführten nasschemischen Prozessen zur Behandlung der Substratoberflächen.

10 In der Druckschrift US 10,985,204 B2 wird ein niederenergetisches Plasma verwendet, um Oberflächenoxide zu entfernen. Die Bildung einer amorphen Schicht ist nicht erwünscht. In US 10,985,204 B2 wird zusätzlich eine Implantation von niedrig energetischem Wasserstoff in den zu bondenden Oberflächen durchgeführt. Mögliche vorhandene lokale Defekte, die nach dem Bonden der Substrate bei Temperaturen unter 300 °C zu einem höheren elektrischen Widerstand an der Bondgrenze führen könnten, werden mit
15 dem implantierten Wasserstoff während der anschließenden Wärmebehandlung passiviert.

Beispielsweise wird in US 10,312,217 B2 eine zusätzliche Bondschicht aufgetragen, die mit physikalischen und/oder (nass-)chemischen Verfahren zusätzlich aktiviert wird. Auch
20 in US 202 1/ 0 225 803 A1 werden Systeme offenbart, die eine Kombination von nasschemischen und vakuumbasierten Prozessen für die Vorbehandlung von Substraten vor dem Bonden bei möglichst niedrigen Temperaturen ermöglichen. In US 10,985,204 B2 wird zusätzlich eine Implantation von niedrig energetischem Wasserstoff in den zu bondenden
25 Oberflächen durchgeführt.

Eine weitere Methode zur Modifizierung von Substratoberflächen vor dem Bonden sind Ionenstrahlverfahren. Dabei treffen die beschleunigten Ionen am Ende ihrer Flugbahn auf das zu modifizierende Substratmaterial.

30

Eine konventionelle Ionenkanone umfasst eine Quelle von geladenen Partikeln, die durch ein extern angelegtes elektrisches Feld beschleunigt werden, das zwischen einem Paar Gitter entsteht. Herkömmlicherweise werden für die Produktion von energiearmen Ionenstrahlen drei Gitter verwendet. Es können verschiedene Gitteranordnungen verwendet
35 werden, deren Potenziale individuell geregelt werden. In einem Mehrgittersystem ist das erste Gitter, auf das die Ionen treffen, gewöhnlich positiv und das zweite Gitter negativ

vorgespannt. Ein weiteres Gitter kann verwendet werden, um die aus der Ionenquelle austretenden Ionen zu verlangsamen, so dass ein kollimierter Strahl von Ionen mit mehr oder weniger gleichmäßiger Energie entsteht.

5 Bevorzugt wird vor dem Bonden von Substratoberflächen eine Oxidentfernung bei Materialien durchgeführt, bei denen eine sauerstoffhaltige Atmosphäre ein natives Oxid bildet. Das gilt jedoch nicht für erzeugte Sauerstoffsubstratoberflächen, wie beispielsweise Siliziumoxid. Insbesondere werden vorzugsweise zumindest überwiegend, noch bevorzugter ausschließlich, schädliche, unnötige und/oder native, insbesondere metallische, Oxide
10 entfernt. Vorzugsweise werden die vorgenannten Oxide vor einem Bondvorgang weitestgehend, insbesondere vollständig, entfernt, um nicht in die Bondgrenzfläche (Kontaktfläche zweier Substrate) eingebaut zu werden. Ein Einbau derartiger Oxide würde zu einer mechanischen Destabilisierung und zu einer sehr geringen Bondstärke führen. Die Entfernung des Oxids erfolgt insbesondere durch physikalische und/oder chemische Verfahren.

15 Durch eine Vorbehandlung verändert sich auch die Mikrorauheit der Substratoberflächen und bei Erreichen einer optimalen Oberflächenrauheit können maximale Bondenergien erzielt werden. Dadurch können sich spontane, kovalente Bonds bei geringen Temperaturen, insbesondere bei Raumtemperatur, ausbilden. Die Kontaktierung erfolgt im Hochvakuum.
20

Die EP 3 161 855 B1 beschreibt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Oberflächenbehandlung von Substraten. Die Grundidee von EP 3 161 855 B1 ist es, eine überwiegend amorphisierte Schicht an einer zu bondenden Substratoberfläche zu erzeugen. Die Amorphisierung der Substratoberfläche führt in EP 3 161 855 B1 zu einem besseren Bondergebnis, insbesondere bei vergleichsweise geringen Temperaturen. Bevorzugt erfolgen eine Reinigung der Oberfläche zur Oxidentfernung und eine Amorphisierung gleichzeitig.
25

Im Stand der Technik ist die Bildung einer amorphen Oberflächenschicht durch Phasenumwandlung des Substratmaterials während einer Vorbehandlung von Substratoberflächen vor dem Bonden unerwünscht. Wird im Stand der Technik eine amorphe Schicht gebildet, so wird diese nicht durch Umwandlung des Substratmaterials selber, sondern durch Abscheidung einer zusätzlichen amorphen Schicht durch chemische und/oder physikalische Abscheideprozesse auf der Substratoberfläche aufgebracht.
30

35

Um mögliche Schäden vorzubeugen oder eine bessere Bondkraft bei Raumtemperatur zu erreichen, sind im Stand der Technik weitere Prozessschritte notwendig.

- Die EP 3 161 85 5B1 betrifft insbesondere eine Methode zum permanenten Bonden zweier Substrate, wovon wenigstens eines, vorzugsweise beide vor dem Bonden behandelt werden. Dabei werden Oberflächenbereiche, insbesondere eine Kontaktseite, vorzugsweise vollflächig, der beiden oder wenigstens eines der beiden Substrate vor dem Bondvorgang amorphisiert. Durch die Amorphisierung wird eine nanometerdicke Schicht erzeugt, in der die Atome mindestens einer der zu bondenden Oberflächen regellos angeordnet werden. Zur Erzeugung eines erfindungsgemäßen Bonds wird insbesondere eine Reinigung der Oberflächen, insbesondere zur Befreiung von Oxiden, durchgeführt. Ein wesentlicher Aspekt von EP 3 161 855 B1 ist insbesondere die Verwendung energetischer Teilchen, insbesondere Ionen, um eine Amorphisierung zu bewirken.
- In EP 3 161 855 B1 wird gleichzeitig mit der Oxidentfernung mittels Ionenstrahls auch eine amorphe Schicht erzeugt. Die amorphen Schichten auf den Oberflächen der gemäß EP 3 161 855 B1 vorbehandelten und aktivierten Substraten wirken sich positiv auf die Bondstärke beim Bonden bei Raumtemperatur aus. Die amorphe Restschicht im gebondeten Substratstapel wirkt sich aber durch Erhöhung des elektrischen Widerstandes an der Bondgrenzfläche störend aus. Weiters kann sich die amorphe Restschicht nach dem Bonden bei der Interaktion des (mehrschichtigen) Substratstapels mit elektromagnetischer Strahlung negativ auswirken. Relevante Parameter sind dabei beispielsweise die Dicke und die unterschiedlichen optischen Eigenschaften der amorphen Schicht.
- Während sich die amorphe Schicht positiv auf den Bondvorgang auswirkt, kann sich die amorphe Schicht daher nach dem Bondvorgang auf weitere Prozessschritte in der Prozessierung des (mehrschichtigen) Substratstapels negativ beziehungsweise als störend auswirken. Wie bereits erwähnt kann die amorphe Restschicht an der Bondgrenzschicht einen unerwünschten elektrischen Widerstand im gebondeten Substratstapel verursachen. Auch als zusätzliche Schicht in einem gebondeten Mehrschichtsystem kann die amorphe Schicht bei weiteren Prozessschritten stören. Beispielsweise ist die Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex von kristallinem Silicium (c-Si) und amorphem Silicium (a-Si) unterschiedlich. Somit kann es bei einer Laserbestrahlung des gebondeten Mehrschichtsystems, beispielsweise beim Laserdebonden, eine Differenz im Brechungsindex zwischen kristallinem und amorphem Silicium geben. Zu den Parametern eines (gebondeten) Substratstapels die für die Interaktion mit der elektromagnetischen Strahlung,

insbesondere mit Laserstrahlung, relevant sind zählen die Anzahl der Schichten im Mehrschichtsystem, die Dicke aller Schichten und die optischen Konstanten aller Medien. Deshalb kann die amorphe Schicht nicht vernachlässigt werden.

- 5 Weiterhin werden für die Oxidentfernung mittels Zerstäubung sehr hohe Ionenenergien benötigt, um Materie von der Oberfläche des Substrates entfernen zu können. Dies führt dazu, dass Ionen teilweise in das Substrat implantiert werden und die Schicht nahe der Oberfläche dadurch geschädigt wird. Diese beschädigte Schicht kann in der Regel mehrere nm, typischerweise sogar 5 bis 10 nm und dicker sein. Diese Beschädigungen können sich negativ auf die Charakteristik der Bondverbindung hinsichtlich elektrischer und optischer Parameter auswirken, so dass diese unerwünscht sind und in der Praxis ein Problem darstellen.

- 15 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Vorbehandeln einer Substratoberfläche anzugeben, mit welchen Substrate möglichst ohne störende Einflüsse der amorphen Restschicht gebondet werden können.

- Die Aufgabe wird gelöst mit einem Verfahren gemäß Anspruch 1 oder Anspruch 11 und einer Vorrichtung gemäß Anspruch 15. Bevorzugte Ausführungsbeispiele sind der Beschreibung, den abhängigen Ansprüchen und den Figuren zu entnehmen.

- Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zur Oberflächenbehandlung eines Substrats, insbesondere als Vorbereitungsschritt für ein Verfahren zum Verbinden des Substrats mit einem weiteren Substrat, vorgesehen, umfassend:
- 25 - Bereitstellen des Substrats mit einer für das Verbinden vorgesehenen Bindungsfläche,
 - Behandlung des Substrats zumindest in einem Teilbereich der Bindungsfläche unter Ausbildung einer amorphen Schicht mit einer ersten Dicke, wobei zur Ausbildung der amorphen Schicht vorzugsweise eine primäre Teilchenstrahlung verwendet wird, und
 - 30 - Schichtdickenreduktion der amorphen Schicht, bevorzugt auf eine zweite Dicke.

- Gegenüber den aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren ist es erfindungsgemäß zusätzlich vorgesehen, die Schichtdicke der amorphen Schicht zu reduzieren. Das Reduzieren der Schichtdicke der amorphen Schicht schafft die Möglichkeit, den Umfang der nachteiligen Wirkungen der amorphen Schicht weitgehend zu reduzieren. Dadurch lässt sich in vorteilhafter Weise die primäre Teilchenstrahlung nutzen, die sich als besonders

vorteilhaft für die Entfernung von Oxiden und somit zum Reinigen der Substratoberfläche, insbesondere im Bereich der vorgesehenen Bindungsfläche, erwiesen hat. Dabei kann auch gleichzeitig noch auf die positive Wirkung der amorphen Schicht für das Bondverfahren zurückgegriffen werden. Daher erweist sich die Kombination von Behandlung des Substrats unter Ausbildung einer amorphen Schicht einerseits und Schichtdickenreduktion andererseits als besonders vorteilhaft.

Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Behandlung des Substrats vor der Schichtdickenreduktion der amorphen Schicht einer Reinigung der Bindungsfläche dient. Dabei wird die Bindungsfläche zumindest bereichsweise von einem nativen und/oder unnötigen Oxid befreit, das an einer Substratoberfläche ausgebildet ist. Insbesondere ist es dabei vorgesehen, dass die amorphe Schicht durch eine Phasenumwandlung ausgebildet wird, bei der die Zusammensetzung der kristallinen Substratoberfläche des bereitgestellten Substrats im behandelten Bereich der Bindungsfläche umgewandelt wird. Somit unterscheidet sich dieses Vorgehen insbesondere von solchen Ansätzen, bei denen gezielt eine amorphe Schicht auf die Substratoberfläche aufgetragen wird. Stattdessen wird mittels der primären Teilchenstrahlung die kristalline Phase in eine amorphe Phase umgewandelt. Entsprechend wird eine erste kinetische Energie der primären Teilchenstrahlung so eingestellt, dass eine Umwandlung in die amorphe Phase gewährleistet wird. Diesbezüglich wird explizit auf den Offenbarungsgehalt der EP 3 161 855 B1 verwiesen. Das Substrat und das weitere Substrat werden dabei bevorzugt über entsprechende Bindungsflächen miteinander angebunden.

Während die Ausbildung einer amorphen Schicht für ein besseres Bondergebnis beim Bonden von Substraten bei niedrigen Temperaturen, insbesondere bei Raumtemperatur, notwendig ist, kann diese amorphe Schicht bei weiteren Prozess-Schritten im Prozessieren des gebondeten Mehrschichtsystems stören. Insbesondere wirkt sich die amorphe Restschicht negativ auf die elektrischen Eigenschaften der Bondgrenzschicht aus. Es erweist sich daher als vorteilhaft, mindestens die Bindungsfläche der Substrate, bevorzugt beider Substrate, so weiter zu behandeln, insbesondere durch dynamisches Zerstäuben bzw. eine Schichtdickenreduktion mittels Teilchenstrahlung, dass die durch die Vorbehandlung zunächst entstandene amorphe Schicht wieder weitgehend schonend abgetragen wird, insbesondere auf ein notwendiges Minimum reduziert wird.

Die Substrate weisen mindestens eines der folgenden (kristallinen) Materialien auf:

- Halbleitermaterialien wie Si, Ge,

- III-V Verbindungshalbleiter wie GaAs, InP
- II-VI Verbindungshalbleiter,
- Halbleiterlegierungen,
- Oxide, insbesondere SiO_2 und kristalline Oxide des Titans,
- 5 - Nitride, insbesondere SiN_x ,
- Metalle wie Al, Cu, Au, Ti,
- Legierungen,
- Keramiken,
- Carbide, insbesondere SiC

10

Die Substrate können jede beliebige Form besitzen, sind aber bevorzugt kreisrund. Für Substrate, insbesondere die sogenannten Wafer, sind die industrieüblichen Durchmesser, 1 Zoll, 2 Zoll, 3 Zoll, 4 Zoll, 5 Zoll, 6 Zoll, 8 Zoll, 12 Zoll und 18 Zoll. Eine bevorzugte Ausführungsform kann aber grundsätzlich jedes Substrat, unabhängig von dessen Durchmesser

15

Bevorzugt handelt sich bei der Teilchenstrahlung um eine Ionenstrahlung, die von einer Ionenquelle bzw. einer Ionenkanone bereitgestellt wird. Hierzu wird bevorzugt ein Gas oder ein Gasgemisch ionisiert. Besonders bevorzugt ist es vorgesehen, dass die Schichtdickenreduktion, insbesondere in der Form der Zerstäubung, durch eine Teilchenstrahlung

20

realisiert wird.

25

In einem ersten Prozessschritt im Sinne des Verfahrens aus EP 3 161 855 B1 wird die erste kinetische Energie der Ionen so eingestellt, dass diese beim Auftreffen auf die Substratoberfläche eine Oberflächenreinigung, insbesondere eine Entfernung der nativen Oxidschicht und eine Amorphisierung bewirken. Die Amorphisierung wird insbesondere auf den oberflächennahen Bereich der miteinander zu verbondenden Substrate beschränkt, vorzugsweise durch Wahl der Prozessparameter Temperatur, Druck, Ionenenergie und/oder Ionenstromdichte während der Amorphisierung. Das Material des Substrats bleibt dabei, abgesehen von der amorphisierten Schicht, zumindest überwiegend, vorzugsweise vollständig, kristallin. In einem zweiten Prozessschritt, d. h. während der Schichtdickenreduktion, werden die für den Ionenstrahl relevanten Parameter, insbesondere Ionenenergie und/oder Ionenstromstärke, kontinuierlich oder schrittweise so reduziert oder verändert, dass die im ersten Prozessschritt erzeugte amorphe Schicht schonend weiter reduziert wird ohne andere, kollaterale Veränderungen der oberflächennahen Bereiche des

30

35

Substrats (i.e. Implantation, weitere Amorphisierung oder Zerstäubung des darunterliegenden Substratmaterials selber).

5 Die Amorphisierung erfolgt vorzugsweise durch Teilchenkollision mit der Substratoberfläche durch die primäre Teilchenstrahlung. Bei den Teilchen handelt es sich entweder um geladene oder um nicht geladene Teilchen. Die Beschleunigung erfolgt bevorzugt mit geladenen Teilchen, insbesondere Ionen, da geladene Teilchen technisch leichter beschleunigt werden können.

10 Beim Eindringen der Ionen in den oberflächennahen Bereich des Substrats werden unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen dem Ion und Targetatomen hervorgerufen. Der Teilchenbeschuss bewirkt zunächst die Desorption schwach gebundener Adsorptionsschichten, dann die Zerstäubung von Fremd- und Reaktionsschichten (beispielsweise Oxide mit Dicken von 1 bis 10 nm) und schließlich die des Substratmaterials selbst.

15 Die Oberflächenreinigung mittels primärer Teilchenstrahlung (engl. sputtering) ist eine ioneninduzierte Emission von Atomen, Atomclustern oder Molekülen aus der Substratoberfläche und wird zur Oxidentfernung genutzt. Die Zerstäubungsausbeute ist u.a. von der Ionenenergie, der Ionenart, dem Ioneneinfallswinkel und dem Substratmaterial abhängig.

20 Strahlschäden und Versetzungen von Substratmaterial entstehen im Substratmaterial überwiegend als Folge von Stoßprozessen zwischen den eindringenden Ionen und den Targetatomen. Die im Substrat und der Schicht ausgelösten Stoßkaskaden erzeugen eine hohe Defektkonzentration, die bis zur Amorphisierung führen kann. Wird ein Ion mit einer
25 genügend hohen Energie, insbesondere größer als 100 eV, auf einen Festkörper geschossen, durchdringt es dessen Oberfläche und wird Wechselwirkungsprozessen mit dem Targetmaterial unterworfen. So kann beispielsweise ein Punktdefekt entstehen, wenn mehr als 25 eV auf ein Gitteratom übertragen wird, abhängig vom Material und vom Ionenstrahl. Mit zunehmender Implantationsdosis beginnen die Einzeldefektbereiche sich
30 zu überlagern und führen schließlich zu einer Amorphisierung des Substratmaterials. Wird weniger als 25 eV auf ein Gitteratom übertragen, so geht diese Energie in Phononenenergie über und bewirkt eine Temperaturerhöhung.

In den Bereichen wo das Substratmaterial amorphisiert wurde ist keine Fernordnung der Atome mehr festzustellen. Folgende Parameter beeinflussen die Umwandlung der kristallinen Phase in eine amorphe Phase des Materials, beispielsweise Silizium nach Beschuss mit schweren Argonionen:

- 5 - Ionenmasse,
- Ionenenergie,
- Ionenstromstärke beziehungsweise Ionenstromdichte,
- Implantationsdosis,
- Ioneneinfallswinkel und
- 10 - Substrattemperatur.

Bei einer Zerstäubung mit Ionenstrahlen können die Energie und die Stromdichte der bombardierenden Ionen unabhängig voneinander variiert werden.

- 15 Im Rahmen der Oberflächenreinigung bildet sich nach Entfernung der Oberflächenoxide eine amorphe Oberflächenschicht durch Strahlschäden, Versetzungen und Implantation von Ionen. Die Implantation von Ionen findet überwiegend bei Verwendung energiereicher Ionen statt. Die Implantation hängt von der Eindringtiefe der eingeschossenen Ionen in das Substratmaterial, die von der Ionenenergie und auch dem Ioneneinfallswinkel ab-
- 20 hängt. Das Substrat befindet sich in einem Abstand von 10 cm bis 50 cm vom Ionenaustrittsgitter der Ionenquelle entfernt.

- Durch Teilchenbeschuss mit der primären Teilchenstrahlung wird in dem vorhandenen kristallinen Grundmaterial des Substrats eine amorphe Schicht erzeugt. Die Amorphisierung bewirkt insbesondere auch eine Planarisierung der Substratoberfläche. Die sich auf
- 25 das Bonden positiv auswirkende Planarisierung der Oberflächen findet somit insbesondere während der Amorphisierung statt, insbesondere zusätzlich zu einer während des Bondvorgangs vorgesehenen Planarisierung durch Krafteinwirkung. Die Einstellung des Ioneneinfallswinkels der primären Teilchenstrahlung ermöglicht die Steuerung der Abtra-
 - 30 gungsrate und damit der Oberflächenrauigkeit. Der Einfallswinkel wird daher insbesondere so gewählt, dass Amorphisierung, Abtragung der Verunreinigungen, insbesondere der Oxide, und Oberflächenglättung für das gewünschte Ergebnis maximiert werden. Die Amorphisierung gewährleistet außerdem eine höhere Beweglichkeit des Materials an den Grenzflächen. Dadurch kann eine etwaige Restraueheit besser ausgeglichen werden. Ins-
 - 35 besondere können verbleibenden Lücken zwischen den Substratoberflächen geschlossen

werden. Durch die Amorphisierung wird insbesondere ein thermodynamisch metastabiler Zustand an der Substratoberfläche (Bondgrenzfläche) erzeugt.

5 Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist der Einfallswinkel zwischen der Substratoberfläche und dem Ionenstrahl frei wähl- und einstellbar. Der Einfallswinkel wird definiert als der Winkel zwischen der Substratoberfläche und dem Ionenstrahl. Der Einfallswinkel liegt insbesondere zwischen 0° und 90° , vorzugsweise zwischen 20° und 70° , noch bevorzugter zwischen 30° und 60° . Durch den Einfallswinkel des Ionenstrahls kann die Einschlagenergie der Ionen auf der Substratoberfläche gesteuert werden.

10

Vorzugsweise werden Oberflächenbereiche bzw. Bindungsflächen, insbesondere eine Kontaktseite, vorzugsweise vollflächig, der beiden oder wenigstens eines der beiden Substrate vor dem Bondvorgang im Oberflächenreinigungs- und Aktivierungs-Prozess amorphisiert. Der Oberflächenreinigungs- und Aktivierungs-Prozess kann auch auf Oberflächenbereiche, die kleiner sind als die Substratoberfläche, insbesondere auch voneinander getrennte Oberflächenbereiche, erfolgen.

15

Die Vorbehandlung erfolgt insbesondere in einem von dem Vorfixierungsmodul und/oder dem Bondmodul, insbesondere durch Schleusen, trennbaren Vorbehandlungsmodul. In diesem wird durch Teilchenbeschuss zunächst eine Oberflächenreinigung durchgeführt und eine amorphisierte Substratoberfläche der Substrate erzeugt. Insbesondere werden Oxidentfernung, Oberflächenglättung und Amorphisierung gleichzeitig durchgeführt.

20

Bevorzugt wird die amorphisierte Schicht nicht durch ein mittels physikalischer und/oder chemischer Prozesse aufgebracht Material, sondern durch eine Phasenumwandlung des Substratmaterials erzeugt. Dadurch kann auf die Abscheidung eines, insbesondere ungewollten oder schädlichen, Materials vollständig verzichtet werden.

25

Die Steuerung der Amorphisierung erfolgt gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung durch Einstellung der ersten kinetischen Energie der beschleunigten Teilchen der primären Teilchenstrahlung, insbesondere der Ionen einer primären Ionenstrahlung. Die erste kinetische Energie der Teilchen wird insbesondere zwischen 1 eV und 100 keV, vorzugsweise zwischen 25 eV und 50 keV, noch bevorzugter zwischen 25 eV und 10 keV, am bevorzugtesten zwischen 25 eV und 1 keV, eingestellt. Ein Niederenergie-Ionenstrahl wie beispielweise ein Argonionenstrahl hat in einer ersten Ausführungsform eine Energie zwischen 50 eV und 1 keV.

30

35

Die Stromdichte (Anzahl der Teilchen, insbesondere Ionen, pro Zeit- und Flächeneinheit) wird insbesondere zwischen 0.1 mA/cm^2 und 10 mA/cm^2 , vorzugsweise zwischen 0.1 mA/cm^2 und 5 mA/cm^2 , noch bevorzugter zwischen 0.1 mA/cm^2 und 2 mA/cm^2 , gewählt.

Die Behandlungsdauer der Behandlung des Substrats unter Ausbildung einer amorphen Schicht wird insbesondere zwischen 1 s und 200 s, vorzugsweise zwischen 10 s und 200 s, noch bevorzugter zwischen 50 s und 200 s, am bevorzugtesten zwischen 100 s und 200 s, gewählt. Die Behandlungsdauer ist insbesondere prozess- und materialabhängig.

Eine erste Dicke der amorphen Schicht unmittelbar nach der Erzeugung in einer Substratoberfläche ist insbesondere kleiner als 100 nm, vorzugsweise kleiner als 50 nm, noch bevorzugter kleiner als 10 nm, am bevorzugtesten kleiner als 5 nm. Die erste Dicke der amorphen Schicht ist insbesondere prozess- und materialabhängig. Durch die Amorphisierung wird eine einige Nanometer dicke amorphe Schicht erzeugt, in der die Atome regellos angeordnet sind. Die regellose Anordnung führt zu einem besseren Bondergebnis, insbesondere bei vergleichsweise geringen Temperaturen.

Vorzugsweise ist es vorgesehen, dass zur Ausbildung der amorphen Schicht die primäre Teilchenstrahlung mit Teilchen, die eine erste kinetische Energie aufweisen, realisiert wird und zur Schichtdickenreduktion der amorphen Schicht eine sekundäre Teilchenstrahlung mit Teilchen, die eine zweite kinetische Energie aufweisen, realisiert wird, wobei die zweite kinetische Energie kleiner ist als die erste kinetische Energie. Es hat sich herausgestellt, dass mit einer Teilchenstrahlung nicht nur eine Umwandlung der Substratoberfläche in die amorphe Phase zur Ausbildung der amorphen Schicht bedingt werden kann, sondern es auch möglich ist, mit einer Teilchenstrahlung die Schichtdickenreduktion substratschonend zu realisieren. Vorstellbar ist auch, dass die Schichtdickenreduktion mechanisch und/oder chemisch und/oder mittels Laserlicht durchgeführt wird oder die Schichtdickenreduktion wird von einem mechanischen und/oder chemischen Abtrag unterstützt und/oder einem Abtrag, der durch das Einwirken von Laserlicht veranlasst wird. Insbesondere ist es bevorzugt vorgesehen, dass die Teilchen mit der ersten kinetischen Energie und die Teilchen mit der zweiten kinetischen Energie von derselben Teilchenquelle bereitgestellt werden. Dadurch ist es mit Vorteil ohne großen Aufwand möglich, von einer Behandlung zur Ausbildung der amorphen Phase zu einer Schichtdickenreduktion zu wechseln.

Insbesondere ist unter einer ersten und/oder zweiten kinetischer Energie diejenige Energie der Teilchen zu verstehen, die den Teilchen zuzuordnen ist, wenn sie auf die Substratoberfläche treffen. Sofern es sich bei den Teilchen um Ionen handelt, lässt sich die kinetische Energie besonders einfach über die Beschleunigungsspannung in der Ionenquelle einstellen. Es ist aber auch vorstellbar, dass die kinetische Energie durch eine entsprechende Bremsmaßnahme, beispielsweise stromabwärts eines Ausgangs aus der Ionenquelle, eingestellt wird oder durch eine Verlängerung des Flugweges.

10 Typische Gase und/oder Gasgemische, die für die Oberflächenreinigung, Amorphisierung und das anschließende dynamische Zerstäuben bzw. Schichtdickenreduktion mittels Teilchenstrahlung verwendet werden, sind unter anderem:

- Atomare Gase, insbesondere
 - o Ar, He, Kr, Ne, Xe,
- 15 - Molekulare Gase, insbesondere
 - o H₂, N₂, CO, CO₂,
- Gasgemische, insbesondere
 - o Formiergas FG (Argon zwischen 100% und 50% + Wasserstoff) und/oder
 - o Formiergas RFG (Wasserstoff zwischen 100% und 50% + Argon) und/oder
 - 20 o Formiergas NFG (Argon zwischen 100% und 50% + Stickstoff)

Bevorzugt werden atomare Gase, vorzugsweise Edelgase, insbesondere Ar, He, Kr, Ne, Xe, verwendet.

25 Die Behandlung, insbesondere die Reinigung, die Entfernung unerwünschter Oxide und/oder die Amorphisierung finden bevorzugt in einer Vakuumkammer als Prozesskammer statt. Die Vakuumkammer ist dabei mit einem geeigneten Vakuumpumpsystem auf einen Druck von weniger als 1 bar, vorzugsweise weniger als 1 mbar, noch bevorzugter weniger als 10⁻³ mbar, evakuierbar. Die Vakuumkammer wird, insbesondere vor der Verwendung der Ionen zur Amorphisierung, vorzugsweise auf einen vorgenannten Druck, noch bevorzugter vollständig, evakuiert. Der Sauerstoffanteil in der Prozesskammer wird so stark reduziert, dass eine erneute Oxidation der Substratoberflächen nicht möglich ist.

35 Zur Schichtdickenreduktion werden die für den Ionenstrahl relevanten Parameter, insbesondere Ionenenergie und/oder Ionenstromstärke, schrittweise so herabgesetzt oder verändert, dass die im ersten Prozessschritt erzeugte amorphe Schicht schonend reduziert

wird ohne andere, kollaterale Veränderungen der oberflächennahen Bereiche des Substrats wie beispielsweise Implantation, weitere Amorphisierung oder Zerstäubung des Substratmaterials selber.

- 5 Durch Reduktion der Ionenenergie des Ionenstrahls wird die Zerstäubungsrate reduziert. Bevorzugt wird die Ionenenergie abgesenkt, sodass eine schonende Abtragung der amorphen Schicht in einem geeigneten Zeitfenster erfolgen kann. Der Abtrag erfolgt immer noch über die physikalische Zerstäubungswirkung der Ionen. Das Substrat verbleibt im gleichen Vorbehandlungsmodul und es ist keine weitere (nass)-chemische und/oder physikalische Vorbehandlung zur Aktivierung der Oberfläche notwendig.

- 15 Die Behandlungsdauer zur Schichtdickenreduktion wird in der Ausführungsform der Zerstäubung der amorphen Schicht ohne aktive Ionenbeschleunigung insbesondere zwischen 1 s und 1500 s, vorzugsweise zwischen 20 s und 1200 s, noch bevorzugter zwischen 30 s und 1200 s, gewählt.

- 20 Die Behandlungsdauer wird in der Ausführungsform der Zerstäubung der amorphen Schicht mit einer geringen Ionenbeschleunigung insbesondere zwischen 1 s und 1200 s, vorzugsweise zwischen 20 s und 900 s, noch bevorzugter zwischen 30 s und 600 s, gewählt.

- 25 Durch die vorgesehene Verwendung der Ionenkanone beziehungsweise des Ionenstrahls ohne Ionenbeschleunigung kann eine entsprechend geringe Ionenenergie und eine möglichst geringe Stromdichte erreicht werden. Neben der geringen Ionenenergie wird auch eine geringe Behandlungsdauer angestrebt. Dabei verändert sich bei der optimalen Auswahl der relevanten Parameter die Oberflächenrauigkeit bzw. Oberflächenglättung im zweiten Prozessschritt nicht weitgehend.

- 30 Die Dicke der erzeugten amorphen Schicht aber auch die Reinheit der amorphen Schicht beeinflusst die Bondstärke im späteren Bondverfahren. Laut EP 3 161 855 B1 nimmt die Bondstärke mit steigender Dicke der amorphen Schicht zu. Die Dicke der amorphen Schicht kann aber reduziert werden bei Substraten mit einer Substratoberfläche mit einer sehr geringen mittleren Rauheit. Die mittlere Rauheit der Substratoberfläche ist insbesondere kleiner als 10 nm, vorzugsweise kleiner als 8 nm, noch bevorzugter kleiner als 6 nm, am bevorzugtesten kleiner als 4 nm, am allerbevorzugtesten kleiner als 1 nm.

Insbesondere ist es vorgesehen, dass die zweite Dicke der amorphen Schicht eines zu bondenden Substrates auf ein notwendiges Minimum reduziert wird.

Die zweite Dicke der amorphen Schicht am Substrat ist damit nach der weiteren Zerstäubung der Substratoberfläche kleiner als 15 nm, vorzugsweise kleiner als 5 nm, noch bevorzugter kleiner als 2 nm, am bevorzugtesten kleiner als 0,5 nm. In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung liegt die zweite Dicke der amorphen Schicht am Substrat nach der Zerstäubung der Substratoberfläche zwischen 0,1 nm und 2 nm. Dadurch kann die stark reduzierte amorphe Schicht noch immer die Bondstärke beim Bonden der vorbe-

5 bung der Substratoberfläche kleiner als 15 nm, vorzugsweise kleiner als 5 nm, noch bevorzugter kleiner als 2 nm, am bevorzugtesten kleiner als 0,5 nm. In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung liegt die zweite Dicke der amorphen Schicht am Substrat nach der Zerstäubung der Substratoberfläche zwischen 0,1 nm und 2 nm. Dadurch kann die stark reduzierte amorphe Schicht noch immer die Bondstärke beim Bonden der vorbe-

10 handelten Substrate positiv beeinflussen, wobei die zweite Dicke der amorphen Restschicht soweit reduziert wurde, dass die Bondgrenzschicht einen viel niedrigeren elektrischen Widerstand im gebondeten Substratstapel zeigt.

Vorzugsweise ist es vorgesehen, dass ein Verhältnis der zweiten kinetischen Energie zu der ersten kinetischen Energie kleiner ist als 0,1, bevorzugt kleiner als 0,05 und besonders bevorzugt kleiner als 0,01. Es hat sich als besonders vorteilhaft erwiesen, wenn die zweite kinetische Energie möglichst klein ist, da auf diese Weise ein besonders schonender Abtrag des amorphen Materials möglich ist, so dass bei der der Schichtdickenreduktion der amorphen Schicht keine weitere Schäden an der Bindungsfläche entstehen. Insbesondere wird die Wahrscheinlichkeit zur erneuten Phasenumwandlung in die amorphe Phase reduziert oder die Implementierung von Ionen in das Substrat. Es ist auch eine Erkenntnis, dass es ausreicht, wenn die Teilchen mit ihrer Diffusionsgeschwindigkeit auf die amorphe Schicht treffen, um die gewünschte Schichtdickenreduktion zu veranlassen.

15 der ersten kinetischen Energie kleiner ist als 0,1, bevorzugt kleiner als 0,05 und besonders bevorzugt kleiner als 0,01. Es hat sich als besonders vorteilhaft erwiesen, wenn die zweite kinetische Energie möglichst klein ist, da auf diese Weise ein besonders schonender Abtrag des amorphen Materials möglich ist, so dass bei der der Schichtdickenreduktion der amorphen Schicht keine weitere Schäden an der Bindungsfläche entstehen. Insbesondere wird die Wahrscheinlichkeit zur erneuten Phasenumwandlung in die amorphe Phase reduziert oder die Implementierung von Ionen in das Substrat. Es ist auch eine Erkenntnis, dass es ausreicht, wenn die Teilchen mit ihrer Diffusionsgeschwindigkeit auf die amorphe Schicht treffen, um die gewünschte Schichtdickenreduktion zu veranlassen.

20 besondere wird die Wahrscheinlichkeit zur erneuten Phasenumwandlung in die amorphe Phase reduziert oder die Implementierung von Ionen in das Substrat. Es ist auch eine Erkenntnis, dass es ausreicht, wenn die Teilchen mit ihrer Diffusionsgeschwindigkeit auf die amorphe Schicht treffen, um die gewünschte Schichtdickenreduktion zu veranlassen.

Insbesondere ist es vorgesehen, dass die zweite kinetische Energie der sekundären Teilchenstrahlung während der Schichtdickenreduktion geändert wird. Im Gegensatz dazu wird die erste kinetische Energie der primären Teilchenstrahlung im Wesentlichen konstant gehalten. Die Reduktion der zweiten kinetischen Energie erweist sich als vorteilhaft, weil mit abnehmender Schichtdicke die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit der Substratoberfläche des Substrats reduziert wird. Gleichzeitig wird zu Beginn der Schichtdickenreduktion ein vergleichsweise großer Abtrag veranlasst, der sich als vorteilhaft erweist in Hinblick auf die Dauer des Nachbearbeitungsschritts, der zur Schichtdickenreduktion führt.

25 Insbesondere ist es vorgesehen, dass die zweite kinetische Energie der sekundären Teilchenstrahlung während der Schichtdickenreduktion geändert wird. Im Gegensatz dazu wird die erste kinetische Energie der primären Teilchenstrahlung im Wesentlichen konstant gehalten. Die Reduktion der zweiten kinetischen Energie erweist sich als vorteilhaft, weil mit abnehmender Schichtdicke die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit der Substratoberfläche des Substrats reduziert wird. Gleichzeitig wird zu Beginn der Schichtdickenreduktion ein vergleichsweise großer Abtrag veranlasst, der sich als vorteilhaft erweist in Hinblick auf die Dauer des Nachbearbeitungsschritts, der zur Schichtdickenreduktion führt.

30 stratoberfläche des Substrats reduziert wird. Gleichzeitig wird zu Beginn der Schichtdickenreduktion ein vergleichsweise großer Abtrag veranlasst, der sich als vorteilhaft erweist in Hinblick auf die Dauer des Nachbearbeitungsschritts, der zur Schichtdickenreduktion führt.

Die Schichtdickenreduktion der amorphen Schicht erfolgt in einer ersten Ausführungsform in mehreren Schritten, wobei die Parameter des Ionenstrahls mehrmals verändert, insbesondere reduziert werden, sodass der Abtrag der amorphen Schicht immer kleiner wird bis die gewünschte minimale Schichtdicke der amorphen Schicht erreicht wird. In dieser ersten Ausführungsform erfolgt die dynamische Zerstäubung der amorphen Schicht bevorzugt in zwei bis fünf Schritten, wobei bei jedem Schritt die relevanten Ionenstrahlparameter so verändert werden, dass eine geringere Teilchenanzahl mit weniger Energie auf die Substratoberfläche aufprallt.

Weiterhin ist es bevorzugt vorgesehen, dass die zweite kinetische Energie der Teilchen der zweiten Teilchenstrahlung kontinuierlich geändert wird. In einer beispielhaften Ausführungsform werden die Parameter des Ionenstrahls kontinuierlich verändert, insbesondere reduziert. Bevorzugt wird die Ionenstrahlspannung im Anschluss an dem ersten Prozessschritt kontinuierlich reduziert für eine schonende und kontrollierte Zerstäubung der amorphen Schicht bis zum Erreichen der benötigten Restschichtdicke.

Insbesondere ist es vorgesehen, dass die zweite kinetische Energie der Teilchen der zweiten Teilchenstrahlung schrittweise geändert wird. In dieser Ausführungsform wird im zweiten Prozessschritt eine Schichtdickenreduktion, insbesondere eine Zerstäubung der amorphen Schicht mit dem Ionenstrahl ohne Ionenbeschleunigung durchgeführt (engl.: idle activation). Dabei wird die Ionenkanone im Leerlauf beziehungsweise mit Leerlaufansteuerung betrieben. Die Ionen werden nicht beschleunigt und die Ionenstrahlspannung wird in einer ersten Ausführungsform schrittweise reduziert. Die Ionenstrahlspannung wird insbesondere von 200 V auf 50 V schrittweise reduziert. Beispielsweise wird die Ionenstrahlspannung in 50 V Schritten, bevorzugter in 20 V Schritten reduziert. In einer zweiten Ausführungsform wird die Ionenstrahlspannung nicht schrittweise, sondern kontinuierlich von 200 V auf 50 V reduziert. Im Leerlauf wird die Plasmaquelle beziehungsweise Ionenquelle erhalten und die Potentiale der Gitter der Ionenkanone liegen nach Reduktion der Ionenstrahlspannung in der Größenordnung der Leerlaufspannung.

Durch die Reduktion der Ionenenergie und die Reduktion der Anzahl der Ionen, die in der Leerlaufansteuerung die Ionenquelle verlassen, verringert sich die Zerstäubungsrate erheblich, sodass eine sehr schonende Herabsetzung der Schichtdicke der amorphen Schicht erfolgt.

35

In einer weiteren Ausführungsform des zweiten Prozessschrittes werden die Ionen gering beschleunigt und die Ionenstrahlspannung wird in einer ersten Ausführungsform schrittweise von 200 V auf 50 V reduziert beziehungsweise in ergänzenden Ausführungsform kontinuierlich von 200 V auf 50 V reduziert. Mit einer geringen Beschleunigung der Ionen können im Vergleich zu der Ausführungsform ohne aktive Beschleunigung der Ionen höhere Zerstäubungsraten erreicht werden, sodass die Behandlungsdauer verkürzt werden kann. Das ermöglicht die Behandlung von dickeren amorphen Schichten aus dem ersten Prozessschritt wodurch dieser verkürzt werden kann. Insbesondere kann die Reduktion der amorphen Schichtdicke im ersten Prozessschritt, der mit viel höheren Ionenenergien durchgeführt wird, verkürzt werden, da die amorphe Schicht im zweiten Prozessschritt schonender und effektiver abgetragen werden kann. Die Auswahl der Ausführungsform ist abhängig vom Substratmaterial und von den eingesetzten Ionen, da die Schichtdicke der amorphen Schicht und die Zerstäubungsrate stark variieren können.

Bei der Ausführungsform mit einer schrittweisen Reduktion wird die Ionenstrahlspannung in mehreren Schritten, insbesondere in mindestens einem Schritt, bevorzugter in mindestens zwei Schritten, noch bevorzugter in mindestens drei Schritten, am bevorzugtesten in vier Schritten verringert. Die Schwellspannung wo eine Zerstäubung beginnt liegt zwischen 20 V und 50 V abhängig vom Substratmaterial und von den eingesetzten Ionen. Die Ionenstrahlspannung wird insbesondere von 200 V auf 50 V schrittweise reduziert. Die kinetische Energie der Teilchen ist dabei niedrig und liegt insbesondere zwischen 200 eV und 50 eV. Im Vergleich dazu wird der Oberflächenreinigungs- und Aktivierungs-Prozess im ersten Prozessschritt mit beschleunigten Teilchen mit einer relativ hohen kinetischen Energie durchgeführt, insbesondere bis zu 1000 eV.

Durch die individuelle Einstellung der Potentiale der Gitter der Ionenkanone, insbesondere vom Absauggitter und vom Beschleunigungsgitter, kann die Beschleunigung der Ionen gesteuert werden. Ziel der vorliegenden Erfindung im zweiten Prozessschritt ist es eine Ionenkanone bereitzustellen beziehungsweise so zu steuern, dass mit einer sehr geringen Ionenstrahlspannung und der Ausnützung der Diffusion der erzeugten Ionen eine sehr geringe Zerstäubung der amorphen Schicht erreicht werden kann.

Die zweite kinetische Energie der Teilchen der sekundären Teilchenstrahlung wird insbesondere zwischen 1 eV und 1 keV, vorzugsweise zwischen 1 eV und 800 eV, noch bevorzugter zwischen 20 eV und 500 eV, am bevorzugtesten zwischen 20 eV und 300 eV, am allerbevorzugtesten zwischen 50 eV und 200 eV, eingestellt. Als besonders vorteilhaft hat

sich eine Energie zwischen 50 eV und 200 eV herausgestellt. Bevorzugt ändert sich die zweite kinetische Energie über mindestens zwei Drittel der vorstehenden Intervalle. Es handelt sich somit um eine vergleichsweise große Spanne an unterschiedlichen zweiten kinetischen Energien die zum Abtrag der amorphen Phase herangezogen werden. Dies hat sich als vorteilhaft erwiesen, eine möglichst optimale Einstellung für die Schichtdickenreduktion zu finden, die schnell realisierbar ist, ohne Schäden an der Substratfläche neu zu veranlassen.

Besonders bevorzugt ist es vorgesehen, wenn die zweite Dicke einen Wert aufweist, der kleiner als 15 nm, bevorzugt kleiner als 5 nm und am bevorzugten kleiner als 2 nm oder sogar kleiner als 0,5 nm ist. Durch derartig kleine zweite Dicken, insbesondere kleiner als 2 nm, kann in vorteilhafter Weise auf die positiven Eigenschaften der amorphen Schicht beim Verbinden, d. h. Bonden, zurückgegriffen werden, während die amorphe Schicht derart dünn ist, dass mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit, die amorphe Schicht beim Bonden in eine kristalline Phase zurückgeführt wird. Mit Vorteil weist das erzeugte Gesamtsubstrat, das aus dem Verbinden des Substrats und des weiteren Substrats hervorgegangen ist, dann nur eine geringe oder sogar keine amorphen Anteile auf, die nachteilig sind in Hinblick auf einzelne physikalische Eigenschaften des Gesamtsubstrats.

Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Behandlung zur Ausbildung der amorphen Schicht und die Schichtdickenreduktion in einem gemeinsamen Modul durchgeführt werden. Dadurch ist es mit Vorteil möglich, die Schichtdickenreduktion unmittelbar im Anschluss an die Ausbildung der amorphen Phase zu realisieren, insbesondere ohne aufwendigen Transport des Substrats. Außerdem können mit Vorteil, dieselben Eigenschaften im Umfeld des Substrats genutzt werden, wie beispielsweise eine Temperatur und/oder ein Vakuumdruck in eine Behandlungskammer der Vorrichtung zur Durchführung es Verfahrens.

Bevorzugt ist es vorgesehen, dass Schichtdickenreduktion zwischen 1 s und 1500 s, vorzugsweise zwischen 20 s und 1200 s, noch bevorzugter zwischen 30 s und 1200 s, dauert. Es hat sich herausgestellt, dass eine entsprechende Schichtdickenreduktion vergleichsweise schnell realisierbar ist. Dabei hängt die erforderliche Zeitspanne im Wesentlichen von der zweiten kinetischen Energie ab und von der einzustellenden zweiten Dicke.

Ein weiterer Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Verbinden eines Substrats, das mit dem erfindungsgemäßen Verfahren vorbehandelt wurde, mit einem

weiteren Substrat, das insbesondere mit dem erfindungsgemäß Verfahren vorbehandelt wurde, wobei das Substrat und das weitere Substrat in einem Bondprozess verbunden werden. Alle Vorteile und Eigenschaften zu dem vorstehenden Verfahren lassen sich analog übertragen auf dieses Verfahren und andersrum. Dabei werden das Substrat und das weitere Substrat über jeweilige Bindungsflächen miteinander verbunden bzw. gebondet. Die Kontaktierung zweier Substratoberflächen mit sehr dünnen amorphen Schichten im unteren nm beziehungsweise im subnanometer Bereich führt zu einer besseren Bondstärke mit dem Vorteil einer verschwindend kleinen amorphen Grenzschrift am Substratstapel, die durch die stark reduzierte Schichtdicke keinen substantiellen elektrischen Widerstand an der Bondgrenzfläche leistet.

Insbesondere ist es vorgesehen, dass die zweite Dicke beim Verbinden im Bondprozess auf eine dritte Dicke reduziert wird. Dadurch werden mit Vorteil weitere amorphe Bestandteile im Gesamtschichtstapel vermieden. Insbesondere ist es vorgesehen, dass Bondparameter derart eingestellt werden, dass eine Umwandlung der amorphen Phase in eine kristalline Phase begünstigt wird.

Die gesamte Dicke der amorphen Schicht im Substratstapel, gebildet aus dem Substrat und dem weiteren Substrat, ist damit nach dem Bonden kleiner als 30 nm, vorzugsweise kleiner als 15 nm, noch bevorzugter kleiner als 5 nm, am bevorzugtesten kleiner als 2 nm, am allerbevorzugtesten kleiner als 1 nm.

Insbesondere kann beim und/oder nach dem Bonden und/oder bei der Wärmebehandlung während und/oder nach dem Bonden eine Phasenumwandlung vom amorphen Zustand in den kristallinen Zustand erfolgen, sodass die zweite Dicke, d. h. eine Restschichtdicke der amorphen Schicht weiter auf eine dritte Dicke reduziert wird. In einer bevorzugten Ausführungsform werden die genannten Prozessparameter so gewählt, dass die Minimierung der Schichtdicke der amorphen Schicht der zu bondenden Substrate dazu führt dass beim und/oder nach dem Bonden und/oder bei der Wärmebehandlung eine vollständige Umwandlung der amorphen Restschicht des gebondeten Substratstapels in die kristalline Phase erfolgt.

Nach der Vorbehandlung mindestens einer der beiden Substratoberflächen, bevorzugt beider Substratoberflächen, erfolgt insbesondere eine Ausrichtung der beiden Substrate zueinander in einem Ausrichtungsmodul bevorzugt direkt in der Bondkammer. Das Bonden der vorbehandelten und ausgerichteten Substrate erfolgt in der Bondkammer, wobei

die Bondkammer vorzugsweise in einer Cluster-Anlage integral an die Prozesskammer zur Amorphisierung und zur dynamischen Zerstäubung angeschlossen ist, noch bevorzugter unter ständiger Aufrechterhaltung der Evakuierung von der Prozesskammer in die Bondkammer überführbar ist.

5

In einer bevorzugten Hochvakuumumgebung, insbesondere $< 10^{-7}$ mbar, bevorzugt $< 10^{-8}$ mbar, bonden die polierten und vorbehandelten Substratoberflächen spontan und kovalent durch reine Kontaktierung ohne zusätzlichen Druck oder zumindest nur sehr geringen Druck, insbesondere bei Raumtemperatur. Bei Bedarf kann der Bondvorgang durch weitere Kraft und/oder Temperatureinwirkung verstärkt werden.

10

Insbesondere ist es vorgesehen, dass die zweite Dicke derart eingestellt wird, dass die beim Bonden vorliegende amorphe Schicht in eine kristalline Phase überführt wird. Insbesondere werden mehr als 30 %, bevorzugt mehr als 50 % und besonders mehr als 70 % der amorphen Bestandteile der amorphen Schichten in die kristalline Phase rückgeführt. Es ist auch vorstellbar, dass die zweite Dicke derart eingestellt wird, dass eine vollständige Rückführung der amorphen Bestandteile in die kristalline Phase erfolgt.

15

Besonders bevorzugt ist es vorgesehen, dass eine Summe aus der zweiten Dicke des Substrats und der zweiten Dicke des weiteren Substrats kleiner ist als 30 nm, bevorzugt kleiner als 15 nm, noch bevorzugter kleiner als 5 nm und besonders bevorzugt kleiner als 2 nm. Es hat sich mit Vorteil herausgestellt, dass beim Einstellen der entsprechenden zweiten Dicken, keine amorphe Schicht am Gesamtsubstrat ausgebildet wird, die als technisch störend wirkt.

20

25

Ein weiterer Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist eine Vorrichtung zur Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens, umfassend:

- Teilchenquelle, mit der Teilchen beschleunigbar sind, und
- Substratträger zum Halten des Substrats. Alle für die Verfahren beschriebenen Eigenschaften und Vorteile gelten analog für die Vorrichtung und andersrum.

30

Auf die Druckschrift EP 3 161 855 B1 wird in Bezug auf die Vorrichtung verwiesen.

Die Erfindung betrifft insbesondere ein Verfahren und eine Vorrichtung, um einen dynamischen Zerstäubungsprozess auf einer zu bondenden Substratoberfläche durchzuführen.

35

Dabei wird bevorzugt eine Ionenkanone derart bereitgestellt und/oder gesteuert, dass mit einer sehr geringen und abnehmenden Ionenstrahlspannung und der Ausnützung der Diffusion der erzeugten Ionen, eine niedrige Zerstäubung der amorphen Schicht erreicht werden kann, sodass diese auf eine minimale Schichtdicke reduziert wird, ohne weitere
5 Schäden am Substrat zu verursachen.

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

10

Figur 1: Flussdiagramm für ein beispielhaftes Verfahren zum Herstellen einer sub-nanometer dünnen amorphen Schicht auf einer zu bondenden Substratoberfläche;

15

Figur 2: Zeitdiagramm mit Dickenprofil (Schichtdicke D) zur Veranschaulichung der Abtragung der Oxidschicht (A) und Bildung der amorphen Schicht (C) auf der Substratoberfläche (B) im ersten Prozessschritt (I) des erfindungsgemäßen Verfahrens sowie Reduzierung der gebildeten amorphen Schicht (C) im zweiten, mehrstufigen, Prozessschritt (II);

20

Figur 3a: Schematisches Ionenstrahlspannungs-Zeit-Diagramm mit einer schrittweisen Reduzierung der Ionenstrahlspannung im zweiten Prozessschritt;

25

Figur 3b: Schematisches Ionenstrahlspannungs-Zeit-Diagramm mit einer kontinuierlichen Reduzierung der Ionenstrahlspannung im zweiten Prozessschritt.

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

30

Figur 1 zeigt ein Flussdiagramm eines beispielhaften Verfahrens zur Oberflächenbehandlung in mehreren Schritten gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. In einem ersten Prozessschritt I 100 wird die Energie von niederenergetischen Ionen so eingestellt, dass diese beim Auftreffen auf eine Substratoberfläche eine Oberflächenreinigung, insbesondere eine Entfernung einer nativen Oxidschicht und eine Amorphisierung, insbesondere unter einer Phasenumwandlung, bewirken.
35

In einem zweiten Prozessschritt II 200 wird durch eine dynamische Zerstäubung der Substratoberfläche mit einer sehr geringen Ionenbeschleunigung oder ohne aktive Ionenbeschleunigung und mit abnehmender Ionenstrahlspannung die im ersten Prozessschritt I 100 erzeugte amorphe Schicht C schrittweise reduziert ohne substantielle Beschädigung der darunterliegenden Substratoberfläche. Die Prozessschrittesschritte I 100 und II 200 finden im gleichen Modul statt. Im zweiten Prozessschritt II 200 wird die Ionenstrahlspannung schrittweise von einer ersten Spannung U_{B1} (erster Verfahrensschritt 210) auf eine vierte Spannung U_{B4} (vierter Verfahrensschritt 240) herabgesetzt, so dass die Schichtdicke D der amorphen Schicht C schonend reduziert wird. Die Verfahrensschritte 210 bis 240 sind dabei bevorzugt Teil des zweiten Prozessschritts II 200. Durch das Ausschalten der Ionenbeschleunigung (engl: idle activation) wird die Diffusion der in der Plasmaquelle erzeugten Ionen ausgenutzt und es finden keine kollateralen Veränderungen der oberflächennahen Bereiche des Substrats B statt wie beispielsweise Implantation, weitere Amorphisierung oder Zerstäubung des darunterliegenden, kristallinen Substratmaterials selber. Durch die geringer werdende Ionenstrahlspannung U nimmt die Ionenzerstäubung ab, so dass immer weniger Material abgetragen wird.

Bei Bedarf können beispielsweise bei den zweiten und dritten Schritten (220, 230) die Parameter, wie beispielsweise Einstellung der Ionenstrahlspannung U oder Dauer t der Behandlung mit einer definierten Ionenstrahlspannung U, durch eine Regelschleife optimiert werden.

Die zweite Dicke D2 der amorphen Schicht C am Substrat B ist nach der Zerstäubung der Substratoberfläche vorzugsweise kleiner als 15 nm, bevorzugt kleiner als 5 nm, noch bevorzugter kleiner als 2 nm, am bevorzugtesten kleiner als 1 nm, am allerbevorzugtesten kleiner als 0,5 nm.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung liegt die zweite Dicke D2 der amorphen Schicht C am Substrat B nach der dynamischen Zerstäubung der Substratoberfläche zwischen 0,1 nm und 2 nm.

Gemäß **Figur 2** wird in einem ersten Prozessschritt I100 das native Oxid A auf der Substratoberfläche eines Substrats B durch Ionenbestrahlung abgetragen. Im ersten Prozessschritt I 100 nimmt die Dicke der Oxidschicht A ab, bis schließlich keine Oxidschicht A mehr vorhanden ist. Mit zunehmender Zerstäubung und damit mit zunehmender Schadensakkumulation kommt es zur Bildung einer amorphen Schicht C.

Die Ionenquelle ist beispielsweise eine Niederenergie-Ionenquelle. Die in der Ionisationskammer erzeugten Ionen werden mit Hilfe elektrischer Felder aus dem Ionenentstehungsraum extrahiert. Der Ionenstrahl wird dann auf den gewünschten Durchmesser fokussiert
5 wobei eine homogene Stromdichte im Strahl eingestellt wird. Die Ionen können auf die gewünschte Energie abgebremst und refokussiert werden. Die Ionenenergien liegen beispielsweise zwischen einigen eV und 1 keV.

10 In einer ersten Ausführungsform wird im zweiten Prozessschritt II 200 eine Zerstäubung der amorphen Schicht C der vorbehandelten Substratoberflächen mit dem Ionenstrahl ohne Ionenbeschleunigung im gleichen Modul durchgeführt. Dabei wird die Ionenkanone im Leerlauf beziehungsweise mit Leerlaufansteuerung betrieben und die Diffusion der Ionen aus der Ionenquelle wird ausgenützt.

15 In einer zweiten Ausführungsform des zweiten Prozessschrittes II200 werden die Ionen gering beschleunigt.

Durch die individuelle Einstellung der Potentiale der Gitter der Ionenkanone, insbesondere vom Absauggitter und vom Beschleunigungsgitter, wird die Beschleunigung der Ionen ge-
20 steuert. Ziel der vorliegenden Erfindung im zweiten Prozessschritt II 200 ist es eine Ionenkanone bereitzustellen, beziehungsweise so zu steuern, dass mit einer sehr geringen Ionenstrahlspannung und der Ausnützung der Diffusion der erzeugten Ionen eine sehr geringe Zerstäubung der amorphen Schicht erreicht werden kann.

25 Gemäß Figur 2 wird die Ionenenergie beziehungsweise die Ionenstrahlspannung U in mehreren Schritten verringert. Figur 2 zeigt eine Verringerung der Ionenstrahlspannung in vier Schritten 1 bis 4. Durch die schrittweise Reduktion der Ionenenergie verringert sich die Zerstäubungsrate schrittweise, so dass eine möglichst hohe und dabei sehr schonende Herabsetzung der Schichtdicke D der amorphen Schicht C erfolgt. Die Schichtdicke D der amorphen Schicht C verringert sich im zweiten Prozessschritt II 200 gemäß Fi-
30 gur 2 von einer ersten Dicke D1 auf eine zweite Dicke D2, die sogenannte Restschichtdicke D2. Dabei wird die Ionenstrahlspannung schrittweise von einer ersten Spannung (U_{B1}) auf eine vierte Spannung (U_{B4}) herabgesetzt. Dabei gilt $U_{B1} > U_{B2} > U_{B3} > U_{B4}$. Die Ionenstrahlspannung U wird insbesondere von 200 V auf 50 V schrittweise reduziert.

35

Die Behandlungsdauer t wird in der Ausführungsform der Zerstäubung der amorphen Schicht C ohne aktive Ionenbeschleunigung insbesondere zwischen 1 s und 1500 s, vorzugsweise zwischen 20 s und 1200 s, noch bevorzugter zwischen 30 s und 1200 s, gewählt.

5 Die Behandlungsdauer t wird in der Ausführungsform der Zerstäubung der amorphen Schicht C mit einer geringen Ionenbeschleunigung insbesondere zwischen 1 s und 1200 s, vorzugsweise zwischen 20 s und 900 s, noch bevorzugter zwischen 30 s und 600 s, gewählt.

10 Figur **3a und 3b** zeigen die Änderung der Ionenstrahlspannung im Verlauf des zweiten Prozessschrittes II in unterschiedliche Ausführungsformen, einmal schrittweise (siehe Figur 3a) und einmal kontinuierlich (siehe Fig. 3b). Mit den Ionenstrahlspannungen U , U_{B1-B4} lassen sich entsprechende zweite kinetischen Energien für die Ionen einstellen, wenn sie

15 auf die Substratoberfläche des Substrats B treffen.

Bezugszeichen:

	A	Oxidschicht	
20	B	Substrat	
	C	Amorphe Schicht	
	D	Schichtdicke	
	D1	erste Dicke	
	D2	zweite Dicke, Restschichtdicke	
25	U , U_{B1-B4}	Ionenstrahlspannungen	
	t	Zeit, Behandlungsdauer	
	100	erster Prozessschritt I, Behandlung	
	200	zweiter Prozessschritt II, Schichtdickenreduktion	
	210	erster Verfahrensschritt	
30	220	zweiter Verfahrensschritt	
	230	dritter Verfahrensschritt	
	240	vierter Verfahrensschritt V	Volt
	s	Sekunden	

Ansprüche

1. Verfahren zur Oberflächenbehandlung eines Substrats (B), insbesondere als
5 Vorbereitungsschritt für ein Verfahren zum Verbinden des Substrats (B) mit einem weiteren Substrat, umfassend:
 - Bereitstellen des Substrats (B) mit einer für das Verbinden vorgesehenen Bindungsfläche,
 - Behandlung (100) des Substrats (B) zumindest in einem Teilbereich der Bindungsfläche unter Ausbildung einer amorphen Schicht (C) mit einer ersten
10 Dicke (D1), wobei zur Ausbildung der amorphen Schicht (C) vorzugsweise eine primäre Teilchenstrahlung verwendet wird, und
 - Schichtdickenreduktion (200) der amorphen Schicht (C), bevorzugt auf eine zweite Dicke (D2).
- 15 2. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei zur Ausbildung der amorphen Schicht (C) die primäre Teilchenstrahlung mit Teilchen, die eine erste kinetische Energie aufweisen, realisiert wird und zur Schichtdickenreduktion (200) der amorphen Schicht (C) eine sekundäre Teilchenstrahlung mit Teilchen, die eine zweite kinetische Energie aufweisen, realisiert wird, wobei die zweite kinetische Energie
20 kleiner als die erste kinetische Energie ist.
3. Verfahren gemäß Anspruch 2, wobei ein Verhältnis der zweiten kinetischen Energie zu der ersten kinetischen Energie kleiner als 0,1, bevorzugt kleiner als 0,05 und besonders bevorzugt kleiner als 0,01 ist.
25
4. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 oder 3, wobei die zweite kinetische Energie während der Schichtdickenreduktion (200) geändert wird.
5. Verfahren gemäß Anspruch 4, wobei die zweite kinetische Energie der Teilchen
30 der sekundären Teilchenstrahlung kontinuierlich geändert wird.
6. Verfahren gemäß Anspruch 4, wobei die zweite kinetische Energie der Teilchen der sekundären Teilchenstrahlung schrittweise geändert wird.
- 35 7. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zweite Dicke (D2) einen Wert annimmt, der kleiner als 15 nm, bevorzugt kleiner als 5 nm

und am bevorzugten kleiner als 2 nm oder sogar kleiner als 0,5 nm ist.

- 5 8. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Behandlung zur Ausbildung der amorphen Schicht (C) und die Schichtdickenreduktion (200) in einem gemeinsamen Modul durchgeführt werden.
- 10 9. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zweite kinetische Energie der sekundären Teilchenstrahlung einen Wert zwischen 1 eV und 1 keV, vorzugsweise zwischen 1eV und 800 eV, bevorzugt zwischen 20 eV und 500 eV, noch bevorzugter zwischen 20 eV und 300 eV , am bevorzugten zwischen 50 eV und 200 eV annimmt.
- 15 10. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Schichtdickenreduktion (200) zwischen 1 s und 1500 s, vorzugsweise zwischen 20 s und 1200 s, bevorzugter zwischen 30 s und 1200 s, dauert.
- 20 11. Verfahren zum Verbinden eines Substrats (B), das mit dem Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche vorbehandelt wurde, mit einem weiteren Substrat, das insbesondere mit dem Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche vorbehandelt wurde, wobei das Substrat (B) und das weitere Substrat in einem Bondprozess miteinander verbunden werden.
- 25 12. Verfahren gemäß Anspruch 11, wobei die zweite Dicke (D2) des Substrats (B) und/oder die zweite Dicke (D2) des weiteren Substrats beim Verbinden im Bondprozess auf eine dritte Dicke reduziert wird.
- 30 13. Verfahren gemäß Anspruch 11 oder 12, wobei die zweite Dicke (D2) derart eingestellt wird, dass die beim Bonden vorliegende amorphe Schicht (C) in eine kristalline Phase im Gesamtsubstrat, in dem das Substrat (B) und das weitere Substrat miteinander verbunden sind, überführt wird.
- 35 14. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 11 bis 13, wobei eine Summe aus der zweiten Dicke (D2) des Substrats (B) und der zweiten Dicke (D2) des weiteren Substrats vor dem Bonden kleiner als 30 nm, bevorzugt kleiner als 15 nm, bevorzugter kleiner als 5 nm und besonders bevorzugt kleiner als 2 nm ist.

15. Vorrichtung zum Durchführen eines Verfahrens gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend:
 - Teilchenquelle, mit der Teilchen beschleunigbar sind, und
 - Substratträger zum Halten des Substrats (B).