

Verfahren zum gleichzeitigen Trennen einer Vielzahl von Scheiben von einem Werkstück mittels einer Drahtsäge

- 5 Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zum gleichzeitigen Trennen einer Vielzahl von Scheiben von einem Werkstück mittels einer Drahtsäge, umfassend einen Trennschleifvorgang, wobei ein Werkstück senkrecht zu einer Längsachse des Werkstücks gegen ein zwischen zwei Drahtführungsrollen gespanntes Drahtgatter eines Sägedrahts, der in Längsrichtung des Sägedrahts bewegt wird, zugestellt wird,
- 10 wobei ein Kühlschmiermittel dem Drahtgatter zugeführt wird, und wobei zwischen Drahtabschnitten des Drahtgatters Scheiben entstehen, die an einer Leiste befestigt sind und zwischen denen Trennspalte bestehen; und das das Herausziehen der Leiste und der Scheiben aus dem Drahtgatter.
- 15 Für eine Vielzahl von Anwendungen werden gleichförmige Scheiben mit guter Planparallelität ihrer Vorder- und Rückseiten benötigt, die arm sind an kristallinen und strukturellen Defekten. Ein Beispiel sind Scheiben aus einkristallinem Halbleitermaterial zum Strukturieren mikroelektronischer Bauelemente. Derartige Scheiben werden beispielsweise durch Abtrennen von einem zylindrischen Werkstück
- 20 aus einkristallinem Silicium mittels Drahtsägen erhalten.

Stand der Technik / Probleme

- Ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Drahtsägen sind beispielsweise aus der DE 10 2016 211 883 A1 bekannt. Beim Drahtsägen wird Sägedraht spiralförmig um
- 25 mindestens zwei Drahtführungsrollen herumgeführt, so dass zwei Drahtführungsrollen ein dem Werkstück zugewandtes Drahtgatter aus parallel zueinander verlaufenden Drahtabschnitten aufspannen. Die Mantelflächen der Drahtführungsrollen sind mit einer Vielzahl kreisförmig geschlossener und in Ebenen senkrecht zu den Achsen der Drahtführungsrollen verlaufender Rillen versehen, die den Sägedraht führen.
- 30 Gleichsinniges Drehen der Drahtführungsrollen erzeugt eine Relativbewegung zwischen den Drahtabschnitten und dem Werkstück. Eine Drahtsäge weist ferner eine Zustellvorrichtung auf, an der das Werkstück über eine Leiste, an die es geklebt ist, befestigt ist und die das Werkstück senkrecht auf das Drahtgatter zustellt. Die

Relativbewegung und die Anwesenheit eines abrasiv wirkenden Schneidmittels erzeugen bei Kontakt von Werkstück und Drahtgatter einen Materialabtrag vom Werkstück. Bei fortgesetztem Zustellen bilden die Drahtabschnitte Trennspalte im Werkstück aus, und das Drahtgatter arbeitet sich langsam durch das gesamte
5 Werkstück hindurch, bis das Drahtgatter vollständig innerhalb der Sägeleiste zu liegen kommt. Das Werkstück ist dann vollständig in Scheiben aufgetrennt, die wie Zinken eines Kamms, nur durch die Klebefuge gehalten, an der Leiste hängen.

Nach Beenden des Trennvorgangs muss das in Scheiben aufgetrennte Werkstück
10 durch Umkehrung der Bewegungsrichtung der Zustellvorrichtung aus dem Drahtgatter herausgezogen werden (Ingot Retrieval).

Drahtsägen kann nach Drahttrennläppen und Drahttrennschleifen unterschieden werden. Beim Drahttrennläppen ist der Sägedraht zunächst frei von abrasiv
15 wirkenden Stoffen, und das Schneidmittel wird in Form einer Aufschlämmung (Slurry) als frei bewegliches Korn in einer Trägerflüssigkeit zugeführt. Beim Drahttrennschleifen sind in der Oberfläche des Sägedrahts abrasiv wirkende Schneidmittel verankert und es wird eine Schneidflüssigkeit zugeführt, die als Kühlschmiermittel (cooling fluid) wirkt und keine abrasiv wirkenden Stoffe enthält.

20 Sägedraht besteht meist aus hypereutektischem perlitischem Stahl (Pianodraht). Es kommen gerade (glatte) Sägedrähte (plain wire, straight wire) und strukturierte (structured wire, crimped wire) Sägedrähte zum Einsatz.

25 Beim Drahttrennläppen besteht das Schneidmittel meist aus Siliciumcarbid (SiC) und die Trägerflüssigkeit meist aus Öl oder Glycol. Beim Drahttrennschleifen besteht das Schneidmittel meist aus Wasser, ggf. mit einem Netzmittel- und Entschäumer-Zusatz, und das im Sägedraht verankerte Schleifmittel sind in der Regel Diamanten. Die Leiste besteht aus einem Kunststoff-Verbundmaterial oder aus gesinterter Kohle.

30 Beim Drahtsägen wird der Sägedraht einem ersten Vorrat, meist in Form einer ersten Spule, auf die der Sägedraht aufgewickelt ist, entnommen, und nach Verbrauch einem zweiten Vorrat zugeführt, meist ebenfalls in Form einer zweiten Spule. Die

erste Spule wird als Frischdraht-Spule und die zweite Spule als Altdraht-Spule bezeichnet. Drahtsägen kann mit unidirektionaler oder bidirektionaler Drahtbewegung erfolgen. Beim unidirektionalen Drahtsägen wird der Sägedraht über die gesamte Dauer des Trennvorgangs in einer Drahtlängsrichtung von der Frischdraht- zur Altdrahtspule bewegt. Beim Drahtsägen mit bidirektionaler Drahtbewegung wird der Sägedraht während des Abtrennvorgangs mittels mindestens eines Paares von Richtungsumkehrungen bewegt, wobei ein Paar an Richtungsumkehrungen ein erstes Bewegen des Sägedrahts um eine erste Länge in eine erste Drahtlängsrichtung und ein zweites Bewegen des Sägedrahts um eine zweite Länge in eine zweite, der ersten genau entgegengesetzten Richtung umfasst. Insbesondere kann das Drahtsägen mit bidirektionaler Drahtbewegung eine Vielzahl derartiger Paare von Drahtrichtungsumkehrungen umfassen, wobei die erste Länge größer als die zweite Länge gewählt wird, so dass sich insgesamt der Drahtvorrat während des Trennvorgangs von der Frischdraht- zur Altdrahtspule hin verlagert. Das letztgenannte Verfahren wird als Drahtsägen im Pilgerschritt (pilgrim mode slicing, wire-reciprocating slicing) bezeichnet.

Es sind auch Drahtsägen bekannt, bei denen während des Trennvorgangs das Werkstück um eine Achse parallel zur Längsachse des Werkstücks geschwenkt werden kann. Insbesondere kann diese Rotationsbewegung in Form einer fortwährenden Abfolge aus einer Vielzahl von Paaren an Rotationswechseln durchgeführt werden, wobei ein Paar eines Rotationswechsels ein Rotieren im Uhrzeigersinn mit einer ersten Winkelgeschwindigkeit um einen ersten Winkel und ein nachfolgendes Rotieren im Gegenuhrzeigersinn mit einer zweiten Winkelgeschwindigkeit um einen zweiten Winkel umfasst. Dabei können erste und zweite Winkelgeschwindigkeiten und erste und zweite Winkel im Verlauf des Trennvorgangs auch variieren, bspw. in Abhängigkeit von der Schnitttiefe oder in Abhängigkeit von der momentanen Länge, mit der sich der Sägedraht im Werkstück befindet. Eine solche wiederkehrende Schaukelbewegung des Werkstücks wird auch als Rocking des Werkstücks bezeichnet. Eine dafür geeignete Vorrichtung beschreibt beispielsweise die US 2022/0134600 A1.

Während des Trennvorgangs wird Material hauptsächlich entlang der Kontaktfläche, entlang derer sich der Sägedraht mit dem Werkstück in Material abtragender Berührung befindet und die sich entgegengesetzt zur Richtung der Werkstückzustellung erstreckt, abgetragen. Diese Kontaktfläche wird als

5 Hauptspanfläche bezeichnet. Die Kontaktfläche, die der Sägedraht mit dem Werkstück senkrecht zu dieser Richtung, also in Richtung der Achse des Werkstücks, einnimmt, wird als Nebenspanfläche bezeichnet, da hier keine Kräfte infolge der Werkstückzustellung wirken und somit zunächst kein Material abgetragen wird. Die Summe aller momentanen Nebenspanflächen eines Trennspalt über den gesamten

10 Trennvorgang bilden Vorder- und Rückseite eines Paares benachbarter Scheiben.

Beim Drahtsägen ohne Rocking erstreckt sich die Hauptspanfläche entlang der gesamten Bogenlänge vom Eintritt des Sägedrahts in den Trennspalt bis zum Austritt des Sägedrahts aus dem Trennspalt. Beim Drahtsägen mit Rocking besteht zu jeder

15 Zeit die Hauptspanfläche nur aus dem kurzen Bogenabschnitt, mit dem der Sägedraht Kontakt mit der aufgrund des Rockings gekrümmten Trennlinie zwischen Werkstück und Trennspalt hat. Rocking verbessert die Versorgung der Trennspalte mit Kühlschmiermittel oder Slurry auch bei Werkstücken mit großen Durchmessern.

20 Beim Trennläppen ist die Materialabtragsrate proportional zum Druck auf die Hauptspanfläche. Beim Trennschleifen steigt die Materialabtragsrate überproportional mit dem Druck auf die Hauptspanfläche. Mit Hilfe des Rockings kann also schneller trenngeschliffen (aber nicht schneller trenngeläppt) werden als ohne Rocking.

25 Das Herausziehen des in Scheiben zertrennten Werkstücks aus dem Drahtgatter erfolgt beim Drahtsägen durch Rückstellen der Zustellung des Werkstücks. Dabei wird der Sägedraht langsam in Drahtlängsrichtung bewegt und Schneidflüssigkeit zugegeben, um Schneidflüssigkeit als Kühlschmierung in die Trennspalte zu ziehen und dort die Reibung des Sägedrahts in den Trennspalten und ein Verklemmen

30 einzelner Drahtabschnitte zwischen den gegenüberliegenden Nebenspanflächen eines Trennspalts zu verhindern. Beim Ingot Retrieval nach Drahttrennläppen tropft durch die langsame Drahtbewegung das meiste Slurry vom Sägedraht ab, bevor dieser in die Trennspalte eintritt, so dass die Dicke des Slurryfilms, der den Sägedraht

im Trennspace umgibt, wesentlich geringer ist als die Dicke des Slurryfilms während des vorangegangenen Trennvorgangs. Der Sägedraht hat beim Ingot Retrieval nach Drahttrennlappen somit Spiel im Trennspace und verklemmt nicht. Das begünstigt ein gleichförmiges Gleiten des Drahtgatters durch die Trennspace und schließlich aus diesen heraus, ohne dass der Sägedraht zwischen den Nebenspanflächen des Spalts verklemmt oder einen Materialabtrag von den Nebenspanflächen verursacht.

Beim Drahttrennschleifen umgibt keine Aufschlammung von Schneidmittel den Sägedraht. Die Breite der Trennspace ist somit identisch mit dem Drahtdurchmesser einschließlich der in den Sägedraht eingebundenen Diamanten. Während des Ingot Retrievals hat der Sägedraht somit kein Spiel innerhalb der Trennspace und verklemmt daher häufig bei verschiedenen Schnitttiefen. Durch die langsame Drahtlängsbewegung erfolgt dort sofort ein zusätzlicher Materialabtrag und es bilden sich Kerben in den Wänden der Trennspace. Da die Wände eines Trennspace die Vorderseite einer und die Rückseite der unmittelbar benachbarten Scheibe bilden, entstehen so Kerben in den nach Vereinzeln erhaltenen Scheiben. Scheiben mit Kerben in der Oberfläche sind für anspruchsvolle Anwendungen ungeeignet.

Während des Hängenbleibens des Sägedrahts bei einer Schnitttiefe während des Ingot Retrievals nach Drahttrennschleifen wird die Zustellvorrichtung weiter zurückgestellt. Der Sägedraht wird folglich in Drahtquerrichtung ausgelenkt und dadurch in Drahtlängsrichtung elastisch gedehnt. Der Sägedraht erfährt dadurch eine steigende Rückstellkraft. Wenn diese ausreichend angewachsen ist, springt der Sägedraht von der Schnitttiefe, bei der er während des Retrievals verklemmt, zu einer geringeren Schnitttiefe, wo er wieder verklemmt und so weiter (Stick-and-slip-Bewegung des Sägedrahts). Wenn die Zugkraft aufgrund der Drahtlängsdehnung infolge der Querauslenkung des Sägedrahts die Materialfestigkeit des Sägedrahts überschreitet, reißt der Sägedraht während des Ingot Retrievals. In diesem Fall muss das Werkstück vollständig aus dem defekten Drahtgatter rückgestellt werden, die Drahtreste von Hand aus den Trennspace entfernt werden, und das Drahtgatter vor dem nächsten Trennvorgang wieder repariert werden. Das ist zeitaufwendig und kostenintensiv.

- Gelegentlich reißt der Sägedraht während des Trennvorgangs aufgrund Überlastung oder Materialfehlern im Sägedraht. Das teilweise aufgetrennte Werkstück muss dann durch Rückstellen der Zustell-Vorrichtung aus dem defekten Drahtgatter herausgefahren, die Drahtreste aus den Trennspalten entfernt, das Drahtgatter repariert, die Drahtabschnitte in die bereits vorhandenen Trennspalte wieder eingefädelt werden und das Werkstück bis zu der Schnitttiefe, bei der der Drahttriss auftrat, wieder zugestellt werden, um den Trennvorgang beenden zu können. Beim Drahttrennläppen gelingen Einfädeln und Zustellen des Werkstücks im Drahtgatter mühelos und ohne Hängenblieben des Sägedrahts bei bestimmten Schnitttiefen, da der Sägedraht aufgrund des umgebenden Slurryfilms ausreichend Spiel im Trennspalt hat. Beim Drahttrennschleifen, bei dem der Sägedraht keine Bewegungsfreiheit hat, verklemmt der Sägedraht beim Zustellen des Werkstücks, und es werden Kerben erzeugt.
- 15 Selbst wenn der mit Diamanten besetzte Sägedraht bei der Zustellung des Werkstücks nach Drahttriss oder beim Rückstellen der Zustellung während eines Ingot Retrievals nicht erkennbar verhakt, führt der Mangel an Bewegungsfreiheit doch in jedem Fall zu einem zusätzlichen Materialabtrag von den den Spalt begrenzenden Seitenwänden und somit zu einer Schädigung der Vorder- und Rückseiten der betreffenden Scheiben. Eine solche Schädigung verursacht Materialspannungen in der geschädigten Oberfläche, die, wenn sich scheibenvorder- und -rückseitige Spannung nicht genau ausgleichen (was in der Regel nicht der Fall ist), die Scheibe elastisch verformen. Diese elastische Verformung durch Oberflächenschädigung ist der plastischen Verformung überlagert, und die plastische Verformung kann nicht isoliert durch Bestimmen der Scheibenform mittels Messung nach dem Drahtsägen bestimmt und somit auch nicht durch geeignete Maßnahmen gezielt beseitigt werden. Letzteres ist erforderlich, denn die elastische Verformung verschwindet, wenn in der Material abtragenden Folgebearbeitung die geschädigten Schichten entfernt werden, während die plastische Verformung verbleibt, wenn sie nicht durch gezielten
- 30 Materialabtrag beseitigt wird.

US 2009/0223539 A1 beschreibt beispielsweise ein Verfahren zum Reinigen von Scheiben für Solaranwendungen, die nach Abschluss des Trennvorgangs und

Entfernen aus der Drahtsäge, noch mit ihrer Klebefuge an der Sägeleiste (Opferleiste) hängend, in ein Reinigungsbad eingetaucht werden. Die Trennfugen werden von mehreren separaten Sprühdüsen mit Spülflüssigkeit beaufschlagt. Dort, wo Spülflüssigkeit eingesprüht wird, weitet sich der Trennspace im Wasserbad auf, so dass sich die Reinigungswirkung verstärkt. Durch Bewegen der Düsen relativ zum Werkstück können nacheinander alle Trennspace aufgeweitet und so sukzessive gereinigt werden. Das beschriebene Verfahren leistet keinen Beitrag zur Vermeidung der Folgen einer Stick-and-Slip-Bewegung des Sägedrahts beim Ingot Retrieval.

JP 2006-66793 A beschreibt ein ähnliches Verfahren, bei dem ein Block aufgetrennter Scheiben nach Abschluss des Trennvorgangs und Ausbau aus der Drahtsäge zwecks Reinigung seitlich mittels Sprühdüsen mit einer Spülflüssigkeit besprüht wird.

US 2011/0168212 beschreibt ein ähnliches Verfahren zur Reinigung dünner, leicht zerbrechlicher Solarwafer nach Sägen und Ausbau des zertrennten Werkstücks aus der Drahtsäge.

JP2004-106360 beschreibt ein Verfahren, bei dem nach Drahttrennlappen und Ingot Retrieval eines Werkstücks eine Spülflüssigkeit durch in der Leiste vorhandene Kanäle zum Reinigen der Trennspace geschickt wird.

Aufgabe der Erfindung ist es, Stick-and-slip-Bewegungen des Sägedrahts und deren nachteilige Folgen zu vermeiden.

Die Aufgabe der Erfindung wird gelöst durch ein Verfahren zum gleichzeitigen Trennen einer Vielzahl von Scheiben von einem Werkstück mittels einer Drahtsäge, umfassend einen Trennschleifvorgang, wobei ein Werkstück senkrecht zu einer Längsachse des Werkstücks gegen ein zwischen zwei Drahtführungsrollen gespanntes Drahtgatter eines Sägedrahts, der in Längsrichtung des Sägedrahts bewegt wird, zugestellt wird, wobei ein Kühlschmiermittel dem Drahtgatter zugeführt wird, und wobei zwischen Drahtabschnitten des Drahtgatters Scheiben entstehen, die an einer Leiste befestigt sind und zwischen denen Trennspace bestehen, und

das Herausziehen der Leiste und der Scheiben aus dem Drahtgatter;
gekennzeichnet durch während des Herausziehens der Leiste und der Scheiben das
Besprühen der Trennspalte mit einer Flüssigkeit mittels einer Sprühvorrichtung, bis
die Drahtabschnitte die Trennspalte verlassen haben, wobei die Flüssigkeit unter
5 hohem Druck durch Düsen zugeführt wird, die an Düsenleisten befestigt sind, die
parallel zur Längsachse des Werkstücks oszillierend bewegt werden, wobei die
Flüssigkeit und mitgerissene Luft die Scheiben zeitweilig zum Schwingen anregen.

Die Düsen sprühen während des Herausziehens Flüssigkeit auf die Trennspalte.
10 Dabei wird umgebende Luft verwirbelt und die Scheiben mittels Bernoulli-Effekt in
Vibration versetzt. Die Düsenleisten führen eine oszillierende Hubbewegung parallel
zur Werkstückachse aus, weshalb auf jeden Trennspalt zeitweilig Flüssigkeit aus
mindestens einer Düse in der Ebene des entsprechenden Trennspalts auftrifft. Auf
diese Weise gelangt Flüssigkeit tief in die Trennspalte und der durch die oszillierende
15 Bewegung bedingte Wechsel des Sprühdruks bewirkt ein fortwährendes
periodisches Auffächern nach und nach aller Trennspalte während des
Herausziehens der Leiste und der Scheiben aus den Trennspalten.

Der Druck, mit dem die Flüssigkeit durch die Düsen zugeführt wird, wird vorzugsweise
20 so gewählt, dass die Austrittsgeschwindigkeit des Spülmittels der Geschwindigkeit
entspricht, mit der der Draht relativ zum Werkstück bewegt wird.

Die Düsen sind vorzugsweise Bestandteil einer Sprühvorrichtung umfassend
mindestens jeweils eine Düsenleiste, die seitlich der Drahtführungsrollen des
25 Drahtgatters zwischen der jeweiligen Drahtführungsrolle und dem Werkstück
angeordnet sind. Die Düsenleisten können eine Hubbewegung parallel zur
Werkstückachse vollführen und sind vorzugsweise parallel zu Drehachsen der
Drahtführungsrollen angeordnet.

Besonders bevorzugt sind genau zwei Düsenleisten, von denen in Richtung der
Werkstückachse betrachtet eine Frischdraht-eingangsseitig und eine Altdraht-
ausgangsseitig seitlich des Werkstücks angeordnet sind. Die Düsen sind bevorzugt so
ausgerichtet, dass jede Düse einen Teilstrahl an Flüssigkeit erzeugt, der tangential
zum Drahtgatter und in einer der Ebenen, in denen die Trennspalte verlaufen,
35 ausgerichtet ist. Die Amplitude der oszillierenden Bewegung, mit dem die jeweilige

Düsenleiste parallel zur Längsachse des Werkstücks bewegt wird, beträgt vorzugsweise mindestens die Hälfte des Abstands zweier benachbarter Düsen. Der gesamte, der Doppelamplitude entsprechende Hub beträgt also mindestens den Abstand zweier Düsen. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass nach einer Periode der oszillierenden Bewegung jede Düse alle Trennspalte, die sich zwischen dieser Düse und der benachbarten Düse befinden, überstreicht.

Die Anzahl der Düsen je Düsenleiste beträgt vorzugsweise 10 bis 50. Eine möglichst hohe Düsenzahl ist besonders bevorzugt. Die Anzahl ist nach oben hin nur durch die Abmessungen der Düsen begrenzt. Der erforderliche Hub der Oszillationsbewegung der Düsenleiste wird dadurch geringer und das Überstreichen der Trennspalte erfolgt in kürzeren Intervallen.

Beim Trennschleifvorgang wird das Werkstück mittels einer Zustellvorrichtung zugestellt. Die Drahtführungsrollen drehen sich gleichsinnig, so dass die Drahtabschnitte eine Relativbewegung zum Werkstück beschreiben und beim Eingreifen ins Werkstück in Folge der Zustellbewegung ein Materialabtrag erfolgt. Am Ende des Trennschleifvorgangs ist das Werkstück vollständig zertrennt und eine Vielzahl parallel zueinander verlaufender Trennspalte zwischen Scheiben entstanden, die von der Leiste gehalten werden.

Das Herausziehen der Leiste und der Scheiben aus den Trennspalten umfasst das Rückstellen der Zustellvorrichtung unter Bewegung der Drahtabschnitte in Drahtlängsrichtung in Anwesenheit von Kühlschmiermittel.

Das Werkstück ist vorzugsweise ein kreiszylindrischer Stab aus einkristallinem Halbleitermaterial.

Das Verfahren umfasst vorzugsweise auch das Schwenken des Werkstücks um eine Achse parallel zur Längsachse der Werkstücks während des Trennschleifvorgangs, wobei das Werkstück eine Vielzahl von Paaren von Schwenkbewegungen ausführt, und ein Paar von Schwenkbewegungen ein erstes Schwenken um einen ersten Winkel mit einer ersten Winkelgeschwindigkeit und ein nachfolgendes zweites Schwenken um einen zweiten Winkel mit einer zweiten Winkelgeschwindigkeit umfasst. Die ersten und zweiten Winkelgeschwindigkeiten und die ersten und zweiten

Winkel zweier Paare von aufeinanderfolgenden Paaren von Schwenkbewegungen sind vorzugsweise unterschiedlich.

Der Sägedraht ist vorzugsweise ein hypereutektischer perlitischer Stahldraht (Pianodraht), auf dessen Oberfläche Schneidmittel fixiert sind. Die Schneidmittel sind vorzugsweise Diamanten.

Das Bewegen des Sägedrahts in Längsrichtung während des Trennschleifvorgangs kann ohne oder mit Richtungsumkehr erfolgen. Beim Bewegen des Sägedrahts in Längsrichtung mit Richtungsumkehr wird der Sägedraht mittels einer Vielzahl von Pilgerschritten bewegt, wobei ein Pilgerschritt jeweils ein erstes Bewegen des Drahts in eine erste Längsrichtung um eine erste Länge und ein zweites Bewegen des Sägedrahts in eine zweite, der ersten Drahtlängsrichtung genau entgegengesetzte Längsrichtung um eine zweite Länge umfasst und die erste Länge größer als die zweite Länge ist.

Das Kühlschmiermittel und die Flüssigkeit bestehen vorzugsweise aus Wasser, das gegebenenfalls einen flüssigen Zusatz enthält. Beide können identisch oder unterschiedlich zusammengesetzt sein. Der flüssige Zusatz ist vorzugsweise ein Netzmittel, ein Korrosionsschutzmittel, ein die Viskosität beeinflussendes Mittel, beispielsweise Glykol und/oder Methylcellulose, ein Entschäumungsmittel oder eine beliebige Mischung dieser Mittel.

Die erfindungsgemäße Vorgehensweise wird vorzugsweise auch genutzt, um angemessen auf eine Unterbrechung des Trennschleifvorgangs zu reagieren, insbesondere in Folge eines Risses des Sägedrahts. Sie vermeidet, dass beim Herausziehen des Werkstücks nach dem Drahttriss und beim Zurückversetzen des Werkstücks in die Position vor dem Drahttriss Drahtabschnitte hängen bleiben und Riefen oder elastische Verformungen die Qualität der Scheiben beeinträchtigen.

Das Unterbrechen des Trennschleifvorgangs geschieht unter Fortführen des Bewegens des Sägedrahts in Längsrichtung und umfasst das Herausziehen des Werkstücks aus den Trennspalten, das Zurückführen des Werkstücks in die Trennspalte und das Fortsetzen des Trennschleifvorgangs. Während des Zurückführens des Werkstücks wird Flüssigkeit durch die Düsen in die Trennspalte

gesprüht und die Düsenleisten werden parallel zur Längsachse des Werkstücks bewegt.

- Vorzugsweise erfolgt das Bewegen des Sägedrahts in Längsrichtung während des
- 5 Trennschleifvorgangs mit einer Geschwindigkeit, die mindestens zehnmal schneller ist, als die Geschwindigkeit der Bewegung des Sägedrahts in Längsrichtung beim Herausziehen und Zurückführen des Werkstücks im Zuge der Unterbrechung des Trennschleifvorgangs.
- 10 Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf Zeichnungen an einem bevorzugten Ausführungsbeispiel einer Drahtsäge vorgestellt.

Kurzbeschreibung der Figuren

- 15 **Fig. 1** zeigt Merkmale der Drahtsäge und des Werkstücks, die zum Verständnis der Erfindung beitragen.
- Fig. 2 (A)** und **(B)** zeigen Einzelheiten einer Sprühvorrichtung, die zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens geeignet ist.

20 Liste der verwendeten Bezugszeichen

- | | |
|------|---|
| 1 | Werkstück |
| 2 | Leiste |
| 3 | Richtung der Zustellung |
| 25 4 | Sägedraht |
| 5 | linke Drahtführungsrolle |
| 6 | rechte Drahtführungsrolle |
| 7 | Drehachse |
| 8 | Drehachse |
| 30 9 | Richtung der Drahtzufuhr |
| 10 | Richtung der Drahtabfuhr |
| 11 | Richtung der Drehung der Drahtführungsrolle |
| 12 | Leiste |
| 13 | Leiste |

- 14 Düse
- 15 Kühlschmiermittels
- 16 linke Düsenleiste
- 17 rechte Düsenleiste
- 5 18 Achse der linken Düsenleiste
- 19 Achse der rechten Düsenleiste
- 20 Düse
- 21 Flüssigkeit
- 22 Trennspalt
- 10 23 Rille
- 24 Drahtgatter
- 25 Klebefuge
- 26 Längsachse des Werkstücks
- 27 oszillierende Bewegung
- 15 28 oszillierende Bewegung
- 29 Bewegungsrichtung
- 30 aufgeweiteter Trennspalt
- 31 Düse
- 32 Düse
- 20 33 Diamanten
- 34 Scheibe
- 35 mitgerissene Luft

Detaillierte Beschreibung eines erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiels

- 25 Wie in Fig. 1 dargestellt, wird beim Drahtsägen Sägedraht 4 derart spiralförmig um mindestens zwei Drahtführungsrollen herumgeführt, dass zwei Drahtführungsrollen 5 und 6 ein dem Werkstück 1 zugewandtes Drahtgatter 24 aus parallel zueinander verlaufenden Drahtabschnitten aufspannen. Die Drahtführungsrollen weisen die Form gerader Kreiszylinder auf mit Drehachsen 7 und 8, die parallel zueinander
- 30 ausgerichtet sind und um die sie in Richtungen 11 gedreht werden können. Die Mantelflächen der Drahtführungsrollen sind mit einer Vielzahl kreisförmig geschlossener und in Ebenen senkrecht zu den Drehachsen 7 und 8 verlaufender Rillen 23 versehen, die den Sägedraht 4 führen. Gleichsinniges Drehen der

Drahtführungsrollen erzeugt eine Relativbewegung zwischen Drahtabschnitten und Werkstück. Dabei wird frischer Sägedraht aus einem ersten Drahtvorrat, der sogenannten Frischdrahtspule, entnommen (Richtung 9) und verbrauchter Sägedraht einem zweiten Drahtvorrat, der sogenannten Altdrahtspule, zugeführt (Richtung 10).

- 5 Die Drahtsäge weist ferner eine Zustellvorrichtung auf, an der das Werkstück 1 durch Verklebung 25 mit einer Leiste 2 befestigt ist und die das Werkstück senkrecht auf das Drahtgatter zustellt (Richtung 3). Die Relativbewegung und die Anwesenheit eines abrasiv wirkenden Schneidmittels erzeugen bei Kontakt von Werkstück und Drahtgatter einen Materialabtrag vom Werkstück. Durch fortgesetzte Zustellung,
- 10 Relativbewegung und Zufuhr von Schneidmittel bildet jeder Drahtabschnitt des Drahtgatters 24 mittels fortgesetzten Materialabtrags vom Werkstück einen Trennspalt 22 aus. Die Seitenwände eines Trennspalts 22 begrenzen jeweils die Rückseite einer und die Vorderseite einer zweiten Scheibe 34 eines Paares unmittelbar benachbarter Scheiben.

- 15 Das Schneidmittel sind Diamanten 33, die in der Oberfläche des Drahts 1 fest eingebunden sind. Während des Trennschleifvorgangs wird dem Drahtgatter 24 über zwei Leisten 12, 13 links und rechts des Werkstücks, die mit Düsen 14 versehen sind, ein Kühlschmiermittel 15 zugegeben, das selbst keine abrasiv wirkenden
- 20 Schneidmittel (Hartstoffe) enthält. Der Trennschleifvorgang ist beendet, wenn sich das gesamte Drahtgatter vollständig durch das Werkstück hindurchgearbeitet hat und in der Leiste 2 zu liegen gekommen ist. Die Scheiben 34 des vollständig aufgetrennten Werkstücks hängen dann wie Zinken eines Kamms, nur durch die Klebefuge 25 mit der Leiste 2 verbunden, an der halb durchtrennten Leiste.

- 25 Die dargestellte Drahtsäge ist mit einer linken Düsenleiste 16 und einer rechten Düsenleiste 17 versehen. Die Düsenleisten 16, 17 tragen eine Vielzahl von Düsen 20, die eine Flüssigkeit 21 auf die Trennspalte 22 des Werkstücks 1 sprühen. Die Achsen 18 und 19 der Düsenleisten sind parallel zueinander und parallel zu den Drehachsen
- 30 7 und 8 der das Drahtgatter 24 aufspannenden Drahtführungsrollen 5 und 6 und senkrecht zu den Trennspalten 22 des Werkstücks 1 bzw. parallel zur Längsachse 26 des Werkstücks 1 angeordnet. Die Düsenleisten führen oszillierende Bewegungen 27 und 28 in Richtungen ihrer Achsen 18 und 19 aus. Durch dieses periodische Verschieben überstreichen die Strahlen der Flüssigkeit 21, die die einzelnen Düsen
- 35 20 verlassen, die Trennspalte 22 des Werkstücks 1 in periodischen Abständen.

Die bevorzugte Anordnung gemäß Fig. 1 zeigt die Düsenleiste 16 links vom Werkstück 1, also Frischdraht-eingangsseitig, und Düsenleiste 17 rechts vom Werkstück 1, also Altdraht-ausgangsseitig, und beide, aus Richtung der Zustellvorrichtung gesehen, unterhalb des Drahtgatters 24. Abweichend davon können die Düsenleisten auch oberhalb des Drahtgatters 24 angeordnet sein.

Wie bereits erwähnt kann das erfindungsgemäße Verfahren auch mit einer Drahtsäge durchgeführt werden, bei der das Werkstück während des Trennschleifvorgangs um eine Achse parallel zur Längsachse des Werkstücks geschwenkt werden kann. Bei diesem Rocking gelangt zu jedem Zeitpunkt nur ein Teilabschnitt des gesamten innerhalb eines Trennspalt verlaufenden Drahtabschnitts in Material abtragenden Kontakt mit dem Werkstück. In Drahtlängsrichtung betrachtet werden vor und hinter dieser momentanen Kontaktfläche Spalte zwischen Sägedraht und Werkstück mit Ausdehnung in Richtung der Werkstückzustellung gebildet. Wenn die Düsenleisten oberhalb des Drahtgatters angeordnet sind, kann die Flüssigkeit besonders gut zwischen Sägedraht und Werkstück gelangen. Wenn die Düsenleisten unterhalb des Drahtgatters angeordnet sind, kann trotz Rocking kaum Flüssigkeit zwischen Sägedraht und Werkstück gelangen. Andererseits werden in diesem Fall die unter das Drahtgatter ragenden aufgetrennten Teile des Werkstücks – die späteren Scheiben – durch den Bernoulli-Effekt des Strahls der Flüssigkeit besonders gut zum Schwingen und somit periodischen Vergrößern und Verkleinern der Trennspaltbreite angeregt.

Fig. 2 (A) und (B) zeigt Einzelheiten einer die Düsenleisten 16 und 17 umfassenden Sprühvorrichtung in Aufsicht (aus Richtung der Zustellvorrichtung betrachtet) auf die linke Düsenleiste 16 und einen Teil des Werkstücks 1 mit den Trennspalten 22 und der Längsachse 26 des Werkstücks.

Fig. 2 (A) zeigt die Düsenleiste 16 mit Achse 18 parallel zur Längsachse 26 des Werkstücks am Anfang der oszillierenden Bewegung 27 parallel zur Achse 18. Es gibt Düsen 31, von denen ein Teil deren Strahls von Flüssigkeit 21 genau in der Ebene jeweils eines Trennspalts 22 verläuft, wodurch Flüssigkeit 21 tief in den Trennspalt 22 hineingedrückt wird. Im Zuge dessen wird das Paar benachbarter Scheiben 34, das der Trennspalt 22 trennt, in Bewegungsrichtungen 29 vom Trennspalt elastisch weggedrückt, wodurch sich der Trennspalt zu einem aufgeweiteten Trennspalt 30

elastisch aufweitet. Darüber hinaus gibt es Düsen 32, von denen kein Teil deren Strahls von Flüssigkeit 21 innerhalb der Ebene eines Trennspalts 22 verläuft, und die somit keinen Trennspalt elastisch aufweiten. Die Strahlen von Flüssigkeit 21 reißen mittels Impulsaustauschs Luft 35 aus der Umgebung mit (entrainment).

5

Wenn die linke Düsenleiste 16 die oszillierende Bewegung 27 in Richtung der Achse 18 ausgeführt hat, erreicht sie die in Fig. 2 (B) gezeigte Position des anderen Endes ihrer oszillierenden Bewegung. Die Düsen 31, von denen ein Teil deren Strahlen Flüssigkeit in einen Trennspalt hineindrücken und ihn so aufweiten, sind nun in einer anderen Position und weiten andere Trennspalte auf als diejenigen in der Anordnung gemäß Fig. 2 (A). Die Amplitude der oszillierenden Bewegung 27 beträgt mindestens den Wert des Abstandes zweier benachbarter Düsen.

10

Während der oszillierenden Bewegung 27 streichen die Strahlen von Flüssigkeit 21 (Flüssigkeit inkompressibel) und die von den Strahlen mitgerissene Luft 35 (Luft/Gas kompressibel) über Scheiben 34 und Trennspalte 22 hinweg. Da sie während der oszillierenden Bewegung Scheiben und Trennspalte in unterschiedlichen Ebenen umströmen, werden die Scheiben 34 durch die dynamischen Luftdruckänderungen der von den Strahlen mitgerissenen Luft zu Schwingungen angeregt (Bernoulli-Effekt). Mit anderen Worten, es werden elastische Auslenkungen der Scheiben und sich periodisch verbreiternde und verjüngende Trennspalte angeregt.

15

20

Der vorliegenden Erfindung zugrunde liegende Untersuchungen zur Vermeidung des Stick-and-Slips des Sägedrahts bei Ingot Retrieval und beim Repositionieren eines Werkstücks nach einer Unterbrechung des Trennschleifvorgangs haben gezeigt, dass eine Schwingungsanregung der Scheiben notwendig ist, um die Reibungskräfte des Sägedrahts im engen Trennspalt zu reduzieren. Ein Aufweiten des Trennspalts durch forciertes Hineinpressen von Flüssigkeit an wechselnden Trennspalten und der damit verknüpfte Reinigungseffekt als einzige Maßnahme, läuft zu langsam ab. Damit lässt sich nicht verhindern, dass der Sägedraht beim Ingot Retrieval oder beim Repositionieren des Werkstücks nach einer Unterbrechung des Trennschleifvorgangs Riefen oder strain-induced Warpage erzeugt.

25

30

Nur das Anregen von Schwingungen der Scheiben mittels des Bernoulli-Effekts durch einen Strahl von Flüssigkeit und mitgerissener Luft erweist sich als zur Lösung der Aufgabe geeignet.

5

10

Patentansprüche

1. Verfahren zum gleichzeitigen Trennen einer Vielzahl von Scheiben von einem Werkstück mittels einer Drahtsäge, umfassend
5 einen Trennschleifvorgang, wobei ein Werkstück senkrecht zu einer Längsachse des Werkstücks gegen ein zwischen zwei Drahtführungsrollen gespanntes Drahtgatter eines Sägedrahts, der in Längsrichtung des Sägedrahts bewegt wird, zugestellt wird, wobei ein Kühlschmiermittel dem Drahtgatter zugeführt wird, und wobei zwischen Drahtabschnitten des Drahtgatters Scheiben entstehen, die an einer Leiste befestigt
10 sind und zwischen denen Trennspalte bestehen, und
das Herausziehen der Leiste und der Scheiben aus dem Drahtgatter, gekennzeichnet durch während des Herausziehens der Leiste und der Scheiben das Besprühen der Trennspalte mit einer Flüssigkeit mittels einer Sprühvorrichtung, bis die Drahtabschnitte die Trennspalte verlassen haben, wobei die Flüssigkeit unter
15 hohem Druck durch Düsen zugeführt wird, die an Düsenleisten befestigt sind, die parallel zur Längsachse des Werkstücks oszillierend bewegt werden, wobei die Flüssigkeit und mitgerissene Luft die Scheiben zeitweilig zum Schwingen anregen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine Amplitude der
20 oszillierenden Bewegung gleich oder größer ist, als die Summe des Abstands zweier benachbarter Düsen.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, gekennzeichnet durch das
25 Unterbrechen des Trennschleifvorgangs unter Fortführen des Bewegens des Sägedrahts in Längsrichtung, umfassend
das Herausziehen des Werkstücks aus den Trennspalten;
das Zurückführen des Werkstücks in die Trennspalte; und
das Fortsetzen des Trennschleifvorgangs, wobei während des Zurückführens des Werkstücks Flüssigkeit durch die Düsen in die Trennspalte gesprüht wird und die
30 Düsenleisten parallel zur Längsachse des Werkstücks bewegt werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, gekennzeichnet durch das
Schwenken des Werkstücks um eine Achse parallel zur Längsachse der Werkstücks während des Trennschleifvorgangs, wobei das Werkstück eine Vielzahl von Paaren
35 von Schwenkbewegungen ausführt und ein Paar von Schwenkbewegungen ein erstes

Schwenken um einen ersten Winkel mit einer ersten Winkelgeschwindigkeit und ein nachfolgendes zweites Schwenken um einen zweiten Winkel mit einer zweiten Winkelgeschwindigkeit umfasst.

- 5 5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die ersten und zweiten Winkelgeschwindigkeiten und die ersten und zweiten Winkel zweier Paare von aufeinanderfolgenden Paaren von Schwenkbewegungen unterschiedlich sind.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass
10 das Kühlschmiermittel Wasser und einen ersten flüssigen Zusatz und die Flüssigkeit Wasser und einen zweiten flüssigen Zusatz umfassen.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der erste und der zweite flüssige Zusatz identisch sind und ein Netzmittel oder ein
15 Korrosionsschutzmittel oder ein die Viskosität beeinflussendes Mittel, ein Entschäumungsmittel oder eine Mischung davon umfassen.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass
20 der Sägedraht aus hypereutektischem perlitischem Stahldraht besteht, auf dessen Oberfläche Diamanten als Schneidmittel fixiert sind.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass
das Werkstück ein kreiszylindrischer Stab aus einkristallinem Halbleitermaterial ist.
- 25 10. Verfahren nach Anspruch 3, gekennzeichnet durch das Bewegen des Sägedrahts in Längsrichtung während des Trennschleifvorgangs mit einer Geschwindigkeit, die mindestens zehnmal schneller ist als die Geschwindigkeit der Bewegung des Sägedrahts in Längsrichtung beim Herausziehen und Zurückführen des Werkstücks.
30
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, gekennzeichnet durch das Bewegen des Sägedrahts in Längsrichtung ohne Richtungsumkehr.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, gekennzeichnet durch das
35 Bewegen des Sägedrahts in Längsrichtung mit Richtungsumkehr, wobei der

Sägedraht mittels einer Vielzahl von Pilgerschritten bewegt wird, wobei ein Pilgerschritt jeweils ein erstes Bewegen des Drahts in eine erste Längsrichtung um eine erste Länge und ein zweites Bewegen des Sägedrahts in eine zweite, der ersten Drahtlängsrichtung genau entgegengesetzte Längsrichtung um eine zweite Länge umfasst und die erste Länge größer als die zweite Länge ist.

5