

VERFAHREN ZUM ABTRENNEN EINER VIELZAHL VON SCHEIBEN VON WERKSTÜCKEN WÄHREND EINER ANZAHL
VON ABTRENNVORGÄNGEN MITTELS EINER DRAHTSÄGE UND HALBLEITERSCHEIBE AUS EINKRISTALLINEM
SILIZIUM

5

Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zum Abtrennen einer Vielzahl von Scheiben von Werkstücken während einer Anzahl von Abtrennvorgängen mittels einer Drahtsäge, die ein Drahtgatter aus sich bewegenden Drahtabschnitten eines Sägedrahts umfasst, das zwischen zwei Drahtführungsrollen gespannt ist, wobei jede

10 der Drahtführungsrollen zwischen einem Festlager und einem Loslager gelagert ist. Gegenstand der Erfindung ist auch eine Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium, die durch das Verfahren zugänglich wird.

Stand der Technik

15

Für viele Anwendungen werden dünne, gleichförmige Scheiben eines Materials benötigt. Ein Beispiel für Scheiben, an die besonders hohe Anforderungen bezüglich Gleichförmigkeit und Planparallelität ihrer jeweiligen Vorder- und Rückseiten gestellt werden, sind Scheiben (wafers) aus Halbleitermaterial, die als Substrate zur Fertigung

20 mikroelektronischer Bauelemente verwendet werden. Besondere Bedeutung zur Herstellung derartiger Scheiben besitzt das Drahtsägen, bei dem gleichzeitig eine Vielzahl von Scheiben von einem Werkstück abgetrennt werden, da es besonders wirtschaftlich ist.

25

Beim Drahtsägen wird Sägedraht spiralförmig so um mindestens zwei Drahtführungsrollen herumgeführt, dass auf der dem zu zertrennenden und mit einer Halteleiste verklebten Werkstück zugewandten Seite zweier benachbarter Drahtführungsrollen ein Drahtgatter aus parallel zueinander verlaufenden Abschnitten des Sägedrahts aufgespannt wird. Die Drahtführungsrollen weisen die Form von

30 Kreiszylindern auf, die Achsen dieser Kreiszylinder sind parallel zueinander angeordnet, und die Mantelflächen der Drahtführungsrollen besitzen einen Belag aus einem verschleißresistenten Material, der mit ringförmig geschlossenen und in Ebenen senkrecht zur Drahtführungsrollenachse verlaufenden Rillen versehen ist, die den Sägedraht führen. Gleichsinniges Drehen der Drahtführungsrollen um ihre

Zylinderachsen bewirkt eine Bewegung der Drahtabschnitte des Drahtgatters relativ zum Werkstück, und mittels In-Kontakt-Bringen von Werkstück und Drahtgatter unter Anwesenheit eines Abrasivs bewirken die Drahtabschnitte so einen Materialabtrag. Durch fortgesetztes Zustellen des Werkstücks bilden die Drahtabschnitte Trennspalte
5 im Werkstück aus und arbeiten sich durch das Werkstück hindurch, bis sie alle in der Halteleiste zu liegen kommen. Das Werkstück ist dann in eine Vielzahl gleichförmiger Scheiben zertrennt, die wie Zinken eines Kamms mittels der Klebefuge an der Halteleiste hängen. Drahtsägen und Verfahren zum Drahtsägen sind beispielsweise aus der DE 10 2016 211 883 A1 oder der DE 10 2013 219 468 A1 bekannt.

10

Drahtsägen kann mittels Trennlappen oder Trennschleifen erfolgen. Beim Trennlappen wird dem Zwischenraum zwischen Drahtoberfläche und Werkstück Arbeitsflüssigkeit in Form einer Aufschlämmung aus Hartstoffen (Slurry) zugeführt. Der Materialabtrag erfolgt beim Trennlappen mittels einer Dreikörper-Wechselwirkung
15 aus Sägedraht, Hartstoffen und Werkstück. Beim Trennschleifen wird Sägedraht verwendet, in dessen Oberfläche Hartstoffe fest eingebunden sind, und es wird eine Arbeitsflüssigkeit zugeführt, die selbst keine abrasiv wirkenden Stoffe enthält und die als Kühlschmiermittel wirkt. Der Materialabtrag erfolgt beim Trennschleifen dann mittels einer Zweikörper-Wechselwirkung aus Sägedraht mit gebundenen Hartstoffen
20 und Werkstück.

Der Sägedraht ist meistens Pianodraht aus beispielsweise übereutektoidem perlitischem Stahl. Die Hartstoffe der Aufschlämmung bestehen beispielsweise aus Siliciumcarbid (SiC) in einer viskosen Trägerflüssigkeit, beispielsweise Glycol oder Öl.
25 Der gebundene Hartstoff besteht beispielsweise aus Diamant, der durch galvanische Nickel- oder Kunstharzbindung oder durch Einrollen form- und kraftschlüssig mit der Drahtoberfläche verbunden ist.

Beim Trennlappen wird glatter oder strukturierter Sägedraht verwendet, beim
30 Trennschleifen nur glatter Sägedraht. Ein glatter Sägedraht besitzt die Form eines Kreiszylinders von sehr großer Höhe (nämlich der Drahtlänge). Ein strukturierter Sägedraht ist ein glatter Draht, der auf seiner gesamten Länge mit einer Vielzahl von Ausbuchtungen und Einstülpungen in Richtungen senkrecht zur Drahtlängsrichtung versehen wurde. Ein Beispiel für glatten Sägedraht zum Trennlappen beschreibt die
35 WO13053622 A1, ein Beispiel für strukturierten Sägedraht zum Trennlappen die

US9610641 BB und ein Beispiel für glatten Sägedraht mit Diamantbelag zum Trennschleifen die US 7 926 478 B2.

Bei üblichen Drahtsägen ist jede der Drahtführungsrollen jeweils in der Nähe einer
5 ihrer Stirnflächen mit einem Lager, das fest mit dem Maschinenrahmen verbunden ist
und als Festlager bezeichnet wird, und in der Nähe der gegenüberliegenden
Stirnfläche mit einem Lager, das in Achsrichtung der Drahtführungsrolle beweglich ist
und als Loslager bezeichnet wird, gelagert. Das ist erforderlich, um eine mechanische
Überbestimmung des Aufbaus zu vermeiden, die zu unvorhersehbaren Verformungen
10 führt.

Insbesondere im Moment des ersten Kontakts des Drahtgatters mit dem Werkstück,
also beim Einsägen, kommt es zu einem abrupten mechanischen und thermischen
Lastwechsel. Die Anordnung von Drahtgatter und Werkstück zueinander verändert
15 sich, und die Komponente dieser Veränderung in Richtung der
Drahtführungsrollenachsen führt dazu, dass die Trennspalte, deren Seiten Vorder-
und Rückseite benachbarter Scheiben bilden, aus ihren Ebenen senkrecht zu den
Drahtführungsrollenachsen abweichen, die Scheiben also wellig werden. Wellige
Scheiben sind für anspruchsvolle Anwendungen ungeeignet.

20 Es sind Verfahren bekannt, die darauf abzielen, die Planparallelität der Hauptflächen
der durch Drahtsägen erhaltenen Scheiben zu verbessern.

Aus US 5 377 568 ist ein Verfahren bekannt, bei dem die Position einer außen an der
25 Drahtführungsrolle befindlichen Bezugsfläche parallel zu und in der Nähe von der
Loslager-Stirnfläche relativ zum Maschinenrahmen gemessen wird und mittels
Temperierung des Drahtführungsrollen-Innenraums eine thermische Längenzunahme
oder Längenabnahme der Drahtführungsrolle bewirkt wird, bis die gemessene
Positionsänderung der Bezugsfläche wieder ausgeglichen ist. Die Positionen der
30 Drahtabschnitte des Drahtgatters verschieben sich bei Ausdehnung der
Drahtführungsrolle in Achsrichtung günstigstenfalls proportional zu ihrem Abstand
vom Festlager. Tatsächlich erwärmt sich die Drahtführungsrolle jedoch
ungleichmäßig, da sie von außen (ungleichmäßig) erwärmt (thermische Lastwechsel)
und von innen gekühlt wird, aber die radiale Wärmeleitung in der Drahtführungsrolle
35 aufgrund ihrer Konstruktion - nicht zuletzt durch das Kühllabyrinth selbst – nicht für

jede Achsposition identisch ist, so dass die Ausdehnung der Drahtführungsrolle entlang ihrer Achse ungleichmäßig erfolgt.

5 Aus JP 2003 145 406 A2 ist ein Verfahren bekannt, bei dem ein Wirbelstromsensor die Position einer Stelle außen an einer Drahtführungsrolle misst und nach Maßgabe dieser Positionsmessung die Temperatur des Kühlwassers, das das Innere der Drahtführungsrolle temperiert, geändert wird. Das Verfahren erfasst die Änderung der Anordnung von Werkstück zu Drahtgatter in Folge thermischen oder mechanischen Lastwechsels nur unzureichend.

10

Aus KR 101 340 199 B1 ist ein Verfahren zum Drahtsägen bekannt, bei dem Drahtführungsrollen verwendet werden, die jeweils auf einer Hohlwelle drehbar gelagert sind, wobei die Hohlwelle in mehreren Abschnitten mit unterschiedlicher Temperatur erwärmt oder gekühlt und somit abschnittsweise in Achsrichtung
15 ausgedehnt oder zusammengezogen werden kann. Dadurch wird, zumindest für wenige Sektoren, die Länge der Drahtführungsrolle in Achsrichtung nichtlinear (ungleichförmig) geändert. Das Verfahren berücksichtigt jedoch nur unzureichend die Anordnungsänderung von Werkstück und Drahtgatter in Folge thermischen oder mechanischen Lastwechsels.

20

Aus US 2012/0240915 A1 ist ein Verfahren zum Drahtsägen bekannt, bei dem Drahtführungsrollen verwendet werden, deren Innenraum und eines deren Lager, die die Drahtführungsrollen drehend lagern, unabhängig voneinander mittels einer Kühlflüssigkeit temperiert werden. Das Verfahren lässt jedoch unberücksichtigt, dass
25 thermische und mechanische Verformung der konstruktiven Elemente der Drahtsäge nicht konstant und reproduzierbar sind und zeitabhängige unberücksichtigte Störgrößen zusätzlich einwirken.

Aus WO 2013/079683 A1 ist schließlich ein Verfahren zum Drahtsägen bekannt, bei dem zunächst die sich für verschiedene Temperaturen der Drahtführungsrollenlager ergebenden Formen von Scheiben gemessen und jede dieser Formen mit der jeweils zugehörigen Lagertemperatur gespeichert wird und dann im Folgeschnitt die Lagertemperatur so ausgewählt wird, wie es der am besten mit der gewünschten Zielform übereinstimmenden Auswahl gespeicherter Formen entspricht. Dieses
30 Verfahren berücksichtigt nicht, dass sich Maß und Verhalten der thermischen Antwort

der Drahtsäge von Schnitt zu Schnitt entsprechend einer Drift ändern und zeitveränderliche Störgrößen entsprechend einem Rauschen einwirken. Ebenso bleibt der beim Drahtsägen auftretende mechanische Lastwechsel unberücksichtigt.

5 Insbesondere Scheiben aus Halbleitermaterial werden nach dem Drahtsägen häufig weiteren Bearbeitungsschritten unterzogen. Solche Bearbeitungsschritte können das Schleifen von Vorder- und Rückseite (sequentiell oder simultan beidseitig), das Lappen von Vorder- und Rückseite (simultan beidseitig), das Ätzen der Halbleiterscheibe und das Polieren von Vorder- und Rückseite (meist durchgeführt als
10 sequentielle oder simultan beidseitige Grobpolitur und als einseitige Feinpolitur) umfassen. Den einseitigen oder sequentiell beidseitigen Bearbeitungsverfahren ist dabei gemein, dass eine Seite der Halbleiterscheiben in einer Aufspannvorrichtung gehalten wird, beispielsweise mittels eines Vakuumschucks (vacuum chuck), während die gegenüberliegende Seite bearbeitet wird.

15 Die Dicke einer Halbleiterscheibe ist üblicherweise klein im Vergleich zu ihrem Durchmesser. Beim Aufspannen wird eine Halbleiterscheibe deshalb elastisch so verformt, dass die Scheibe verformende Kräfte (Auflast des Bearbeitungswerkzeugs und Spannkraften, beispielsweise in Folge des angelegten Vakuums) und
20 rückstellende Verformungskraften (Verspannung der Scheibe) sich die Waage halten: Die gehaltene Seite der Halbleiterscheibe schmiegt sich an die Aufspannvorrichtung an. Nach Materialabtrag von der bearbeiteten Seite und Lösen der Halbleiterscheibe von der Aufspannvorrichtung entspannt sich die aufgrund der Bearbeitung dünner gewordene Halbleiterscheibe in ihre ursprüngliche Form. Mit anderen Worten,
25 nachfolgende Bearbeitungsschritte verbessern das Maß an Planparallelität von Vorder- und Rückseite in der Regel nicht.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Überwindung der geschilderten Probleme durch die Bereitstellung eines Verfahrens, welches die
30 Änderung der Anordnung von Werkstück zu Drahtgatter in Folge thermischer oder mechanischer Lastwechsel besser berücksichtigt und Scheiben mit geringer Welligkeit liefert.

Ausführliche Erfindungsbeschreibung

- Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zum Abtrennen einer Vielzahl von Scheiben von Werkstücken während einer Anzahl von Abtrennvorgängen mittels einer Drahtsäge, die ein Drahtgatter aus sich bewegenden Drahtabschnitten eines Sägedrahts umfasst, das zwischen zwei Drahtführungsrollen gespannt ist, wobei jede
- 5 der Drahtführungsrollen zwischen einem Festlager und einem Loslager gelagert ist, das Verfahren umfassend
- das Zustellen eines der Werkstücke in Gegenwart eines Kühlschmiermittels während eines jeden der Abtrennvorgänge entlang einer Zustellrichtung gegen das Drahtgatter in Anwesenheit von Hartstoffen, die abrasiv auf das Werkstück einwirken;
- 10 das Temperieren des Festlagers der jeweiligen Drahtführungsrolle während der Abtrennvorgänge gemäß einem Temperaturprofil, das eine Temperatur in Abhängigkeit einer Schnitttiefe vorgibt;
- einen ersten Wechsel des Temperaturprofils im Verlauf der Abtrennvorgänge von einem ersten Temperaturprofil mit konstantem Temperaturverlauf zu einem zweiten
- 15 Temperaturprofil, das proportional zur Differenz eines ersten Durchschnittsformprofils und eines Formprofils einer Referenzscheibe ist, wobei das erste Durchschnittsformprofil von Scheiben bestimmt wird, die nach Maßgabe des ersten Temperaturprofils abgetrennt wurden.
- 20 Scheiben, die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren von einem Werkstück abgetrennt werden, sind nahezu unbeeinflusst durch axiale Bewegungen der Drahtführungsrollen in Folge thermischer Ausdehnung der Festlager. Infolgedessen ist die Formabweichung solcher Scheiben von einer Referenzscheibe minimiert.
- 25 Das Festlager kann beispielsweise mittels einer Widerstandsheizung oder mittels eines oder mehrerer Peltier-Kühlelemente temperiert werden. Besonders bevorzugt ist jedoch das Temperieren des Festlagers durch Leiten einer Flüssigkeit durch das Festlager der jeweiligen Drahtführungsrolle während der Abtrennvorgänge, wobei die Temperatur der Flüssigkeit für jeden der Abtrennvorgänge einem Temperaturprofil
- 30 folgt, das die Temperatur der Flüssigkeit in Abhängigkeit der Schnitttiefe vorgibt. Stellvertretend für die anderen Ausgestaltungen ist die weitere Beschreibung des Verfahrens auf diese bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung gerichtet.
- Vorzugsweise ist ein weiterer Wechsel des Temperaturprofils zu einem weiteren
- 35 Temperaturprofil vorgesehen. Das weitere Temperaturprofil ist proportional zur

Differenz eines weiteren Durchschnittsformprofils zuvor abgetrennter Scheiben und des Formprofils der Referenzscheibe, wobei die zuvor abgetrennten Scheiben von mindestens 1 bis 5 Abtrennvorgängen stammen, die einem aktuellen Abtrennvorgang unmittelbar vorausgegangen sind.

5

Das Bestimmen des ersten Durchschnittsformprofils und des weiteren Durchschnittsformprofils kann auf einer scheibenbezogenen Auswahl von Scheiben basierend durchgeführt werden. Bei einer scheibenbezogenen Auswahl werden bestimmte Scheiben eines Abtrennvorgangs zur Bestimmung des jeweiligen Durchschnittsformprofils durch Mittelwertbildung herangezogen und andere ausgeschlossen. Beispielsweise werden nur solche Scheiben bei der Mittelwertbildung berücksichtigt, die eine bestimmte Lage im Werkstück haben, etwa nur jede 15te bis 25te Scheibe entlang der Länge des Werkstücks. Eine weitere Möglichkeit der scheibenbezogenen Auswahl ist der Ausschluss von Scheiben mit der größten und der geringsten Abweichung des Formprofils vom Durchschnittsformprofil aller Scheiben des Abtrennvorgangs. Alternativ können auch Scheiben von der Mittelwertbildung ausgeschlossen werden, deren Formprofil vom Durchschnittsformprofil aller Scheiben des Abtrennvorgangs um mehr als 1 bis 2 Sigma abweicht.

20

Das Bestimmen des weiteren Durchschnittsformprofils kann stattdessen auch basierend auf einer schnittbezogenen Auswahl von Scheiben erfolgen. Bei einer schnittbezogenen Auswahl werden sämtliche Scheiben von mindestens einem Abtrennvorgang zur Bestimmung eines weiteren Durchschnittsformprofils durch Mittelwertbildung herangezogen und sämtliche Scheiben von mindestens einem anderen Abtrennvorgang davon ausgeschlossen.

25

Darüber hinaus kann das Bestimmen des weiteren Durchschnittsformprofils basierend auf einer scheibenbezogenen und einer schnittbezogenen Auswahl durchgeführt werden. In diesem Fall wird mindestens einer der vorangegangenen Abtrennvorgänge ausgewählt und mindestens einer der vorangegangenen Abtrennvorgänge ausgeschlossen, und gleichzeitig werden von den ausgewählten Abtrennvorgängen jeweils bestimmte Scheiben ausgewählt und jeweils andere ausgeschlossen und die so insgesamt ausgewählten Scheiben zur Mittelwertbildung herangezogen.

35

Definitionen, die für das Verständnis der vorliegenden Erfindung hilfreich sind, sowie Überlegungen und Beobachtungen, die zur Erfindung geführt haben, behandeln die nachfolgenden Abschnitte dieser Beschreibung.

- 5 Die Oberfläche einer Scheibe setzt sich zusammen aus Vorderseite, Rückseite und Randfläche. Das Zentrum der Scheibe ist deren Massenschwerpunkt.
- „Ausgleichsebene“ (regression plane) einer Scheibe ist die Ebene, zu der die Summe der Abstände aller Punkte der Vorderseite und der Rückseite minimal ist.
- „Mittelfläche“ (median area) einer Scheibe ist die Menge der Mittelpunkte aller
- 10 Strecken, die Paare aus spiegelsymmetrisch zur Ausgleichsebene liegender Punkte verbinden, von denen sich jeweils einer auf der Vorderseite und einer auf der Rückseite befindet.
- Ein „flächenbezogener Dickenfehler“ einer Scheibe liegt vor, wenn sich die Längen dieser Strecken mit dem Ort auf der Vorderseite und der Rückseite ändern.
- 15 Ein „flächenbezogener Formfehler“ einer Scheibe liegt vor, wenn die Mittelfläche von der Ausgleichsebene abweicht.
- „Referenzscheibe“ ist eine Scheibe ohne flächenbezogenen Dickenfehler und ohne flächenbezogenen Formfehler. Als Referenzscheibe kann auch eine Scheibe mit einem bestimmten Dickenverlauf oder einem bestimmten Formverlauf über den Ort
- 20 auf Vorder- und Rückseite gewählt werden, wenn entsprechend eine beispielsweise keilförmige oder ballige Scheibe als Ziel des Stabaufftrennens durch Drahtsägen gewünscht wird. Eine ballige Scheibe ist beispielsweise vorteilhaft, wenn die Balligkeit einer Formveränderung durch nachfolgendes Aufbringen einer verspannten Schicht auf Vorder- (bspw. Epitaxieschicht) oder Rückseite (bspw. Schutzoxid) entgegenwirkt.
- 25 „Zustellrichtung“ ist die Richtung der Zustellung des Werkstücks auf das Drahtgatter. Das „flächenbezogene Dickenprofil“ einer Scheibe bezeichnet die Dicke einer Scheibe als Funktion des Ortes auf der Ausgleichsebene.
- „Mittellinie“ einer Scheibe ist die Linie in der Mittelfläche, die sich in Zustellrichtung durch das Zentrum der Scheibe erstreckt.
- 30 „Dickenprofil“ einer Scheibe ist die Dicke der Scheibe als Funktion des Orts auf der Mittellinie.
- „Schnitttiefe“ ist ein Ort auf der Mittellinie und bezeichnet die Ausdehnung des Trennspalts in Zustellrichtung während des Abtrennvorgangs.

„Formprofil“ einer Scheibe ist der Verlauf der Mittellinie relativ zum Verlauf der Mittellinie einer Referenzscheibe. Der Verlauf der Mittellinie wird an Messpunkten entlang der Schnitttiefe bestimmt.

- 5 „Durchschnittsformprofil“ ist ein durch Mittelwertbildung der Formprofile mehrerer Scheiben erhaltenes Formprofil, wobei zur Mittelwertbildung jedes Formprofil gleich gewichtet (arithmetische Mittelwertbildung) oder das Formprofil bestimmter Scheiben wegen deren Lage im Werkstück besonders gewichtet (gewichtete Mittelwertbildung) wird.

- 10 „Formabweichung“ bezeichnet die Abweichung eines Formprofils von einem Zielformprofil, beispielsweise vom Formprofil einer Referenzscheibe.

- 15 „Temperaturprofil“ ist der Verlauf der Temperatur einer Flüssigkeit in Abhängigkeit der Schnitttiefe, wobei die Flüssigkeit während des Abtrennvorgangs zum Temperieren des Festlagers durch das Festlager der jeweiligen Drahtführungsrolle des Drahtgatters geleitet wird. Das Temperieren des Festlagers bewirkt bei Bedarf eine Ausdehnung oder Kontraktion des Festlagers, deren Axialkomponente das Loslager so die Axialposition der zugehörigen Drahtführungsrolle entlang der Drehachse der Drahtführungsrolle verschiebt. Diese Bewegung der Drahtführungsrolle wirkt dann dem Entstehen einer Formabweichung entgegen.

- 20 Die Gestalt einer beliebigen Scheibe kann stets durch eine Kombination aus Dickenprofil und Formprofil beschrieben werden. TTV (total thickness variation, GBIR) ist eine Kennzahl, die die Differenz des größten und des kleinsten Werts des flächenbezogenen Dickenprofils bezeichnet. Warp ist eine die Formabweichung beschreibende Kennzahl, die die Summe der jeweils größten Abstände bezeichnet, die die Ausgleichsfläche zur Mittelfläche in Richtung zur Vorderseite der Scheibe und in Richtung zur Rückseite der Scheibe hat. Bow ist eine weitere derartige Kennzahl und bezeichnet den Abstand der Ausgleichsebene zur Mittelfläche im Zentrum der Scheibe. Eine weitere Größe, die die Formabweichung beschreibt, ist die Welligkeit (waviness). Sie lässt sich als Welligkeitszahl Wav_{red} quantifizieren und wird auf der Grundlage eines Welligkeitsprofils bestimmt, welches vom Formprofil abgeleitet ist. Innerhalb eines Messfensters einer vorbestimmten Länge, der charakteristischen Wellenlänge, wird das Maximum des Abstands bestimmt, den die Messpunkte des Formprofils zur Ausgleichsebene haben. Der Anfang des Messfensters wird entlang der Schnitttiefe von Messpunkt zu Messpunkt des Formprofils bewegt und die Bestimmung des Maximums des Abstands für jede Position des Messfensters
- 35

wiederholt. Die Menge der so ermittelten Maxima, aufgetragen gegen die Positionen des jeweils zugehörigen Messfensters, ergibt ein Profil der Welligkeit in Abhängigkeit von der Schnitttiefe bezüglich der charakteristischen Wellenlänge, das Welligkeitsprofil. Die Welligkeitszahl $W_{av,red}$ ist ein Maß für die reduzierte lineare Welligkeit und bezeichnet den maximalen Wert des Welligkeitsprofils, wobei Werte von Bereichen vorgegebener Länge am Schnittanfang und am Schnittende unbeachtet bleiben. Grundsätzlich können die charakteristische Wellenlänge und die Längen der unbeachtet bleibenden Bereiche frei gewählt werden. Die charakteristische Wellenlänge beträgt vorzugsweise 2 mm bis 50 mm und die vorgegebenen Längen der unbeachtet bleibenden Bereiche sind vorzugsweise jeweils 5 mm bis 25 mm. Im Zusammenhang mit der noch zu beschreibenden erfindungsgemäßen Halbleiterscheibe werden eine charakteristische Wellenlänge von 10 mm und Längen der unbeachtet bleibenden Bereiche von jeweils 20 mm zugrunde gelegt.

Die erwähnten Beobachtungen beziehen sich auf das Trennlappen eines gerade kreiszylindrischen Stabs aus Silizium in Scheiben (wafer) mit 300 mm Durchmesser. Sie gelten jedoch gleichermaßen für Werkstücke mit anderer Form und für das Trennschleifen. Die Oberfläche eines geraden Kreiszylinders umfasst dessen kreisförmige Grundfläche (erste Stirnfläche), dessen zur Grundfläche kongruente Deckfläche (zweite Stirnfläche, die der ersten gegenüberliegt) und dessen Mantelfläche (Menge der Punkte des Stabs mit maximalem Abstand zur Stabachse). Ein gerader Kreiszylinder besitzt eine Stabachse, die senkrecht auf Grund- und Deckfläche steht und durch die Mittelpunkte derselben verläuft. Der Abstand von Grund- und Deckfläche entlang dieser Stabachse wird als Höhe des Zylinders bezeichnet.

Erstens wurde beobachtet, dass Dickenprofile und Formprofile von Scheiben mit Positionen auf der Stabachse, die nahe beieinanderliegen, sich nur geringfügig voneinander unterscheiden. Die Dickenprofile von Scheiben mit Positionen auf der Stabachse, die weiter voneinander entfernt sind, sind zwar ähnlich, aber die Formprofile solcher Scheiben unterscheiden sich stark voneinander. Folglich kann kein Temperaturprofil existieren, durch dessen Anwendung die Form aller Scheiben eines Werkstücks gleichzeitig eben gemacht werden kann. Durch eine, von der Schnitttiefe abhängige Verschiebung des Werkstücks relativ zum Drahtgatter während

des Abtrennvorgangs werden also nur Scheiben mit näherungsweise ebener Form erhalten werden können.

5 Zweitens wurde beobachtet, dass die Formprofile von Scheiben mit gleichen
Positionen auf der Stabachse und erhalten durch unmittelbar aufeinander folgende
Abtrennvorgänge sich meist nur geringfügig voneinander unterscheiden, während
diejenigen solcher Scheiben mit gleichen Positionen, aber erhalten durch
Abtrennvorgänge, zwischen denen mehrere dazwischenliegende Abtrennvorgänge
10 durchgeführt werden, erheblich voneinander abweichen. Folglich kann es kein
Temperaturprofil geben, durch dessen Anwendung und Beibehaltung die Form von
Scheiben mit derselben Stabposition und hervorgehend aus aufeinander folgenden
Abtrennvorgängen über viele Abtrennvorgänge hinweg unverändert bleibt.
Stattdessen muss das Temperaturprofil gegebenenfalls von Abtrennvorgang zu
Abtrennvorgang zumindest geringfügig geändert werden, um Scheiben mit
15 näherungsweise ebener Form über eine Vielzahl von Abtrennvorgängen hinweg
erhalten zu können.

Drittens wurde beobachtet, dass die Veränderung der Formprofile gleich positionierter
Scheiben, erhalten durch aufeinanderfolgende Abtrennvorgänge, in einen stetigen,
20 vorhersagbaren Anteil und einen unstetigen spontanen Anteil aufgeteilt werden kann.
Ein vorausberechnetes Temperaturprofil wird folglich nur den stetigen vorhersagbaren
Anteil der Veränderung berücksichtigen können, und es wird trotz Anwendung des
Temperaturprofils eine Formveränderung festgestellt werden, die von Abtrennvorgang
zu Abtrennvorgang nach Art und Ausmaß schwankt und nicht vorhersagbar ist.

25 Viertens wurde beobachtet, dass die relative Anordnung von Werkstück und
Drahtgatter insbesondere im Moment des Einschnitts, also im Moment des ersten
Kontakts des Werkstücks mit dem Drahtgatter, aber auch über den gesamten
Abtrennvorgang hinweg, einem starken thermischen und mechanischen Lastwechsel
30 unterliegt. Es wurde insbesondere festgestellt, dass beim Einschnitt des Sägedrahts
in das Werkstück eine Wärmeleistung von einigen kW auf das Werkstück, die
Drahtführungsrollen und deren Lager übertragen wird und die Drahtführungsrollen
während eines Abtrennvorgangs einem mechanischen Lastwechsel mit einer Kraft im
Bereich von 10 kN in Achsquerrichtung ausgesetzt werden.

35

Fünftens wurde beobachtet, dass der mechanische Lastwechsel zu einer Erhöhung der Reibung in den Lagern führt, über die die Drahtführungsrollen mit dem Maschinenrahmen verbunden sind. Zum einen erhöht sich die Rollreibung der Wälzkörper infolge der erhöhten axialen Auflast, zum anderen erhöht sich die Reibung in Folge einer Verkipfung der Achse der Lagerbuchsen gegenüber der Achse, den die Drahtführungsrolle in unbelastetem Zustand hat. Diese Verkipfung führt zu einem Walken (flexing) der Lagerbuchse in der mit dem Maschinenrahmen verbundenen Hülse, in die die Lagerbuchse eingepasst ist. Diese Walkarbeit führt am Übergang Lagerbuchse/Hülse zu einer Erwärmung.

10 Folglich sollte die Änderung der Lagertemperatur und die damit verbundene Ausdehnung des Lagers insbesondere in Achsrichtung zu einer Verstellung der Axialposition der Drahtführungsrollen dahingehend genutzt werden, mittels einer in der Nähe des Außenumfangs der Lagerhülse wirkenden Kühlung die Erwärmung und die damit verbundene axiale Positionsänderung auf ein gewünschtes Maß zu reduzieren.

Sechstens wurde beobachtet, dass die Erwärmung des Festlagers der Drahtführungsrolle einer Drahtsäge infolge erhöhter Lagerreibung oder Verformung (Erwärmung durch Walkarbeit) zu einer Verschiebung der Lage der Drahtführungsrolle in deren Achsposition gegenüber dem Maschinenrahmen führt.

Siebtens wurde beobachtet, dass das Drahtsägen Scheiben mit Welligkeiten erzeugt, die insbesondere in Zustellrichtung ausgeprägt sind und dass solche Welligkeiten mit lateralen Wellenlängen im Bereich um etwa 10 mm durch dem Drahtsägen nachfolgende Bearbeitungsschritte praktisch nicht reduziert werden können. Die Welligkeit einer vollständig bearbeiteten Scheibe wird daher in dieser Hinsicht bereits maßgeblich durch das Drahtsägen bestimmt.

30 Vor dem Hintergrund dieser Beobachtungen wird vorgeschlagen, im Verlauf einer Anzahl von Abtrennvorgängen mittels der Drahtsäge eine Sequenz von Abtrennvorgängen vorzusehen, die sich darin unterscheiden, dass das Temperaturprofil, welches die Temperatur der Flüssigkeit vorgibt, die durch das Festlager der jeweiligen Drahtführungsrolle des Drahtgatters geleitet wird, unterschiedlich ist. Die Sequenz von Abtrennvorgängen beginnt zweckmäßigerweise

nach einer Änderung des Sägesystems, also nach einer Änderung von mindestens einem Merkmal der Drahtsäge, des Sägedrahts oder des Kühlschmiermittels. Eine Änderung des Sägesystems liegt beispielsweise vor, wenn ein Wechsel von Drahtführungsrollen erfolgte oder mechanische Justierungen an der Drahtsäge vorgenommen wurden. Die ersten Abtrennvorgänge der Sequenz, die sogenannten Initialschnitte, bestehen vorzugsweise aus 1 bis 5 Abtrennvorgängen. Diese Abtrennvorgänge werden nach Maßgabe eines ersten Temperaturprofils durchgeführt, das einen konstanten Temperaturverlauf während des Eingriffs der Drahtabschnitte in das Werkstück vorgibt.

10 Von allen Scheiben der Initialschnitte oder von Scheiben einer scheibenbezogenen Auswahl der Scheiben der Initialschnitte werden Formprofile ermittelt. Aus den Formprofilen wird durch Mittelwertbildung, die gegebenenfalls gewichtet sein kann, ein erstes Durchschnittsformprofil bestimmt. Das erste Durchschnittsformprofil wird anschließend mit dem Formprofil einer Referenzscheibe verglichen, indem das Formprofil der Referenzscheibe vom ersten Durchschnittsformprofil subtrahiert wird. Die so festgestellte Formabweichung entspricht näherungsweise einer erwartbaren Formabweichung, die Scheiben eines nachfolgenden Abtrennvorgangs durchschnittlich aufweisen würden, wenn der nachfolgende Abtrennvorgang nach Maßgabe des ersten Temperaturprofils durchgeführt werden würde.

Die festgestellte Formabweichung dient daher als Richtmaß für eine Korrekturmaßnahme, die der erwartbaren Formabweichung entgegengerichtet ist. Die den Initialschnitten folgenden Abtrennvorgänge werden daher nicht unter Anwendung des ersten Temperaturprofils durchgeführt, sondern unter Anwendung eines zweiten Temperaturprofils, das proportional zur festgestellten Formabweichung ist. Weist die festgestellte Formabweichung beispielsweise daraufhin, dass bei Beibehaltung des ersten Temperaturprofils Scheiben entstehen würden, deren Mittellinie bei einer bestimmten Schnitttiefe durchschnittlich um einen bestimmten Betrag in eine axiale Richtung der Drahtführungsrollen versetzt wäre, sieht das zweite Temperaturprofil bei der entsprechenden Schnitttiefe eine Temperatur der Flüssigkeit vor, die zur Folge hat, dass das Festlager aufgrund von Wärmeausdehnung die ihm zugeordnete Drahtführungsrolle um denselben Betrag in die entgegengesetzte Richtung verschiebt. Durch das Temperieren des jeweiligen Festlagers nach Maßgabe des zweiten Temperaturprofils wird der sonst zu erwartenden Formabweichung

- entgegengewirkt. Die den Initialschnitten folgenden Abtrennvorgänge der Sequenz werden also nach Maßgabe des zweiten Temperaturprofils durchgeführt und damit das Temperaturprofil erstmalig gewechselt. Die Anzahl der zweiten Abtrennvorgänge der Sequenz beträgt, sofern kein weiterer Wechsel des Temperaturprofils vorgesehen ist, vorzugsweise 1 bis 15 Abtrennvorgänge. Grundsätzlich können aber auch alle Abtrennvorgänge, die dem ersten Wechsel des Temperaturprofils folgen, unter Anwendung des zweiten Temperaturprofils durchgeführt werden, zumindest solange, bis eine Änderung des Sägesystems eintritt.
- 5
- 10 Besonders bevorzugt ist jedoch, die Anzahl der Abtrennvorgänge, die den Initialschnitten folgen und die unter Anwendung des zweiten Temperaturprofils durchgeführt werden, auf eine Anzahl von 1 bis 5 Abtrennvorgänge zu begrenzen und alle weiteren Abtrennvorgänge zumindest bis zum Eintritt einer Änderung des Sägesystems unter Anwendung eines weiteren Temperaturprofils durchzuführen. Das
- 15 weitere Temperaturprofil wird vor jedem der weiteren Abtrennvorgänge neu bestimmt.

- Von allen Scheiben der dem jeweiligen aktuellen Abtrennvorgang der weiteren Abtrennvorgänge unmittelbar vorausgegangenen 1 bis 5 Abtrennvorgänge oder von Scheiben einer scheibenbezogenen Auswahl dieser Scheiben oder einer
- 20 schnittbezogenen Auswahl dieser Scheiben oder einer scheibenbezogenen und schnittbezogenen Auswahl dieser Scheiben werden Formprofile ermittelt. Aus den Formprofilen wird durch Mittelwertbildung, die gegebenenfalls gewichtet sein kann, vor dem aktuellen Abtrennvorgang ein weiteres Durchschnittsformprofil bestimmt. Das weitere Durchschnittsformprofil wird anschließend mit dem Formprofil der
- 25 Referenzscheibe verglichen, indem das Formprofil der Referenzscheibe vom weiteren Durchschnittsformprofil subtrahiert wird. Auf der Grundlage der festgestellten Formabweichung wird ein weiteres Temperaturprofil bestimmt, das proportional zur festgestellten Formabweichung ist. Der aktuelle Abtrennvorgang wird unter Anwendung des weiteren Temperaturprofils durchgeführt. Für jeden nachfolgenden
- 30 Abtrennvorgang wird ein weiteres Temperaturprofil in analoger Weise bestimmt. Mit anderen Worten, nach der Anzahl von 1 bis 5 Abtrennvorgängen, die den Initialschnitten folgen, wird mit jedem weiteren Abtrennvorgang das Temperaturprofil gewechselt.

Eine Halbleiterscheibe, die nach einem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellt wird und gegebenenfalls nach nachfolgenden Bearbeitungsschritten eine polierte Vorder- und Rückseite aufweist, zeichnet sich durch eine besonders geringe Welligkeit aus. Gegenstand der Erfindung ist deshalb auch eine Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium, die gekennzeichnet ist durch eine Welligkeitszahl Wav_{red} von nicht mehr als 7 μm , vorzugsweise nicht mehr als 3 μm , sofern der Durchmesser der Halbleiterscheibe 300 mm beträgt, oder gekennzeichnet durch eine Welligkeitszahl Wav_{red} von nicht mehr als 4,5 μm , vorzugsweise nicht mehr als 2 μm , sofern der Durchmesser der Halbleiterscheibe 200 mm beträgt. Die charakteristische Wellenlänge zur Bestimmung von Wav_{red} beträgt 10 mm und die Längen der unberücksichtigt bleibenden Bereiche am Schnittanfang (Einschnitt) und am Schnittende (Ausschnitt) betragen jeweils 20 mm. Eine erfindungsgemäße Halbleiterscheibe weist die Welligkeitszahl Wav_{red} im beanspruchten Bereich bereits im gesägtem Zustand auf, also im unpoliertem Zustand.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist grundsätzlich unabhängig vom Material des Werkstücks. Es eignet sich jedoch besonders zum Abtrennen von Scheiben aus Halbleitermaterial und wird vorzugsweise zum Abtrennen von Scheiben aus einkristallinem Silizium eingesetzt. Dementsprechend hat ein Werkstück vorzugsweise die Form eines geraden Kreiszylinders mit einem Durchmesser von mindestens 200 mm, vorzugsweise mindestens 300 mm. Andere Formen, wie die eines Quaders oder eines geraden Prismas kommen aber auch in Betracht. Das Verfahren ist auch unabhängig von der Anzahl der Drahtführungsrollen der Drahtsäge. Neben den beiden Drahtführungsrollen, zwischen denen das Drahtgatter gespannt ist, können eine oder mehrere weitere Drahtführungsrollen vorgesehen sein.

Das Abtrennen der Scheiben während eines Abtrennvorgangs erfolgt durch Trennschleifen unter Zuführen eines Kühlschmiermittels zu den Drahtabschnitten, das frei von Stoffen ist, die auf das Werkstück abrasiv einwirken, oder durch Trennläppen unter Zuführen eines Kühlschmiermittels zu den Drahtabschnitten, das aus einer Aufschlämmung von Hartstoffen besteht. Im Fall des Trennschleifens bestehen die Hartstoffe vorzugsweise aus Diamant und sind auf der Oberfläche des Sägedrahts durch galvanische Bindung oder durch Bindung mittels Kunstharz oder durch formschlüssige Bindung fixiert. Im Fall des Trennläppens bestehen die Hartstoffe vorzugsweise aus Siliciumcarbid und sind vorzugsweise in Glycol oder Öl

aufgeschlämmt. Der Sägedraht hat vorzugsweise einen Durchmesser von 70 µm bis 175 µm und besteht vorzugsweise aus übereutektoidischem perlitischem Stahl. Des Weiteren kann der Sägedraht entlang seiner Längsachse mit einer Vielzahl an Ausstülpungen und Einbuchtungen in Richtungen senkrecht zur Längsachse
5 versehen sein.

Des Weiteren ist bevorzugt, den Sägedraht während eines Abtrennvorgangs in einer fortwährenden Abfolge von Paaren von Richtungsumkehrungen zu bewegen, wobei ein Paar von Richtungsumkehrungen jeweils ein erstes Bewegen des Sägedrahts in
10 eine erste Drahtlängsrichtung um eine erste Länge und ein zweites nachfolgendes Bewegen des Sägedrahts in eine zweite Drahtlängsrichtung um eine zweite Länge umfasst, die zweite Drahtlängsrichtung der ersten Drahtlängsrichtung entgegengesetzt ist und die erste Länge größer als die zweite Länge ist. Vorzugsweise wird der Sägedraht beim Bewegen um die erste Länge dem
15 Drahtgatter mit einer ersten Zugkraft in Drahtlängsrichtung aus einem ersten Drahtvorrat zugeführt und beim Bewegen um die zweite Länge mit einer zweiten Zugkraft in Drahtlängsrichtung aus einem zweiten Drahtvorrat zugeführt, wobei die zweite Zugkraft geringer als die erste Zugkraft ist. Einzelheiten der Erfindung werden nachfolgend unter Verweis auf Zeichnungen
20 erläutert.

Kurzbeschreibung der Figuren

Fig. 1 zeigt in perspektivischer Darstellung Merkmale, die für eine Drahtsäge typisch
25 sind.

Fig. 2 zeigt eine Schnittdarstellung durch eine Drahtführungsrolle und deren Lagerung.

Fig. 3 zeigen das Formprofil und das Welligkeitsprofil (oberes Diagramm) einer Scheibe, die nicht erfindungsgemäß hergestellt wurde, und das Temperaturprofil
30 (unteres Diagramm), das während des nicht erfindungsgemäßen Abtrennvorgangs zur Anwendung kam.

Fig. 4 zeigen das Formprofil und das Welligkeitsprofil (oberes Diagramm) einer Scheibe, die erfindungsgemäß hergestellt wurde, und das Temperaturprofil (unteres

Diagramm), das während des erfindungsgemäß durchgeführten Abtrennvorgangs zur Anwendung kam.

Liste der verwendeten Bezugszeichen

- 5
- 1 Drahtführungsrolle
- 2 Drahtgatter
- 3 Sägedraht
- 4 Werkstück
- 10 5 Festlager
- 6 Loslager
- 7 Maschinenrahmen
- 8 Belag
- 9 Kanal
- 15 10 Steuerungseinheit
- 11 Richtung der Bewegung des Loslagers
- 12 Formprofil
- 13 Welligkeitsprofil
- 14 Temperaturprofil
- 20 15 Temperaturprofil
- 16 Formprofil
- 17 Welligkeitsprofil
- 18 Temperaturprofil
- 19 Temperaturprofil
- 25 20 Einschnittbereich
- 21 Ausschnittbereich
- 22 Einschnittbereich
- 23 Ausschnittbereich
- 24 Maximum im inneren Teilbereich von 13

30

Detaillierte Beschreibung erfindungsgemäßer Ausführungsbeispiele

Fig.1 zeigt Merkmale, die für eine Drahtsäge typisch sind. Dazu gehören mindestens zwei Drahtführungsrollen 1, die ein Drahtgatter 2 aus Drahtabschnitten eines Sägedrahts 3 aufspannen. Zum Abtrennen von Scheiben wird ein Werkstück 4 gegen das Drahtgatter 2 in der durch einen Pfeil symbolisierten Zustellrichtung zugestellt.

5

Wie in Fig. 2 gezeigt, ist die Drahtführungsrolle 1 zwischen einem Festlager 5 und einem Loslager 6 gelagert. Festlager 5 und Loslager 6 sind auf einem Maschinenrahmen 7 abgestützt. Die Drahtführungsrolle 1 trägt einen Belag 8, der mit Rillen versehen ist, in denen der Sägedraht 3 läuft. Das Festlager 5 umfasst einen Kanal 9, durch den eine Flüssigkeit zum Temperieren des Festlagers 5 geleitet wird. Wird die Temperatur der Flüssigkeit erhöht, bewirkt die Wärmeausdehnung des Festlagers 5 eine axiale Verschiebung der Drahtführungsrolle 1 in Richtung des Loslagers 6, und das Loslager 6 bewegt sich in die mit einem Doppelpfeil 11 gekennzeichnete Richtung der Achse der Drahtführungsrolle gegenüber dem Maschinenrahmen 7. Wird die Temperatur der Flüssigkeit verringert, wird eine Verschiebung der Drahtführungsrolle 1 und des Loslagers 6 in die entgegengesetzte Richtung bewirkt. Erfindungsgemäß wird die Temperatur der Flüssigkeit in Abhängigkeit der Schnitttiefe durch ein Temperaturprofil vorgegeben und das Temperaturprofil im Verlauf einer Anzahl von Abtrennvorgängen mindestens einmal geändert. Eine Steuerungseinheit 10, die in Verbindung mit einem Wärmeaustauscher und einer Pumpe steht, sorgt dafür, dass die durch das Festlager 5 geleitete Flüssigkeit beim Erreichen einer bestimmten Schnitttiefe die vom jeweiligen Temperaturprofil verlangte Temperatur hat.

25 Beispiel und Vergleichsbeispiel

Die Erfindung wird im Folgenden an einem nicht erfindungsgemäßen Vergleichsbeispiel (Fig. 3) und einem erfindungsgemäßen Beispiel (Fig. 4) verdeutlicht.

30

Fig. 3 zeigt in der oberen Hälfte das Formprofil 12 einer mittels Drahttrennläppens abgetrennten Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium mit 300 mm Durchmesser über die Schnitttiefe (D.O.C = Depth Of Cut). Der Trennvorgang erfolgte mittels eines Stahldrahts mit 175 µm Durchmesser innerhalb von etwa 13 Stunden unter Verwendung von Siliciumcarbid (SiC) mit einer mittleren Korngröße von etwa 13 µm

35

(FEPA F-500), aufgeschlämmt in einer Trägerflüssigkeit aus Dipropylenglycol. Während des Trennvorgangs wurden die Temperaturen zur Kühlung der Festlager konstant gehalten bei Werten, die aus vorangegangenen Trennvorgängen als optimal für den Erhalt möglichst ebener Halbleiterscheiben bestimmt worden waren. Das untere Diagramm von Fig. 3 zeigt in Abhängigkeit der Schnitttiefe das Temperaturprofil 14 der Kühlwasser-Temperatur des linken (TL = Temperatur links; durchgezogene Linie) und das entsprechende Temperaturprofil 15 der Kühlwasser-Temperatur des rechten (TR = Temperatur rechts; gestrichelt) Festlagers der beiden Drahtführungsrollen, die das Drahtgatter aufspannen.

Der Abstand zwischen zwei horizontalen Gitter-Linien im unteren Diagramm beträgt 1 °C. Die Temperatur wurde also tatsächlich sehr konstant eingehalten mit Soll-/Ist-Abweichungen von weniger als 0,1 °C. Das in diesem Vergleichsbeispiel erhaltene Formprofil 12 der Halbleiterscheibe (S = Shape, also Form(profil); durchgezogene Linie) ist jedoch sehr uneben. Insbesondere weist die Halbleiterscheibe eine starke Verformung im Einschnittbereich 20 auf, also innerhalb der ersten 10 % der Schnitttiefe, die als Einschnittwelle bezeichnet wird, und eine starke Verformung im Ausschnittbereich 21 auf, also innerhalb der letzten annähernd 10 % der Schnitttiefe, die als Ausschnittwelle bezeichnet wird. Das vom Formprofil 12 abgeleitete Welligkeitsprofil 13 (W = Welligkeit, Waviness; gestrichelte Linie), das den Betrag der Differenz der Verformung der Halbleiterscheibe innerhalb eines entlang der Schnitttiefe gleitenden Messfensters abbildet, weist im Einschnittbereich 20 und im Ausschnittbereich 21 starke Ausschläge auf.

Fig. 4 zeigt im oberen Diagramm das Formprofil 16 und das davon abgeleitete Welligkeitsprofil 17 einer mit einem erfindungsgemäßen Verfahren abgetrennten Halbleiterscheibe und im unteren Diagramm die Temperaturprofile 18 und 19 des linken und des rechten Festlagers der das Drahtgatter aufspannenden Drahtführungsrollen. Zur Herstellung der Halbleiterscheibe mit den Eigenschaften gemäß Fig.4 wurden zunächst fünf Abtrennvorgänge unter Anwendung eines konstanten Temperaturprofils entsprechend der unteren Hälfte von Fig. 3 durchgeführt und die Formprofile der erhaltenen Halbleiterscheibe eines jeden Abtrennvorgangs stichprobenweise (jede 15. Halbleiterscheibe, vom Stabanfang zum Stabende) gemittelt, wobei die Formprofile der jeweils den Stirnflächen des Stabs nächsten Halbleiterscheiben nicht berücksichtigt wurden (scheibenbezogene

Auswahl), und sodann die so erhaltenen scheibenbezogenen Durchschnittsformprofile eines jeden Abtrennvorgangs über die fünf Abtrennvorgänge gemittelt (schnittbezogene Auswahl).

- 5 Durch Multiplikation des so erhaltenen scheiben- und schnittbezogenen Durchschnittsformprofils mit einer zuvor experimentell ermittelten, maschinenspezifischen Konstante (in $^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$), die die Empfindlichkeit der Formprofiländerung (in μm) je Temperaturveränderung des Festlagers (in $^{\circ}\text{C}$) angibt, wurde ein erstes nichtkonstantes Temperaturprofil für die schnitttiefenabhängige
- 10 Festlagertemperierung erhalten und damit ein weiterer Abtrennvorgang durchgeführt. Dieser ergab Halbleiterscheiben mit einem scheibenbezogenen Durchschnittsformprofil, das bereits deutlich ebener war als das scheiben- und schnittbezogene Durchschnittsformprofil der ersten fünf Abtrennvorgänge unter Anwendung des konstanten Temperaturprofils. Da die Stellgröße, nämlich das erste
- 15 nichtkonstante Temperaturprofil, für diesen Abtrennvorgang durch Rückgriff (Regression) auf das konstante Temperaturprofil erhalten wurde, kann die Anwendung dieses Temperaturprofils auch als regressive Regelung bezeichnet werden.
- 20 Der Abtrennvorgang, der die Halbleiterscheibe erzeugte, deren Formprofil das obere Diagramm von Fig. 4 zeigt, wurde schließlich unter Anwendung eines Temperaturprofils durchgeführt, das aus der Abweichung des scheibenbezogenen Durchschnittsformprofils des vorangegangenen Abtrennvorgangs vom Formprofil einer Referenzscheibe errechnet wurde. Dieses weitere Temperaturprofil ist im
- 25 unteren Diagramm von Fig. 4 gezeigt. Das Temperaturprofil weist im Einschnittbereich 22 innerhalb der ersten 10 % der Schnitttiefe deutlich erhöhte und im Ausschnittbereich 23 innerhalb der letzten annähernd 10 % der Schnitttiefe deutlich reduzierte Temperaturen auf, mit der Folge, dass die Einschnittwelle im Einschnittbereich 20 und die Ausschnittwelle im Ausschnittbereich 21 entsprechend
- 30 dem oberen Diagramm von Fig. 3 nicht beobachtet werden.

- Da die Stellgröße, nämlich das weitere Temperaturprofil, sich gegenüber derjenigen des vorangegangenen Abtrennvorgangs nur um die der Differenz (Inkrement) des aus dem scheibenbezogenen Durchschnittsformprofil des vor-vorangegangenen und der
- 35 des vorangegangenen Abtrennvorgangs entsprechenden Änderung unterscheidet,

kann die Anwendung des weiteren Temperaturprofils auch als inkrementelle Regelung bezeichnet werden.

Die zur Berechnung der Temperaturprofile herangezogene maschinenspezifische Konstante gibt an, um wie viele Mikrometer sich das Formprofil bei Erhöhung oder Erniedrigung der Festlagertemperatur um ein Grad Celsius verändert, und ist von der Wirksamkeit der Kühlung, also beispielsweise von der Vorlauftemperatur, von der Kühlleistung des Wärmetauschers, der das Kühlwasser liefert, und vom Durchfluss (Querschnitt) des Kühlwassers bestimmt. Da alle diese Größen Schwankungen unterliegen und zudem drahtsägespezifisch sind, kann die maschinenspezifische Konstante nur sehr ungenau bestimmt werden.

Das Vorzeichen der maschinenspezifischen Konstante ergibt sich daraus, welche der beiden Seiten der Halbleiterscheibe als Vorder- und welche als Rückseite definiert ist. In den vorliegenden Beispielen wurde der Stab aus Halbleitermaterial stets mit dem Impflingsende (diejenige Stirnfläche des Stabs von zwei Stirnflächen, deren Position sich während der Herstellung des Stabs näher zu einem einkristallinen Impfkristalls befand) in Richtung des Drahtführungsrollen-Festlagers und mit der zweiten Stirnfläche in Richtung des Loslagers orientiert, und als Vorderseite der Halbleiterscheibe die zum Impflingsende weisende Fläche und als Rückseite der Halbleiterscheibe die vom Impflingsende weg weisende Fläche der Halbleiterscheibe festgelegt. In Übereinstimmung mit den Darstellungen in Fig. 3 und Fig. 4 weist die Vorderseite der Halbleiterscheibe nach oben und deren Rückseite nach unten. In dieser Anordnung ist das Vorzeichen für die Umrechnung des Durchschnittsformprofils in das Temperaturprofil negativ. Bei einer umgekehrten Orientierung des Stabs in der Drahtsäge wäre die maschinenspezifische Konstante positiv.

Die besondere Wirksamkeit von insbesondere der erfindungsgemäßen inkrementellen Regelung besteht nun darin, dass die maschinenspezifische Konstante nicht genau bekannt sein muss, da eine inkrementelle Regelung die grundsätzliche Eigenschaft aufweist, auf den Zielwert (dem Formprofil der Referenzscheibe) hin zu konvergieren, sofern der Proportionalitätsfaktor, nämlich die maschinenspezifische Konstante, nicht zu hoch gewählt wird. Im letzteren Fall würde die Regelung oszillieren und nicht, wie gewünscht, konvergieren. Es werden also auch mit einem bloßen Schätzwert für die

Konstante stets im Verlauf weniger Abtrennvorgänge Halbleiterscheiben mit sehr ebenen Formprofilen erhalten, sofern dieser Schätzwert eher betragsmäßig zu klein angenommen wird.

- 5 Insbesondere kann daher für unterschiedliche Drahtsägen derselbe geschätzte Wert für die maschinenspezifische Konstante angenommen werden, vorzugsweise eine Konstante mit einem Betrag im Bereich von 0.2 bis 5 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Das Vorzeichen der maschinenspezifischen Konstante ergibt sich, wie beschrieben, aus der Festlegung, in welche Richtungen Vorder- und Rückseite der Halbleiterscheiben in Bezug auf den
- 10 in die Drahtsäge eingebauten Stab weisen. Unterschiede zwischen Drahtsägen mit unterschiedlichen tatsächlichen Konstanten ergeben sich dann nur noch in der Geschwindigkeit der Konvergenz, nicht jedoch im erreichbaren Maß an Planparallelität der Halbleiterscheiben. Deren Restunebenheiten sind nur noch von den von Abtrennvorgang zu Abtrennvorgang auftretenden unvorhersehbaren
- 15 Schwankungen des jeweiligen Abtrennvorgangs (Rauschgrößen) bestimmt.

Die Welligkeitszahl W_{avred} wird ausgehend vom Formprofil einer Scheibe, wie nachfolgend am Beispiel der Formprofile 12 in Fig. 3 und 16 in Fig. 4 erklärt, bestimmt. Aus einem solchen Formprofil wird innerhalb eines Messfensters mit einer

20 charakteristischen Wellenlänge von 10 mm in Richtung der Schnitttiefe (D.O.C.) der Betrag der Differenz zwischen Maximum und Minimum des Formprofils innerhalb des Messfensters bestimmt. Die Position des Anfangs des Messfensters wird entlang der Schnitttiefe nach und nach auf jeden Messpunkt des Formprofils festgelegt und für jede dieser Positionen der Betrag der Differenz bestimmt. Die so erhaltenen Beträge

25 von Differenzen werden in Abhängigkeit der Schnitttiefe aufgetragen, wobei die Position des Anfangs des Messfensters die jeweilige Schnitttiefe angibt. So wird ein Welligkeitsprofil erhalten, das beispielsweise die Kurven 13 in Fig. 3 und 17 in Fig. 4 verkörpern. Die Welligkeitszahl W_{avred} wird aus dem Welligkeitsprofil bestimmt, indem am Schnittanfang und am Schnittende die Werte der Beträge der Differenzen jeweils

30 innerhalb einer Länge von 20 mm unbeachtet bleiben und von den verbleibenden Werten der Beträge der Differenzen das Maximum als Welligkeitszahl W_{avred} bestimmt wird.

Dementsprechend beträgt ausgehend von der Form S des Formprofil 12 in Fig. 3, die

35 Welligkeitszahl W_{avred} der nicht erfindungsgemäß hergestellten Halbleiterscheibe

etwa 12 μm , entsprechend des Maximums 24 der Welligkeit W des Welligkeitsprofils 13 und unter Berücksichtigung eines Gitterabstands der Ordinate von 4 μm .
Ausgehend vom Formprofil 16 in Fig. 4 ist die Welligkeitszahl W_{avred} der erfindungsgemäß hergestellten Halbleiterscheibe etwa 3 μm , entsprechend des
5 Maximums der Welligkeit W des Welligkeitsprofils 17 und unter Berücksichtigung eines Gitterabstands der Ordinate von 4 μm .

Die vorstehende Beschreibung beispielhafter Ausführungsformen ist exemplarisch zu verstehen. Die damit erfolgte Offenbarung ermöglicht es dem Fachmann einerseits,
10 die vorliegende Erfindung und die damit verbundenen Vorteile zu verstehen, und umfasst andererseits im Verständnis des Fachmanns auch offensichtliche Abänderungen und Modifikationen der beschriebenen Strukturen und Verfahren.
Daher sollen alle derartigen Abänderungen und Modifikationen sowie Äquivalente durch den Schutzbereich der Ansprüche abgedeckt sein.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Abtrennen einer Vielzahl von Scheiben von Werkstücken während einer Anzahl von Abtrennvorgängen mittels einer Drahtsäge, die ein
5 Drahtgatter aus sich bewegenden Drahtabschnitten eines Sägedrahts umfasst, das zwischen zwei Drahtführungsrollen gespannt ist, wobei jede der Drahtführungsrollen zwischen einem Festlager und einem Loslager gelagert ist, das Verfahren umfassend das Zustellen eines der Werkstücke in Gegenwart einer Arbeitsflüssigkeit während eines jeden der Abtrennvorgänge entlang einer Zustellrichtung gegen das Drahtgatter
10 in Anwesenheit von Hartstoffen, die abrasiv auf das Werkstück einwirken; das Temperieren des Festlagers der jeweiligen Drahtführungsrolle während der Abtrennvorgänge gemäß einem Temperaturprofil, das eine Temperatur in Abhängigkeit einer Schnitttiefe vorgibt; einen ersten Wechsel des Temperaturprofils im Verlauf der Abtrennvorgänge von
15 einem ersten Temperaturprofil mit konstantem Temperaturverlauf zu einem zweiten Temperaturprofil, das proportional zur Differenz eines ersten Durchschnittsformprofils und eines Formprofils einer Referenzscheibe ist, wobei das erste Durchschnittsformprofil von Scheiben bestimmt wird, die nach Maßgabe des ersten Temperaturprofils abgetrennt wurden.
20
2. Verfahren nach Anspruch 1, umfassend einen weiteren Wechsel des Temperaturprofils zu einem weiteren Temperaturprofil, das proportional zur Differenz eines weiteren Durchschnittsformprofils zuvor abgetrennter Scheiben und des Formprofils der Referenzscheibe ist, wobei die zuvor
25 abgetrennten Scheiben von mindestens 1 bis 5 Abtrennvorgängen stammen, die einem aktuellen Abtrennvorgang unmittelbar vorangegangen sind.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, umfassend das Verwenden des ersten Temperaturprofils während eines ersten der Abtrennvorgänge, der nach einer
30 Änderung von mindestens einem Merkmal der Drahtsäge, des Sägedrahts oder der Arbeitsflüssigkeit stattfindet.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, umfassend das Bestimmen des ersten Durchschnittsformprofils und des weiteren Durchschnittsformprofils basierend
35 auf einer scheibenbezogenen Auswahl von Scheiben.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, umfassend das Bestimmen des weiteren Durchschnittsformprofils basierend auf einer schnittbezogenen Auswahl von Scheiben.
- 5
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, umfassend das Bestimmen des weiteren Durchschnittsformprofils basierend auf einer scheibenbezogenen und einer schnittbezogenen Auswahl von Scheiben.
- 10 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, umfassend das Bestimmen des ersten Durchschnittsformprofils und des weiteren Durchschnittsformprofils basierend auf einer gewichteten Mittelwertbildung des Formprofils von Scheiben.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei der Sägedraht ein
15 übereutektoidischer perlitischer Stahldraht ist.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei der Sägedraht einen Durchmesser von 70 µm bis 175 µm aufweist.
- 20 10. Verfahren nach Anspruch 8 oder Anspruch 9, wobei der Sägedraht entlang einer Drahtlängsachse mit einer Vielzahl an Ausstülpungen und Einbuchtungen in Richtungen senkrecht zur Drahtlängsachse versehen ist.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, umfassend das Zuführen eines
25 Kühlschmiermittels als Arbeitsflüssigkeit zu den Drahtabschnitten während der Abtrennvorgänge, wobei die Hartstoffe aus Diamant bestehen und auf der Oberfläche des Sägedrahts durch galvanische Bindung, durch Kunstharzbindung oder durch formschlüssige Bindung fixiert sind, und das Kühlschmiermittel frei von Stoffen ist, die auf das Werkstück abrasiv einwirken.
- 30
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, umfassend das Zuführen der Arbeitsflüssigkeit in Form einer Aufschlämmung der Hartstoffe in Glycol oder Öl zu den Drahtabschnitten während der Abtrennvorgänge, wobei die die Hartstoffe aus
35 Siliciumcarbid bestehen.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, umfassend das Bewegen des Sägedrahts in einer fortwährenden Abfolge von Paaren von Richtungsumkehrungen, wobei ein Paar von Richtungsumkehrungen jeweils ein erstes Bewegen des
- 5 Sägedrahts in eine erste Drahtlängsrichtung um eine erste Länge und ein zweites nachfolgendes Bewegen des Sägedrahts in eine zweite Drahtlängsrichtung um eine zweite Länge umfasst, die zweite Drahtlängsrichtung der ersten Drahtlängsrichtung entgegengesetzt ist, und die erste Länge größer als die zweite Länge ist.
- 10 14. Verfahren nach Anspruch 13, wobei der Sägedraht beim Bewegen in die um die erste Länge dem Drahtgatter mit einer ersten Zugkraft in Drahtlängsrichtung aus einem ersten Drahtvorrat zugeführt wird, und beim Bewegen um die zweite Länge mit einer zweiten Zugkraft in Drahtlängsrichtung aus einem zweiten Drahtvorrat zugeführt wird, und wobei die zweite Zugkraft geringer als die erste Zugkraft ist.
- 15 15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei das Werkstück aus einem Halbleitermaterial besteht.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei das Werkstück die Form
- 20 eines geraden Prismas aufweist.
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei das Werkstück die Form eines geraden Kreiszylinders aufweist.
- 25 18. Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium, gekennzeichnet durch eine Welligkeitszahl $W_{av_{red}}$ von nicht mehr als $7\text{ }\mu\text{m}$ und einen Durchmesser von 300 mm, oder durch eine Welligkeitszahl $W_{av_{red}}$ von nicht mehr als $4,5\text{ }\mu\text{m}$ und einen Durchmesser von 200 mm.
- 30 19. Halbleiterscheibe nach Anspruch 18, gekennzeichnet durch eine Welligkeitszahl $W_{av_{red}}$ von nicht mehr als $3\text{ }\mu\text{m}$ und einen Durchmesser von 300 mm, oder durch eine Welligkeitszahl $W_{av_{red}}$ von nicht mehr als $2\text{ }\mu\text{m}$ und einen Durchmesser von 200 mm.