

FIL A SCIER, METHODE ET INSTALLATION DE FABRICATION D'UN TEL FIL ET UTILISATION

5 **Domaine technique**

La présente invention se rapporte à un fil à scier ondulé destiné à la coupe de matériaux durs. Elle concerne également un procédé de fabrication d'un tel fil et une installation pour mettre en œuvre le procédé de fabrication. Enfin, elle concerne un procédé de sciage utilisant un tel fil
10 à scier.

Dans la description ci-dessous, les références entre crochets ([]) renvoient à la liste des références présentée à la fin du texte.

Etat de la technique

15 La technique de coupe des matériaux durs avec un fil est déjà utilisée pour le débit de blocs de silicium monocristallin ou polycristallin, de semi-conducteurs, de cristaux de matériaux magnétiques, de céramiques de quartz ou d'autres matériaux cassants.

Dans le cas de la production de wafers, c'est-à-dire de tranches de
20 silicium, pour la fabrication de cellules solaires photovoltaïques, on utilise cette technique de sciage par fil. Le procédé commence avec des blocs de silicium monocristallin ou polycristallin de section carrée ou ronde qui sont découpés en fines tranches d'épaisseur comprise entre 180 et 280 μm . Un simple fil, typiquement de diamètre 120 μm et d'une longueur de 600 à 900
25 km, provient d'une bobine et défile sur un banc de quatre rouleaux montés rotatifs autour d'axes parallèles entre eux et répartis aux sommets d'un rectangle. Le fil entoure de multiples fois les rouleaux et forme ainsi des nappes de brins parallèles entre eux et régulièrement espacés. Deux des nappes sont horizontales et reçoivent pendant les opérations de découpe
30 un bloc de silicium qui repose sur une nappe par son poids propre ou est

poussé par des moyens mécaniques. Le fil est reçu à sa sortie par une bobine réceptrice.

Chaque brin reçoit par une buse une pâte abrasive qu'il entraîne vers le bloc. Des particules d'abrasif 3 s'interposent entre le fil 1 et le bloc 2, comme le montre les figures 12 et 13, ce qui réalise un processus de coupe par érosion. Des rainures 4 de plus en plus profondes parallèles les unes aux autres sont ainsi réalisées à travers le bloc 2, jusqu'à ce que les rainures débouchent et traversent complètement le bloc. L'abrasif est en général en carbure de silicium (SiC) avec des particules 3 de diamètre compris entre 10 et 15 μm . La pâte abrasive est formée par un mélange de ces particules et une huile ou du glycol.

Ce procédé nécessite un fil de haute qualité, ayant une haute résistance à la tension. Une rupture du fil pendant le processus de découpe rend le bloc inutilisable.

Le fil à scier est en général un filament unique en acier rectiligne et lisse. Il est obtenu par tréfilage sur une machine à tréfiler par voie humide et est enroulé sur une bobine.

L'efficacité de l'opération de sciage dépend de nombreux paramètres tels que les caractéristiques du matériau à découper, la vitesse du fil, la nature de l'abrasif et de la pâte abrasive et les propriétés du fil. Un paramètre déterminant est la capacité du fil à entraîner la pâte abrasive et à évacuer le mélange de pâte abrasive et de particules soustraites du matériau, de manière à renouveler l'abrasif sur la surface de travail et à éviter le blocage du fil dans la rainure.

Les capacités d'entraînement d'un fil lisse sont limitées. On constate que les particules d'abrasif ont tendance à rouler entre le fil et la surface du matériau à couper, comme symbolisé par des flèches sur la figure 13. L'abrasif endommage donc le fil en même temps qu'il abruse le matériau, ce qui aboutit à la limitation de la longueur sur laquelle il peut être utilisé avant de risquer sa rupture. La vitesse de l'abrasif est en moyenne la moitié de celle du fil.

On constate également un autre phénomène lors du début de la coupe, illustré par la figure 16. Lorsque le fil entre en contact avec la surface à scier, il est juste tendu sans être guidé latéralement. Le fil roule sur l'abrasif et oscille autour de sa position d'équilibre, de telle sorte qu'un
5 sillon initial est creusé avec une largeur supérieure à celle de la rainure qui est ensuite réalisée. Il en résulte des congés 40 d'entrée des rainures. Ce phénomène entraîne une augmentation importante de la variation totale d'épaisseur pour les wafers, ce qui est une perte importante de qualité.

Le document WO 90/12670 A1 [1] propose un fil à scier
10 monofilament comportant une surface extérieure texturée, de telle sorte que l'abrasif est mieux entraîné et se détache moins facilement du fil. Dans les formes proposées, la surface du fil est munie de microcavités ou de gorges circonférentielles. Cependant, les procédés de fabrication d'un tel fil sont lents et manquent de productivité. Le prix de revient du fil est ainsi
15 très élevé. De plus, le fil est fragilisé par la texture qui crée des concentrations de contraintes et des amorces de rupture.

Les documents EP 1 827 745 A1 [2] et JP 12-89527 [3] montre un fil auquel on a conféré des frisures, c'est-à-dire des formes en zigzag par un passage entre des paires de rouleaux à gaufrer. Bien que ces solutions
20 présentent un meilleur entraînement de l'abrasif, les changements brusques de courbure du fil sont des points de fragilisation du fil qui limitent la tension que peut supporter le fil. De plus, les frisures diminuent la rigidité longitudinale du fil, ce qui peut provoquer des blocages du fil lors du processus de sciage. Pour limiter ces risques, on est amené à réduire la
25 vitesse du fil pendant le sciage, ce qui limite la productivité du procédé de sciage.

Le document JP 2004-276207 A [4] propose aussi un fil pour le sciage. Dans un mode de réalisation, le fil comporte des ondulations en spirale afin de réserver de l'espace entre le fil et la rainure pour stocker et
30 évacuer la matière détachée de la pièce à couper. Cependant, ce fil est

trop souple longitudinalement et présente le risque de se mettre en boucle avant d'entrer dans la rainure.

Par ailleurs, des développements récents ont abouti à un fil revêtu d'abrasif, de telle sorte qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser de la pâte abrasive. L'abrasif peut être formé de divers oxydes, de carbures, ou de
5 particules de diamant. Les particules sont maintenues sur le fil par une couche de liaison. Cependant, un tel fil reste difficile et onéreux à produire.

L'invention vise à fournir un fil à scier qui permette un bon entraînement de l'abrasif, une grande vitesse de défilement, qui soit
10 résistant tout en restant peu onéreux à produire. Elle vise également à fournir un procédé de fabrication d'un tel fil à scier et une installation mettant en œuvre ce procédé.

Description de l'invention

Avec ces objectifs en vue, l'invention a pour objet un fil à scier
15 métallique monofilament pour une scie à fil, ledit fil à scier étant constitué d'un fil métallique d'un diamètre D et comportant des ondulations hélicoïdales d'amplitude A et de longueur d'onde B , caractérisé en ce que la longueur d'onde B est inférieure à 10 000 fois le produit $A \times D$ de l'amplitude et du diamètre et l'amplitude A est comprise entre 0,010 et
20 0,400 fois le diamètre D , l'amplitude étant mesurée par projection de profil, les valeurs étant exprimées en millimètres.

L'amplitude du fil est mesurée par projection de profil, de manière à effectuer la mesure sans influencer ladite amplitude. Avec de telles caractéristiques le fil à scier permet d'obtenir un bon effet d'entraînement
25 de l'abrasif. L'effet de sciage ainsi obtenu est largement amélioré par rapport au fil lisse et rectiligne. De plus, les caractéristiques d'élongation sont peu affectées par les ondulations et le risque de bouclage pendant le processus de sciage est faible. Du fait de la forme en hélice, un espace est ménagé entre le fil et l'enveloppe du fil qui est nommé une chambre
30 d'entraînement. La chambre d'entraînement s'étend sur un pas

d'ondulation et sur une hauteur ayant pour valeur l'amplitude de l'ondulation. La chambre d'entraînement sert de réserve pour l'abrasif qui est ainsi entraîné lors de l'opération de sciage. Elle permet également de recevoir la matière abrasée et de l'évacuer hors de la zone de sciage. On

5 constate que l'abrasif roule moins entre le fil et la pièce et que sa vitesse de déplacement est plus proche de celle du fil, ce qui explique l'augmentation de l'efficacité du sciage. On a pu constater une augmentation de la vitesse de sciage de 70% par rapport au sciage avec un fil à scier lisse et droit. De plus, comme l'abrasif se déplace moins vite

10 par rapport au fil, le fil s'use moins vite, ce qui lui permet de traiter une plus grande longueur de matériau à scier ou autorise plusieurs passages. Un autre effet avantageux du fil est qu'il permet de couper des pièces d'une plus grande largeur, car le matériau abrasé est mieux évacué et le risque de blocage du fil par ce matériau dans le bloc à scier est diminué. On a

15 constaté également une diminution de la consommation de pâte abrasive, du fait que celle-ci est mieux entraînée et reste plus longtemps en contact avec les surfaces à couper.

Comme les ondulations sont uniformes, le fil conserve globalement sa rectitude, de telle sorte que le fil reste droit pendant le processus de

20 sciage. On constate également une meilleure stabilité du fil lors de l'entrée en contact avec la surface à scier, comme on le verra mieux par la suite, ce qui diminue la variation d'épaisseur des wafers.

De manière particulière, l'amplitude A est comprise entre 0,07 et 0,40 fois le diamètre D . Ce facteur influe directement les caractéristiques

25 d'allongement du fil, en maintenant une faible propension à l'allongement. Il est cependant suffisant pour permettre l'entraînement des particules d'abrasif et de matériau abrasé. Ces valeurs peuvent correspondre à des valeurs d'amplitude de 0,01 à 0,15 lorsque les mesures sont faites avec un micromètre. On réalise par exemple ce type de mesure sur des diamètres

30 supérieurs ou égaux à 250 μm . Par exemple, pour un fil de diamètre 0,25 mm, l'amplitude des ondulations est comprise préférentiellement entre

4 et 25 μm quand elle est mesurée avec un micromètre, et entre 21 et 100 μm quand elle est mesurée avec un projecteur de profil.

Selon un choix particulier, la longueur d'onde B est inférieure à 2 800 fois le produit A x D de l'amplitude et du diamètre, les valeurs étant
5 exprimées en millimètres. Ces valeurs ont montrés une grande efficacité du sciage, celle-ci augmentant avec la diminution de B en deçà de ce seuil.

Selon une caractéristique préférentielle, la longueur d'onde des ondulations est inférieure à 8 mm. Une telle caractéristique a une influence favorable sur le risque de bouclage du fil pendant l'opération de sciage.

10 A titre d'exemple, le diamètre D du fil est compris entre 0,08 mm et 0,50 mm. Ces valeurs sont adaptées à de nombreuses applications, en particulier au sciage de wafers en silicium. Les valeurs les plus fréquentes sont comprises entre 0,12 et 0,30 mm. Cependant, les fils d'autres diamètres peuvent présenter les caractéristiques de l'invention avec les
15 mêmes avantages.

Selon une caractéristique complémentaire, le fil à scier comporte un revêtement de matériau abrasif. Un tel fil n'a pas d'abrasif à entraîner. Par contre, les chambres d'entraînement sont utiles pour évacuer la matière abrasée. Le matériau abrasif peut être une poudre de diamant.

20 Selon une caractéristique particulière du fil à scier, la section du fil est non circulaire. On dispose ainsi d'un moyen supplémentaire pour former une chambre d'entraînement. En effet, la partie la plus grande de la section détermine la position du fil dans la rainure de sciage, de telle sorte que la partie la plus petite est plus éloignée de la rainure et ménage un
25 espace plus grand pour la chambre d'entraînement.

De manière particulière, le rapport d'une plus petite dimension de la section du fil et d'un diamètre d'enveloppe de la section est compris entre 0,9 et 0,995. Bien que l'écart entre les deux dimensions extrêmes de la section soit faible, on constate une amélioration de l'efficacité du sciage,
30 tout en conservant une bonne résistance du fil, ce qui permet de maintenir les conditions de sciage, en particulier au niveau de la tension du fil.

L'invention a aussi pour objet une méthode de fabrication d'un fil à scier tel que décrit précédemment, caractérisée en ce qu'on fait défiler le fil sous tension d'un premier guide vers un deuxième guide, on applique des vibrations à la partie du fil entre les deux guides, les vibrations étant
5 tournantes par rapport à la section du fil au niveau du premier guide, de telle sorte que les vibrations induisent des déformations permanentes au fil sous forme d'ondulations sensiblement hélicoïdales.

Ce procédé permet d'obtenir des ondulations avec l'amplitude et la longueur d'onde souhaitée. De plus, on constate que la cadence de
10 production est plus intéressante que celle du fil ondulé par les méthodes exposées dans les documents [2] et [3]. La fabrication peut être faite sur une installation spécifique, en déroulant une bobine de fil lisse et rectiligne, ou directement en reprenant le fil à la sortie d'une filière de tréfilage, sans imposer de réduction de cadence.

15 Selon un premier mode de réalisation, on applique les vibrations sur le fil en soufflant un jet d'air sur le fil. Un tel jet est suffisamment efficace pour mettre en vibration le fil tendu entre les guides. La fréquence des oscillations est proche de la fréquence de résonance déterminée par la masse linéique du fil, sa tension et la distance entre les guides. Le jet d'air
20 est de préférence continu, mais il peut aussi être modulé. De plus, les vibrations sont tournantes, c'est-à-dire que le fil n'oscille pas dans un plan particulier, mais décrit une trajectoire elliptique ou circulaire centrée sur l'axe défini par les guides. La forme des vibrations et leur amplitude peuvent être modulées en particulier par l'orientation et la position du jet
25 d'air relativement au fil.

Selon d'autres modes de réalisation, détaillés ci-après, on entraîne le fil en rotation sur lui-même par la rotation du deuxième guide, le premier guide étant fixe. Ainsi, même si les vibrations sont dans un plan, l'effet des déformations s'applique de manière tournante sur le fil qui prend dès lors
30 des ondulations hélicoïdales.

Plus précisément, selon un deuxième mode de réalisation, on applique des vibrations au fil par un flasque d'excitation comportant au moins une bosse, le flasque étant monté rotatif de manière à ce que la bosse s'engage avec le fil à chaque tour du flasque. Les vibrations du fil
5 sont créées mécaniquement par le flasque qui repousse et relâche régulièrement le fil. Dans ce cas également, la fréquence des oscillations est proche de la fréquence de résonance déterminée par la masse linéique du fil, sa tension et la distance entre les guides. Le flasque peut comporter plusieurs bosses, en étant par exemple de forme polygonale, telle qu'une
10 forme triangulaire, carrée ou hexagonale.

Selon un troisième mode de réalisation, on applique les vibrations par l'intermédiaire d'un troisième guide placé entre le premier et le deuxième guide et monté oscillant dans un plan perpendiculaire au fil. Le fil est directement entraîné dans ses vibrations par le troisième guide.

15 Selon une option du troisième mode de réalisation, le troisième guide est une filière de tréfilage. Dans ce cas, le premier guide est aussi une filière de tréfilage et le troisième guide est la dernière filière de l'opération de tréfilage. Les déformations du fil sont induites à la fois à la sortie du premier et du troisième guide.

20 De manière complémentaire, la filière de tréfilage est rotative autour de son axe de tréfilage. Ce mouvement implique une répartition circulaire des ondulations du fil.

Selon un quatrième mode de réalisation, sans rotation du deuxième guide, les ondulations du fil sont générées par une bague placée entre le
25 premier et le deuxième guide, la bague comportant un passage pour le fil et étant entraînée en rotation autour d'un axe parallèle et décalé par rapport au passage. Le passage étant excentré par rapport à l'axe de rotation, des oscillations tournantes sont imposées au fil, lesquelles se répercutent jusqu'au premier guide. On constate que les déformations
30 imposées ainsi au fil lui confèrent une forme très proche d'une spirale.

L'invention a aussi pour objet une installation de fabrication d'un fil tel que décrit précédemment, caractérisée en ce qu'elle comporte un premier guide et un deuxième guide pour guider un fil sous tension entre eux, des moyens d'entraînement du fil entre les guides et des moyens d'excitation
5 pour faire vibrer le fil entre les deux guides.

D'une manière particulière, le premier guide est une filière ajustée au diamètre du fil. Cette filière peut être la dernière d'une installation de tréfilage. Ainsi, l'installation selon l'invention est une simple station supplémentaire à une installation de tréfilage.

10 Selon une disposition constructive, les moyens d'entraînement comportent un cabestan pour tirer le fil après son passage dans le deuxième guide. Le fil est ainsi tiré à travers les guides.

L'invention a aussi pour objet un procédé de sciage d'un matériau selon lequel on déplace un fil à scier sous tension contre le matériau,
15 caractérisé en ce que le fil à scier est un fil à scier tel que défini précédemment.

Brève description des figures

L'invention sera mieux comprise et d'autres particularités et avantages apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, la description faisant référence aux dessins annexés parmi lesquels :
20

- la figure 1 représente une vue de dessus d'un fil à scier conforme à un mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 2 est une vue en coupe selon la ligne II-II de la figure 1 ;
- la figure 3 est une vue schématique d'une installation pour fabriquer
25 le fil à scier conforme à l'invention selon un premier mode de réalisation ;
- la figure 4 est une vue du détail IV de la figure 3 ;
- la figure 5 est une vue similaire à la figure 3 d'une installation selon un deuxième mode de réalisation ;
- 30 - la figure 6 est une vue du détail VI de la figure 5 ;

- la figure 7 est une vue similaire à la figure 3 d'une installation selon un troisième mode de réalisation ;
- la figure 8 est une vue du détail VIII de la figure 7 ;
- la figure 9 est une vue similaire à la figure 3 d'une installation selon un quatrième mode de réalisation ;
- 5 - la figure 10 est une vue du détail X de la figure 9 ;
- la figure 11 est une vue de face d'une bague utilisée dans l'installation de la figure 9 ;
- la figure 12 est une vue illustrant un procédé de sciage à fil selon l'art antérieur, en section perpendiculaire à l'axe des fils ;
- 10 - la figure 13 est une coupe selon la ligne XIII-XIII de la figure 12 ;
- la figure 14 est une vue similaire à la figure 9 illustrant un procédé de sciage avec un fil à scier selon l'invention ;
- la figure 15 est une coupe selon la ligne XV-XV de la figure 14 ;
- 15 - la figure 16 est une vue illustrant le procédé de sciage à fil selon l'art antérieur dans une phase de début de sciage ;
- la figure 17 est une vue similaire à la figure 16 illustrant le procédé de sciage avec le fil à scier selon l'invention ;
- la figure 18 est un diagramme montrant des résultats d'essais avec des fils à scier présentant différentes longueurs d'onde d'ondulations ;
- 20 - la figure 19 est une vue d'un projecteur de profil utilisé pour mesurer les caractéristiques d'un fil conforme à l'invention ;
- la figure 20 est un diagramme d'une série de mesures sur un échantillon qui représente le diamètre du fil et le diamètre plus l'amplitude en fonction de la position angulaire, dans un diagramme polaire ;
- 25 - la figure 21 est une vue d'un fil selon une variante de réalisation ;
- la figure 22 est une section selon la ligne XXII-XXII de la figure 21 ;
- 30 - la figure 23 est une vue similaire à la figure 10 d'une installation selon un cinquième mode de réalisation.

DESCRIPTION DETAILLEE

Un fil à scier 10 conforme à un mode de réalisation de l'invention est montré sur les figures 1 et 2. Le fil à scier 10 a une section circulaire constante sur toute sa longueur qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres.

- 5 Le fil à scier 10 comporte des ondulations 104 hélicoïdales de faible amplitude et régulières. Sur la figure 1, seule une petite partie du fil à scier 10 a été représentée, en exagérant l'amplitude des ondulations 104. La figure 2 montre le fil à scier 10 en section, dans laquelle le cercle extérieur montre l'enveloppe 101 virtuelle dans laquelle le fil s'inscrit, et le cercle en
- 10 traits mixtes 102 montre le lieu des centres des sections du fil le long de sa longueur. Le fil à scier 10 a un diamètre nommé D . L'amplitude des ondulations 104 est notée A tandis que leur longueur d'onde est notée B . On constate que le diamètre de l'enveloppe vaut $A+D$. On constate également que l'amplitude des ondulations 104, correspondant au
- 15 diamètre du cercle en traits mixtes correspond également à un espace libre entre l'enveloppe 101 dans laquelle le fil s'inscrit et la section du fil. Par la suite, cet espace est appelé chambre d'entraînement 103.

Le fil à scier 10 est réalisé de préférence en acier à haute résistance.

- Dans un mode de réalisation non représenté, le fil comporte en outre
- 20 un revêtement incluant de la poudre d'un matériau d'abrasif.

- Selon un premier mode de réalisation de l'invention, une installation
- 20, telle que montrée sur les figures 3 et 4 comporte un premier guide 201 et un deuxième guide 202 pour guider un fil sous tension entre eux, des moyens d'entraînement 203 du fil entre les guides 201, 202 et des moyens
- 25 d'excitation 30 pour faire vibrer le fil entre les deux guides 201, 202. Le premier guide 201 est une filière ajustée au diamètre du fil. Les moyens d'entraînement comportent un cabestan 203 sur lequel le fil passe après son passage dans le deuxième guide 202. L'installation comporte également un dévidoir 204 qui reçoit une bobine de fil lisse et un enrouleur
- 30 205 pour recevoir le fil à scier 10 et l'enrouler sur une bobine réceptrice.

Dans le premier mode de réalisation, les moyens d'excitation 30 permettent de générer un jet d'air sur le fil. Pour cela, une source d'air sous pression telle qu'un compresseur 301 envoie de l'air à une buse 302 qui est placée sur la trajectoire du fil, entre les deux guides 201, 202.

5 Lors du fonctionnement de l'installation, un fil lisse est installé sur la bobine du dévidoir, il est introduit dans le premier puis le deuxième guide 202, passe sur le cabestan et finalement est enroulé sur la bobine réceptrice. Le fil reçoit une tension conférée par le cabestan et par le premier guide 201 qui agit comme un frein pour le fil. L'air qui est soufflé
10 par la buse 302 sur le fil crée des vibrations qui sont sensiblement tournantes, c'est-à-dire que la section du fil vue dans un plan de coupe à une distance prédéterminée des guides 201, 202 parcourt sensiblement un cercle. Le fil est considéré comme encastré dans le premier guide 201 et les vibrations du brin situé entre les guides 201, 202 déforment localement
15 le fil de manière permanente. Comme le fil avance continuellement, la déformation est imposée dans des directions qui évoluent lors des vibrations du brin entre les guides 201, 202. On constate que la forme obtenue est celle décrite précédemment, à savoir des ondulations 104 de forme hélicoïdale. La fréquence des oscillations peut être réglée en
20 ajustant la tension du fil et en modifiant la distance entre les guides 201, 202, à la manière de la corde d'un instrument de musique. La longueur d'onde des ondulations 104 sur le fil est fonction de cette fréquence et de la vitesse de défilement du fil.

Une installation 20' selon un deuxième mode de réalisation de
25 l'invention est montrée sur les figures 5 et 6. Ce mode de réalisation diffère du premier mode en ce que les moyens d'excitation 30' sont différents et en ce que le deuxième guide 202' est entraîné en rotation autour de l'axe du fil. Les moyens d'excitation 30' comportent un flasque 303 monté rotatif et comportant une pluralité de bosses 3030. En l'occurrence, les bosses
30 sont les sommets 3030 du flasque 303 de forme hexagonale.

En fonctionnement, lorsque le fil passe entre les guides 201, 202', le flasque tourne et les sommets 3030 du flasque 303 s'engagent avec le fil de manière à le faire vibrer. Dans le même temps, le deuxième guide 202' impose une rotation du fil sur lui-même. On constate que les vibrations
5 imposées au fil ainsi que la rotation du fil sur lui-même créent les déformations du fil au sortir du premier guide 201 de la forme telle que décrite précédemment.

Une installation 20'' selon un troisième mode de réalisation de l'invention est montrée sur les figures 7 et 8. Ce mode de réalisation diffère
10 du premier mode en ce que les moyens d'excitation 30'' sont différents et aussi en ce que le deuxième guide 202'' est entraîné en rotation autour de l'axe du fil. Les moyens d'excitation 30'' comportent un troisième guide 304 placé entre le premier et le deuxième guide 201, 202'' et monté oscillant dans un plan perpendiculaire au fil.

En fonctionnement, lorsque le fil passe entre les guides 201, 202'', le
15 troisième guide impose des vibrations au brin entre le premier et le deuxième guide 202''. Dans le même temps, le deuxième guide 202'' impose une rotation du fil sur lui-même. On constate que les vibrations imposées au fil ainsi que la rotation du fil sur lui-même créent les
20 déformations du fil au sortir du premier guide 201 de la forme telle que décrite précédemment.

Dans une variante du troisième mode de réalisation, non représentée, le troisième guide est la dernière filière d'une installation de tréfilage, le premier guide étant l'avant-dernière filière. On optimise ainsi le
25 procédé de tréfilage en combinant à la fois les étapes de tréfilage et celle d'ondulation du fil. En complément, on peut également entraîner le troisième guide 304 en rotation autour de son axe de filage, afin de s'assurer de la répartition circulaire des ondulations.

Selon un quatrième mode de réalisation d'une installation selon
30 l'invention, représenté sur les figures 9 à 11, le deuxième guide 202 est fixe. Les moyens d'excitation 30''' comportent une bague 305 placée entre

le premier et le deuxième guide 201, 202. La bague 305 comporte un passage 3050 pour passer le fil. La bague est montée rotative autour d'un axe « y » décalé par rapport au passage 3050, comme le montre la vue de face de la bague sur la figure 11. Ainsi, la rotation de la bague 305 impose
5 des vibrations circulaires au fil 10, lesquelles entraînent des déformations hélicoïdales au fil 10. Ce mode de réalisation est considéré comme le mode préféré par la demanderesse.

Lors de l'utilisation d'un fil à scier 10 selon l'invention dans une opération de découpe d'un bloc 12 de matériau dur, on fait défiler le fil à
10 scier 10 de la même manière que selon l'art antérieur, avec l'alimentation en pâte abrasive, comme le montre la figure 14. Comme l'illustre la figure 15, les grains d'abrasif 13 ont tendance à être bloqués dans la chambre d'entraînement 103, ce qui les entraîne sensiblement à la vitesse de déplacement du fil à scier 10. L'efficacité du travail d'érosion, pour une
15 même vitesse de fil, est grandement améliorée.

On constate par ailleurs que l'entrée en contact entre le fil à scier 10 à la surface du bloc 12 à découper est plus stable et présente moins d'oscillations, de telle sorte qu'aucun congé n'est créé entre les rainures 14 et la surface du bloc, comme le montre la figure 17. La variation de
20 l'épaisseur des wafers ainsi réalisés est diminuée.

Si on souhaite réaliser un fil avec un revêtement de matériau abrasif, le revêtement est déposé de préférence après la réalisation des ondulations 104.

Exemples :

25 Des essais de fabrication ont été réalisés. Un fil à scier a été réalisé à partir d'un fil de diamètre 0,120 mm. Des ondulations ont été obtenues avec une amplitude mesurée par projection de profil variant de 0,006 à 0,125 mm. Sur l'installation 20 selon le premier mode de réalisation, le pas d'ondulation était de 6 mm. Sur l'installation 20' selon le deuxième mode

de réalisation, le pas d'ondulation B était de 10 mm. Sur l'installation 20" selon le troisième mode de réalisation, le pas d'ondulation B était de 8 mm.

Pour effectuer les mesures d'amplitude, on a utilisé un projecteur de profil 5 dans le champ optique duquel le fil à scier 10 a été monté. Pour monter le fil, on utilise un montage, comme montré sur la figure 19, comportant deux mandrins 51, 52 se faisant face et entre les mors desquels le fil 10 est pincé. L'un des mandrins 52 est monté coulissant et le fil 10 est mis sous tension par un contrepoids 53 de x g tendant à éloigner les mandrins 51, 52 l'un de l'autre. Le contrepoids permet de maintenir le fil 10 globalement rectiligne sans influencer sur l'amplitude des ondulations. Les mandrins 51, 52 sont montés rotatifs de manière à régler la position angulaire du fil autour de son axe X. Ainsi, on peut mesurer directement l'amplitude A d'une ondulation sur l'écran de projection 54 du projecteur 5 en divisant la mesure par le facteur de grossissement qui est par exemple de 100. De plus, on peut mesurer cette amplitude A à différentes positions angulaires du fil autour de son axe. L'ensemble des mandrins 51, 52 est également monté mobile sur une table à mouvements croisés. La figure 20 montre une représentation graphique d'une série de mesures sur un échantillon qui représente le diamètre du fil et le diamètre plus l'amplitude (D+A) en fonction de la position angulaire, dans un diagramme polaire. On constate que la variation de l'amplitude A est faible en fonction de la position angulaire. On en conclut que la forme du fil est très proche d'une hélice. Avec la table à mouvements croisés, on peut également mesurer la longueur d'onde, par exemple en déplaçant le fil pour décaler le fil d'une onde dans le champ de l'objectif 55 du projecteur.

D'autres méthodes de mesure de l'amplitude ont été essayées. Cependant, la méthode de projection du profil est préférée. En effet, on a essayé de mesurer l'amplitude à l'aide d'un micromètre (appelé aussi palmer). Cependant, on constate que la pression des touches modifie de manière très sensible la géométrie du fil, ce qui fausse la mesure.

Des essais de découpe ont été conduits avec des fils de différentes caractéristiques. Les valeurs de ces caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 1.

Echantillon	Diamètre D (mm)	Amplitude A (mm)	Longueur d'onde B (mm)	B/(AxD)
Fil lisse (référence)	0,120	0	-	-
E 2	0,120	0,024	2	694
E 4	0,120	0,024	4	1389
E 6	0,120	0,024	6	2083
E 8	0,120	0,024	8	2778
E 10	0,120	0,024	10	3472

5

Tableau 1

Les essais ont été conduits pour la découpe d'un bloc de silicium polycristallin de section 120 x 120 mm ayant une longueur de 1000 mm. Les résultats des essais sont montrés sur la figure 18. Le graphique montre la surface coupée en fonction d'un nombre représentatif de la longueur de fil qui a passé dans la rainure. On constate que tous les fils à scier selon l'invention sont plus efficaces qu'un fil à scier lisse. De plus, l'efficacité augmente avec la diminution de la longueur d'onde des ondulations. Le temps requis pour couper le bloc peut être réduit de plus de 60% par rapport au temps de référence avec un fil lisse.

La vitesse de défilement du fil lisse était limitée à 800 m/min pour éviter le risque de bouclage, même si la limite couramment utilisée est de 600 m/min. Avec le fil selon l'invention, une vitesse de 1500 m/min a été obtenue avec un déroulement stable.

On considère donc que la longueur d'onde des ondulations 104 du fil à scier 10 doit être de préférence inférieure à 2 800 fois le produit A x D, les valeurs étant exprimées en millimètres. Dans ces exemples, le rapport A/D est de 1/5. Cette valeur comprise est dans la fourchette 0,01 à 0,40, et aussi dans la fourchette 0,07 à 0,40.

Dans une variante de réalisation du fil à scier 10', montré sur les figures 21 et 22, la section du fil 10' n'est pas constante. Elle comporte dans l'exemple représenté deux méplats 105 parallèles et opposés l'un à l'autre. En notant D la dimension maximale de la section du fil 10' et d la distance entre les méplats 105, ce qui correspond également à la plus petite dimension de la section, on choisit les dimensions dans un rapport d/D compris entre 0,9 et 0,995.

Pour fabriquer un tel fil 10', on utilise une installation selon un cinquième mode de réalisation de l'invention, montrée sur la figure 23, qui est une variante de l'installation selon le quatrième mode de réalisation. Un laminoir 4 est installé après le premier guide 201. Le laminoir 4 comporte deux rouleaux 41, 42 à axes de rotation parallèles et qui serrent le fil 10' entre eux de manière à former les deux méplats 105 par déformation du fil. Le fil 10' subit les vibrations à la sortie du laminoir 4, les vibrations étant imposées par la bague 305.

L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation qui viennent d'être décrits à titre d'exemple uniquement. L'installation peut être placée directement à la sortie d'une installation de tréfilage, de telle sorte que le dévidoir n'est pas nécessaire et que les moyens d'entraînement sont communs aux deux installations. Le premier guide peut même être dans ce cas l'une des filières de l'installation de tréfilage. Le cabestan pourrait jouer le rôle du deuxième guide s'il est suffisamment proche des moyens d'excitation.

Listes des références

[1] WO 90/12670 A1, publié le 1/11/1990

[2] EP 1 827 745 A1, publié le 5/09/2007

[3] JP 12-89527, publié le 21/11/1989

5 [4] JP 2004-276207 A, publié le 07/10/2004

REVENDICATIONS

1. Fil à scier métallique monofilament pour une scie à fil, ledit fil à
5 scier (10) étant constitué d'un fil métallique d'un diamètre D et comportant
des ondulations (104) hélicoïdales d'amplitude A et de longueur d'onde B,
caractérisé en ce que la longueur d'onde B est inférieure à 10 000 fois le
produit A x D de l'amplitude et du diamètre et l'amplitude A est comprise
entre 0,010 et 0,400 fois le diamètre D, l'amplitude étant mesurée par
10 projection de profil, les valeurs étant exprimées en millimètres.
2. Fil à scier selon la revendication 1, dans lequel l'amplitude A est
comprise entre 0,070 et 0,400 fois le diamètre D.
3. Fil à scier selon la revendication 1, dans lequel l'amplitude A est
comprise entre 0,010 et 0,150 fois le diamètre D.
- 15 4. Fil à scier selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel la
longueur d'onde B est inférieure à 2 800 fois le produit A x D de l'amplitude
et du diamètre.
5. Fil à scier selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel le
diamètre D est compris entre 0,08 mm et 0,50 mm.
- 20 6. Fil à scier selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en
ce qu'il comporte un revêtement de matériau abrasif.
7. Fil à scier selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel la
section du fil est non circulaire.
8. Fil à scier selon la revendication 7, dans lequel le rapport d'une
25 plus petite dimension de la section du fil et d'un diamètre d'enveloppe de la
section est compris entre 0,9 et 0,995.
9. Méthode de fabrication d'un fil à scier (10) selon l'une des
revendications 1 à 8, caractérisée en ce qu'on fait défiler le fil sous tension
d'un premier guide (201) vers un deuxième guide (202), on applique des

vibrations à la partie du fil entre les deux guides (201, 202), les vibrations étant tournantes par rapport à la section du fil au niveau du premier guide (201), de telle sorte que les vibrations induisent des déformations permanentes au fil sous forme d'ondulations (104) sensiblement
5 hélicoïdales.

10. Méthode selon la revendication 9, selon laquelle on applique les vibrations sur le fil en soufflant un jet d'air sur le fil.

11. Méthode selon la revendication 9, selon laquelle on entraîne le fil en rotation sur lui-même par la rotation du deuxième guide (202', 202"),
10 le premier guide (201) étant fixe.

12. Méthode selon la revendication 11, selon laquelle on applique des vibrations au fil par un flasque (303) d'excitation comportant au moins une bosse (3030), le flasque (303) étant monté rotatif de manière à ce que la bosse (3030) s'engage avec le fil à chaque tour du flasque (303).

15 13. Méthode selon la revendication 11, selon laquelle on applique les vibrations par l'intermédiaire d'un troisième guide (304) placé entre le premier et le deuxième guide (201, 202") et monté oscillant dans un plan perpendiculaire au fil.

14. Méthode selon la revendication 13, selon laquelle le troisième
20 guide (304) est une filière de tréfilage.

15. Méthode selon la revendication 14, selon laquelle la filière de tréfilage (304) est rotative autour de son axe de tréfilage.

16. Méthode selon la revendication 9, selon laquelle les vibrations du fil sont générées par une bague (305) placée entre le premier et le
25 deuxième guide (201, 202), la bague (305) comportant un passage (3050) pour le fil (10) et étant entraînée en rotation autour d'un axe (y) parallèle et décalé par rapport au passage (3050).

17. Installation de fabrication d'un fil selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisée en ce qu'elle comporte un premier guide (201) et un

deuxième guide (202) pour guider un fil sous tension entre eux, des moyens d'entraînement (203) du fil entre les guides (201, 202) et des moyens d'excitation (30) pour faire vibrer le fil entre les deux guides (201, 202).

- 5 18. Installation selon la revendication 17, dans laquelle le premier guide (201) est une filière ajustée au diamètre du fil.

19. Installation selon la revendication 17, dans laquelle les moyens d'entraînement comportent un cabestan pour tirer le fil après son passage dans le deuxième guide (202).

- 10 20. Procédé de sciage d'un matériau selon lequel on déplace un fil à scier (10) sous tension contre le matériau, caractérisé en ce que le fil à scier (10) est un fil à scier (10) selon l'une des revendications 1 à 8.