

Description

Titre de l'invention : PROCEDE D'AMINCISSEMENT DE LA COUCHE SUPERFICIELLE D'UN SUBSTRAT SOI DOMAINE DE L'INVENTION

- [0001] La présente invention concerne le domaine des semi-conducteurs et en particulier des substrats SOI (Silicium sur isolant). L'invention porte sur un procédé d'amincissement de la couche superficielle d'un substrat SOI dans un équipement de traitement chimique monoplaque, optimisé pour atteindre une non-uniformité de la couche superficielle inférieure ou égale à $\pm 0,4\text{nm}$.
- [0002] ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION
- [0003] De plus en plus d'applications basées sur des substrats SOI requièrent de très bonnes uniformités d'épaisseur de la couche superficielle de silicium (également appelée couche active par la suite). Par exemple, dans les applications digitales, la couche active des substrats FDSOI (« Fully depleted SOI ») doit présenter de très faibles variations d'épaisseur car ces dernières impactent la tension de seuil des transistors élaborés dans et/ou sur la couche active ; dans les applications photoniques, les performances des dispositifs de type filtres ou modulateurs sont également fortement influencées par les non-uniformités d'épaisseur de la couche active du substrat SOI.
- [0004] Les spécifications en termes d'épaisseur et d'uniformité deviennent donc très agressives : on attend pour des couches actives d'épaisseurs typiquement inférieures à 50nm, des non-uniformités sur plaque (WiW pour « within wafer ») et entre plaques (WtW pour « wafer to wafer ») typiquement inférieures à $\pm 0,4\text{nm}$, c'est-à-dire que tous les points mesurés de la couche se trouvent à $\pm 0,4\text{nm}$ de son épaisseur moyenne, en considérant une zone d'exclusion périphérique de quelques mm. De telles uniformités sont difficiles à atteindre car la succession d'étapes de fabrication du substrat SOI empile les contributions à la non-uniformité de la couche superficielle.
- [0005] Une solution connue pour corriger les non-uniformités d'épaisseur de la couche active est de réaliser une gravure localisée de ladite couche, par des procédés de gravure plasma (« plasma etch ») comme décrit par exemple dans le document US20140234992, ou par des procédés de gravure par faisceau d'ions (« cluster ion beam etch ») comme décrit notamment dans le document WO2013003745. Ce type de solutions présente néanmoins un inconvénient : la gravure de la surface de la couche active crée une couche superficielle de silicium amorphe susceptible de générer des problèmes électriques et qui doit donc être retirée. Le retrait de la couche amorphe mène à une augmentation de la rugosité de surface, laquelle dégrade les performances du dispositif élaboré sur la couche active.

- [0006] Le document WO2004015759 propose une solution alternative, mettant en œuvre une oxydation thermique sacrificielle localisée, consommant ponctuellement une épaisseur plus ou moins importante de la couche active, de manière à corriger ses non-uniformités d'épaisseur. L'inconvénient de cette approche est qu'un gradient de température local n'est pas facile à introduire dans une couche de silicium : la résolution de la correction de non-uniformités peut donc être limitée.
- [0007] Le document WO2013175278 vise également à améliorer l'uniformité d'épaisseur de la couche superficielle d'un substrat SOI, en mettant en œuvre une solution de gravure chimique de type SC1 : la quantité de solution dispensée, la durée d'application et/ou la température sont ajustées en fonction de l'épaisseur de couche à graver.
- [0008] Le document EP3200219 décrit une solution d'amincissement de la couche active d'un substrat SOI, dans un équipement de gravure monoplaque, procurant une non-uniformité sur plaque de l'ordre de $\pm 0,5\text{nm}$.
- [0009] Il demeure intéressant d'améliorer les procédés d'amincissement de la couche active d'un substrat SOI, pour assurer d'excellentes uniformités d'épaisseur (meilleures que $\pm 0,5\text{nm}$, voire que $\pm 0,4\text{nm}$), pour des épaisseurs très faibles et pour des diamètres de substrat SOI d'au moins 200mm, voire 300mm.
- [0010] OBJET DE L'INVENTION
- [0011] La présente invention vise d'améliorer l'uniformité de la couche superficielle d'un substrat SOI, sans dégrader les performances de ladite couche (rugosité et défektivité), et de proposer une solution industrielle tant en termes de fiabilité que de coûts. Elle concerne en particulier un procédé d'amincissement de la couche superficielle d'un substrat SOI dans un équipement de traitement chimique monoplaque, optimisé pour atteindre une non-uniformité de la couche superficielle inférieure ou égale à $\pm 0,4\text{nm}$, avec un rendement au moins égal à 90%.
- [0012] BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION
- [0013] L'invention concerne un procédé d'amincissement d'une couche superficielle d'un substrat SOI comprenant :
- [0014] a) une étape de mesure d'épaisseur de la couche superficielle, pour obtenir une épaisseur moyenne et une non-uniformité d'épaisseur de ladite couche,
- [0015] puis les étapes suivantes, effectuées dans un équipement de traitement chimique monoplaque et au cours desquelles le substrat SOI est animé d'un mouvement de rotation :
- [0016] b) l'application de n cycle(s), avec n un nombre entier supérieur ou égal à 1, d'oxydation et de gravure, à une face avant de la couche superficielle, chaque cycle impliquant une dispense d'eau ozonée suivie d'une dispense d'acide fluorhydrique,
- [0017] c) la réalisation d'une gravure inhomogène de la face avant de la couche superficielle, impliquant une dispense d'une solution de gravure du silicium à une

température comprise entre 20°C et 80°C, dans une région centrale de la couche superficielle, pendant un temps donné, dit temps de gravure non uniforme,

[0018] d) la réalisation d'une gravure homogène de la face avant de la couche superficielle, impliquant une dispense d'une solution de gravure du silicium selon un mouvement de balayage allant du bord vers le centre de la couche superficielle et inversement, à une température comprise entre 20°C et 80°C, pendant un temps donné, dit temps de gravure uniforme.

[0019] Connaissant l'épaisseur moyenne et la non-uniformité d'épaisseur de la couche superficielle,

[0020] le nombre de cycle(s), le temps de gravure non uniforme et le temps de gravure uniforme sont déterminés, préalablement à la réalisation des étapes b), c) et d), à partir d'un modèle les liant à une épaisseur moyenne gravée de couche superficielle et à une non-uniformité moyenne de gravure définie par la différence entre une épaisseur moyenne gravée dans une région centrale de la couche superficielle et une épaisseur moyenne gravée dans une région périphérique de la couche superficielle.

[0021] Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- la non-uniformité moyenne de gravure est positive ;
- la région centrale et la région périphérique correspondent respectivement à 30% et 70% de l'aire de la couche superficielle ;
- l'épaisseur moyenne gravée et la non-uniformité moyenne de gravure s'expriment, chacune, sous une forme quadratique, en fonction des variables que sont le nombre de cycle(s), le temps de gravure non uniforme et le temps de gravure uniforme ;
- le modèle pour déterminer le nombre de cycle(s), le temps de gravure non uniforme et le temps de gravure uniforme est un modèle d'optimisation à trois objectifs avec optimalité lexicographique ;
- lesdits objectifs sont :

[0022] (i) identifier un premier ensemble de solutions (temps de gravure non uniforme ; temps de gravure uniforme) permettant d'atteindre l'égalité entre l'épaisseur moyenne gravée de couche superficielle et une épaisseur moyenne à graver visée, pour tout nombre de cycle(s), ladite épaisseur moyenne à graver visée étant définie par différence entre l'épaisseur moyenne visée de la couche superficielle et l'épaisseur moyenne mesurée à l'étape a) ;

[0023] (ii) restreindre le premier ensemble des solutions (temps de gravure non uniforme ; temps de gravure uniforme) identifié à (i), à un deuxième ensemble de solutions (temps de gravure non uniforme ; temps de gravure uniforme) permettant de minimiser la différence entre la non-uniformité moyenne de gravure et une non-uniformité moyenne

de gravure visée, pour tout nombre de cycle(s), la non-uniformité moyenne de gravure visée étant définie par différence entre une non-uniformité d'épaisseur visée de la couche superficielle et la non-uniformité d'épaisseur mesurée à l'étape a),

[0024] (iii) sélectionner une recette parmi le deuxième ensemble de solutions défini à (ii) permettant de maximiser le nombre de cycle(s).

- les étapes b), c) et d) sont effectuées dans l'ordre ;
- la température au cours des étapes c) et d) est fixée à 65°C ;
- à l'étape c), la dispense de la solution de gravure du silicium est faite uniquement au centre, ou selon un mouvement de balayage allant du centre jusqu'à 50% du rayon de la couche superficielle et inversement ;
- la non-uniformité moyenne de gravure dépend d'un gradient de vitesse de gravure défini entre le centre et le bord de la couche superficielle, ledit gradient étant dépendant :

[0025] - d'un débit de la solution de gravure du silicium à l'étape c), et/ou

[0026] - d'une dispense d'une solution en face arrière du substrat SOI durant tout ou partie de l'étape c), et/ou

[0027] - de la température appliquée à l'étape c) ;

- la solution de gravure du silicium, à l'étape c) et/ou à l'étape d), est le SC1.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0028] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée de l'invention qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquelles :

[0029] [Fig.1] La [Fig.1] présente trois exemples de cartographies d'épaisseur de couches superficielles, après des séquences d'amincissement classiques, avant l'implémentation d'un procédé d'amincissement conforme à la présente invention ; l'échelle de niveaux de gris est en angströms sur la figure ;

[0030] [Fig.2a]

[0031] [Fig.2b] La [Fig.2a] et la [Fig.2b] illustrent la non-uniformité des couches superficielles de 25 substrats SOI, avant (Av) et après (Ap) l'implémentation d'un procédé d'amincissement conforme à la présente invention ; la [Fig.2a] présente les déviations en épaisseur (exprimées en Angströms) mesurées par rapport à l'épaisseur moyenne, en fonction du rayon des substrats, et la [Fig.2b] présentent les cartographies empilées des couches superficielles de 25 substrats SOI, avant (Av) et après (Ap) la réalisation des étapes b), c), d) du procédé selon l'invention. Les cartographies sont issues d'une mesure d'épaisseur en 625 points.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0032] La présente invention concerne un procédé d'amincissement de la couche superficielle d'un substrat SOI, formé d'une couche active en silicium monocristallin

de haute qualité, disposée sur une couche d'oxyde de silicium, elle-même disposée sur un substrat support, habituellement en silicium monocristallin.

- [0033] Il existe plusieurs méthodes connues de fabrication d'un tel substrat, parmi lesquelles le procédé Smart Cut™, basé sur une implantation d'espèces légères, pour créer un plan fragile enterré dans un substrat donneur, et sur un collage direct pour assembler le substrat donneur et un substrat support avec une couche diélectrique disposée entre ces deux substrats. Le transfert d'une couche mince du substrat donneur sur le substrat support permet l'obtention du substrat SOI, le reste du substrat donneur pouvant être réutilisé pour une pluralité de transferts ultérieurs.
- [0034] Les substrats donneur et support se présentent préférentiellement chacun sous la forme d'une plaquette circulaire de diamètre 200mm ou 300mm, voire 450mm, et d'épaisseur typiquement comprise entre 500 et 900 microns.
- [0035] Juste après le transfert, la surface libre de la couche mince superficielle présente un niveau de rugosité relativement important (de l'ordre de 4 à 8 nm RMS, mesuré au microscope à force atomique AFM, sur scan de 30 x 30 microns), pour une épaisseur de couche, par exemple, de l'ordre de 250nm. Des techniques de finition de surface doivent alors être mises en œuvre pour guérir la couche et l'amincir jusqu'à une épaisseur visée inférieure ou égale à 50nm, par exemple 20nm, 15nm ou même 10nm. Parmi les techniques de finition, on peut notamment mettre en œuvre des traitements thermiques d'oxydation sacrificielle, de gravure et/ou de reconstruction de surface (lissage) sous atmosphère neutre ou réductrice. Ces traitements sont réalisés en général à hautes températures, par exemple, l'oxydation peut être réalisée entre 750°C et 1100°C environ, et le lissage entre 950°C et 1250°C.
- [0036] Une séquence d'amincissement de finition favorable comporte en particulier :
- une stabilisation, impliquant une oxydation de la surface de la couche superficielle ; la couche d'oxyde sacrificielle étant ensuite retirée par attaque chimique,
 - un lissage thermique de la surface, sous atmosphère neutre ou réductrice,
 - un amincissement par une nouvelle oxydation sacrificielle de la surface de la couche superficielle.
- [0037] Ces étapes sont opérées dans des fours de traitement collectif et, bien que les procédés soient continûment améliorés, les différentes contributions de non-uniformités s'empilent, tendant à générer des couches actives hors spécification.
- [0038] La présente invention propose ainsi un procédé d'amincissement venant compenser au moins en partie une non-uniformité d'épaisseur de la couche superficielle d'un substrat SOI, non-uniformité initiale typiquement inférieure à 15nm, voire inférieure à 10nm. L'amincissement global réalisé par ledit procédé est faible (en général, moins

de 5nm, voire moins de 3nm) : le procédé proposé est donc avantageusement appliqué après une séquence d'amincissement de finition telle que décrite ci-dessus.

- [0039] Le procédé comprend une première étape a) de mesure de l'épaisseur de la couche superficielle pour obtenir une épaisseur moyenne E_{moy} et une non-uniformité d'épaisseur U de ladite couche. La mesure d'épaisseur est faite en une pluralité de points i répartis à la surface de la couche. L'épaisseur moyenne E_{moy} correspond à la moyenne des épaisseurs mesurées en la pluralité de point i ; la non-uniformité d'épaisseur U traduit la distribution des épaisseurs de la couche en la pluralité de points i . Elle est exprimée à partir d'une valeur de déviation d'épaisseur (au point i) par rapport à l'épaisseur moyenne E_{moy} (par exemple, $\pm 0,4\text{nm}$) ; en particulier, une non-uniformité U de $\pm 0,4\text{nm}$ traduit que les épaisseurs de la couche superficielle en la pluralité de points i sont distribuées dans la fourchette $[E_{\text{moy}}-0,4\text{nm} ; E_{\text{moy}}+0,4\text{nm}]$.
- [0040] Le nombre de points i de mesure peut être de l'ordre de 20, 100, 500, voire 1000, et la mesure est préférentiellement faite jusqu'à 3 mm d'un bord périphérique du substrat SOI, sachant que la couche superficielle s'étend en général au moins jusqu'à 0,5mm dudit bord. Les points i pourront être répartis selon une géométrie radiale, en étoile, ou selon une géométrie en colimaçon partant du centre de la couche, ou selon toute autre géométrie capable de traduire efficacement la non-uniformité d'épaisseur de la couche mesurée.
- [0041] Sans que cela soit limitatif, la mesure d'épaisseur de l'étape a) peut être effectuée par des méthodes connues basées sur des techniques d'ellipsométrie ou de réflectométrie, avec ou sans la présence d'une couche d'oxyde sacrificiel sur la couche superficielle en silicium.
- [0042] La [Fig.1] montre trois exemples de cartographies d'épaisseur de couches superficielles, après des séquences d'amincissement de finition classiques, dans des équipements différents. Il apparaît, en général, une non-uniformité radiale, d'amplitude plus ou moins importante (échelle de niveaux de gris en angströms sur la figure), avec une surépaisseur centrale.
- [0043] Les étapes suivantes du procédé selon l'invention permettent donc avantageusement de compenser un profil de couche présentant une surépaisseur centrale. Elles sont effectuées dans un équipement de traitement chimique monoplaque. Un tel équipement est bien connu et comprend notamment un bras de préhension du substrat SOI, une ou plusieurs buses pour dispenser différents types de solutions (chimiques ou eau) sur la face avant du substrat (du côté de la couche superficielle) et/ou sur sa face arrière. Pendant les dispenses de solution, le substrat est animé par un mouvement de rotation pour répartir la solution sur toute la face concernée (typiquement entre 10 et 1000 tours par minutes).

- [0044] Les étapes b), c) et d) qui vont maintenant être décrites, sont opérées dans l'ordre (préférentiel) ou dans le désordre, mais dans tous les cas, à la suite les unes des autres, sans sortie de l'équipement car le procédé selon l'invention ne nécessite pas de mesures d'épaisseur intermédiaires, ce qui est particulièrement avantageux.
- [0045] Notons que, si le substrat SOI comprend une couche d'oxyde sacrificiel sur la couche superficielle de silicium, cette couche d'oxyde est retirée préalablement à l'implémentation des étapes b), c) et d) du procédé.
- [0046] L'étape b) comprend l'application de n cycle(s) d'oxydation et gravure, à la face avant (libre) de la couche superficielle, n étant un nombre entier supérieur ou égal à 1. Chaque cycle implique une dispense d'eau ozonée suivie d'une dispense d'acide fluorhydrique (HF), de manière à successivement oxyder la couche superficielle et graver la couche d'oxyde formée à chaque cycle. L'amincissement de la couche superficielle est de l'ordre de 0,4 à 0,5 nm par cycle. Bien que le nombre de cycle applicable ne soit pas limité, il est préférable d'appliquer entre 1 et 10 cycles, voire avantageusement entre 1 et 5 cycles pour demeurer industriellement viable.
- [0047] Un tel cycle est connu pour le nettoyage de substrat sous l'acronyme « SCROD » (pour « single-wafer spin cleaning with repetitive use of ozonated water and dilute HF » selon la terminologie anglosaxonne).
- [0048] Typiquement, la concentration en ozone dans l'eau ozonée est comprise entre 20 et 40ppm, la concentration massique de la solution HF est comprise entre 0,5% et 4% ; le débit de dispense est de 2 litres par minute. L'étape b) est préférentiellement effectuée à température ambiante. La dispense peut être faite via une buse fixe ou mobile (c'est-à-dire animée d'un mouvement de balayage).
- [0049] Une étape de rinçage de la face arrière du substrat SOI peut être effectuée en parallèle de l'application des cycles précités à la face avant.
- [0050] L'étape c) correspond à la réalisation d'une gravure de la face avant de la couche superficielle, impliquant le dispense d'une solution de gravure du silicium (par exemple, SC1 (« standard clean 1 » selon la terminologie anglosaxonne), TMAH, HF/H₂O₂, HF/O₃, HF/HNO₃ + CH₃COOH, KOH, etc.) dans une région centrale de la couche superficielle. Le fait que la solution ne soit dispensée qu'en région centrale implique une gravure inhomogène de la couche superficielle, se traduisant par une gravure plus importante en région centrale qu'en région périphérique.
- [0051] Une non-uniformité moyenne de gravure u_{grav} est obtenue à l'issue des étapes b), c), d) du procédé, définie par la différence entre une épaisseur moyenne gravée dans une région centrale de la couche superficielle $e_{\text{grav}}^{\text{C}}$ et une épaisseur moyenne gravée dans une région périphérique de la couche superficielle $e_{\text{grav}}^{\text{P}}$. Cette non-uniformité de gravure u_{grav} est positive, de manière à compenser une surépaisseur centrale de la

couche superficielle. Elle est principalement liée à l'étape c), même si les autres étapes sont parfois susceptibles d'ajouter une légère contribution.

- [0052] La dispense à l'étape c) peut être faite uniquement au centre, ou selon un mouvement de balayage allant du centre jusqu'à 30%, 50%, 80%, voire 90% du rayon de la couche superficielle et inversement. Ce faisant, il est possible d'ajuster le profil de la non-uniformité de gravure entre région centrale et région périphérique.
- [0053] La non-uniformité moyenne de gravure u_{grav} dépend d'un gradient de vitesse de gravure défini entre le centre et le bord de la couche superficielle ou entre la région centrale et la région périphérique. Ce gradient est dépendant du débit de la solution de gravure à l'étape c). Il peut également être modulé par la dispense d'une solution en face arrière du substrat SOI durant tout ou partie de l'étape c) ; cette dispense peut notamment modifier la température du substrat localement. Enfin, le gradient de vitesse de gravure dépend de la température appliquée à l'étape c).
- [0054] La dispense de l'étape c) est effectuée à une température comprise entre 20°C et 80°C, par exemple 65°C, pendant un temps donné, dit temps de gravure non uniforme t_{nu} . Le temps de gravure non uniforme t_{nu} peut varier de quelques secondes à quelques centaines de secondes ; en pratique, il est inférieur à 300s, à 250s, voire à 200s, pour remplir des exigences d'efficacité industrielle.
- [0055] L'étape d) correspond à la réalisation d'une gravure de la face avant de la couche superficielle, impliquant une dispense d'une solution de gravure du silicium (par exemple, SC1, TMAH, HF/H₂O₂, HF/O₃, HF/HNO₃ + CH₃COOH, KOH, etc.) selon un mouvement de balayage allant du bord vers le centre de la couche superficielle et inversement ; ce balayage assure une certaine homogénéité de gravure sur toute la surface de la couche.
- [0056] La dispense de l'étape d) est effectuée à une température comprise entre 20°C et 80°C, par exemple 65°C, pendant un temps donné, dit temps de gravure uniforme t_{u} . Le temps de gravure uniforme t_{u} peut varier de quelques secondes à quelques centaines de secondes ; en pratique, il est inférieur à 400s, voire à 300s, également pour des raisons d'efficacité industrielle.
- [0057] Les proportions (ratios volumiques) en hydroxyde d'ammonium (NH₄OH), peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) et eau déionisée du SC1, en tant que solution de gravure du silicium à l'étape c) et à l'étape d), peuvent être choisies de 1/1/40 à 1/1/10, par exemple. Le débit de dispense est typiquement compris entre 1 et 2 litres par minute.
- [0058] Dans le procédé de l'invention, le nombre de cycle(s) n , le temps de gravure non uniforme t_{nu} et le temps de gravure uniforme t_{u} sont déterminés, préalablement à la réalisation des étapes b), c) et d), à partir d'un modèle empirique les liant à une

épaisseur moyenne gravée e_{grav} de couche superficielle et à la non-uniformité moyenne de gravure u_{grav} .

- [0059] On pourra définir par exemple que la région centrale (uniformément répartie autour du centre du substrat) et la région périphérique (concentrique, entourant la région centrale) correspondent respectivement à 30% et 70% de l'aire de la couche superficielle.
- [0060] Ainsi, connaissant l'épaisseur moyenne E_{moy} et la non-uniformité d'épaisseur U de la couche superficielle, après l'étape a), et connaissant l'épaisseur moyenne visée $E_{\text{visée}}$ et la non-uniformité d'épaisseur visée ($U_{\text{visée}}$) de la couche superficielle, il est possible en passant par ce modèle de déterminer les valeurs optimales pour le nombre de cycle(s) n , le temps de gravure non uniforme t_{nu} et le temps de gravure uniforme t_{u} .
- [0061] Il est avantageux d'exprimer, dans le modèle, l'épaisseur moyenne gravée e_{grav} et la non-uniformité moyenne de gravure u_{grav} sous une forme quadratique, en fonction des variables que sont le nombre de cycle(s) n , le temps de gravure non uniforme t_{nu} et le temps de gravure uniforme t_{u} , tel que présenté ci-dessous:
- [0062]
$$e_{\text{grav}}(n, t_{\text{nu}}, t_{\text{u}}) = \alpha_0 + \alpha_1 n^2 + \alpha_2 t_{\text{nu}}^2 + \alpha_3 t_{\text{u}}^2 + \alpha_4 n t_{\text{nu}} + \alpha_5 n t_{\text{u}} + \alpha_6 t_{\text{nu}} t_{\text{u}} + \alpha_7 n + \alpha_8 t_{\text{nu}} + \alpha_9 t_{\text{u}}$$
- [0063]
$$u_{\text{grav}}(n, t_{\text{nu}}, t_{\text{u}}) = \beta_0 + \beta_1 n^2 + \beta_2 t_{\text{nu}}^2 + \beta_3 t_{\text{u}}^2 + \beta_4 n t_{\text{nu}} + \beta_5 n t_{\text{u}} + \beta_6 t_{\text{nu}} t_{\text{u}} + \beta_7 n + \beta_8 t_{\text{nu}} + \beta_9 t_{\text{u}}$$
- [0064] La forme quadratique permet d'atteindre une bonne précision sur la détermination des trois variables, comparativement à une forme linéaire.
- [0065] Les coefficients α_1 à α_9 et β_1 à β_9 sont déterminés empiriquement à partir d'un plan d'expérience et de mesures expérimentales.
- [0066] Un modèle d'optimisation à trois objectifs avec optimalité lexicographique est particulièrement bien adapté pour déterminer successivement chacune des variables. Les objectifs peuvent être définis comme suit :
- (i) identifier un premier ensemble de solutions $S_n^+(t_{\text{nu}}, t_{\text{u}})$ pour le temps de gravure non uniforme t_{nu} et le temps de gravure uniforme t_{u} , permettant d'atteindre l'égalité entre l'épaisseur moyenne gravée e_{grav} de couche superficielle et une épaisseur moyenne à graver visée $e_{\text{visée}}$, pour tout nombre de cycle(s) n , ladite épaisseur moyenne à graver visée $e_{\text{visée}}$ étant définie par différence entre l'épaisseur moyenne visée $E_{\text{visée}}$ de la couche superficielle et l'épaisseur moyenne E_{moy} mesurée à l'étape a) ;
- [0067] (ii) restreindre l'ensemble des solutions $S_n^+(t_{\text{nu}}, t_{\text{u}})$ identifié à (i), à un deuxième ensemble de solutions $S(t_{\text{nu}}, t_{\text{u}})$ pour le temps de gravure non uniforme t_{nu} et le temps de gravure uniforme t_{u} , permettant de minimiser la différence entre la non-uniformité moyenne de gravure u_{grav} et une non-uniformité moyenne de gravure visée $u_{\text{visée}}$, pour tout nombre de cycle(s) n , la non-uniformité moyenne de gravure visée $u_{\text{visée}}$ étant définie par différence entre une non-uniformité d'épaisseur visée $U_{\text{visée}}$ de la couche superficielle et la non-uniformité d'épaisseur U mesurée à l'étape a),

[0068] (iii) sélectionner une recette parmi le deuxième ensemble de solutions $S(t_{nu}, t_u)$ défini à (ii), permettant de maximiser le nombre de cycle(s) (n).

[0069] Le premier objectif (i) vise à résoudre l'équation du second degré Equ3, issue de l'égalité entre l'épaisseur moyenne gravée e_{grav} de couche superficielle et une épaisseur moyenne à graver visée $e_{visée}$, ladite épaisseur moyenne à graver visée $e_{visée}$ étant définie par différence entre l'épaisseur moyenne visée $E_{visée}$ de la couche superficielle et l'épaisseur moyenne E_{moy} mesurée à l'étape a). L'équation Equ3 est exprimée avec le temps de gravure uniforme t_u (temps appliqué à l'étape d) comme variable :

$$[0070] \quad \alpha_3 t_u^2 + (\alpha_5 n + \alpha_6 t_{nu} + \alpha_9) t_u + (\alpha_0 + \alpha_1 n^2 + \alpha_2 t_{nu}^2 + \alpha_4 n t_{nu} + \alpha_7 n + \alpha_8 t_{nu} - e_{visée}) = 0$$

[0071] Le temps de gravure uniforme t_u étant nécessairement positif, la solution de cette équation s'exprime en fonction du temps de gravure non-uniforme t_{nu} (étape c) et du nombre de cycle(s) (étape b) de la manière suivante :

$$[0072] \quad t_u = \frac{-(\alpha_5 n + \alpha_6 t_{nu} + \alpha_9) + \sqrt{\Delta_u(t_{nu}, n)}}{2\alpha_3}$$

[0073] avec

$$[0074] \quad \Delta_u(t_{nu}, n) = (\alpha_5 n + \alpha_6 t_{nu} + \alpha_9)^2 - 4\alpha_3(\alpha_0 + \alpha_1 n^2 + \alpha_2 t_{nu}^2 + \alpha_4 n t_{nu} + \alpha_7 n + \alpha_8 t_{nu} - e_{visée})$$

[0075] A ce stade, il est donc possible de définir un premier ensemble S_n de solutions possibles t_u (temps de gravure uniforme) et t_{nu} (temps de gravure non uniforme), pour chaque n (nombre de cycle(s)) entier :

$$[0076] \quad S_n = \left\{ \left(t_{nu}, t_u = \frac{-(\alpha_5 n + \alpha_6 t_{nu} + \alpha_9) + \sqrt{\Delta_u(t_{nu}, n)}}{2\alpha_3} \right), \forall t_{nu} \in [t_{nu}^{min}, t_{nu}^{max}] \right\}$$

[0077] Le premier ensemble de solutions possibles pour t_u et t_{nu} étant en outre filtré sur des valeurs positives et en fonction de la faisabilité technique de l'équipement, à savoir une précision sur les temps de 1s, donnant ainsi l'ensemble de solutions S_n^+ suivant au terme de la première étape (premier objectif) :

$$[0078] \quad S_n^+ = \{ (t_{nu}, t_u), t_{nu} \geq 0, t_u \geq 0, \forall (t_{nu}, t_u) \in S_n \}$$

[0079] Le deuxième objectif vise à minimiser la différence entre la non-uniformité moyenne de gravure u_{grav} exprimée dans Equ2, et la non-uniformité moyenne de gravure visée $u_{visée}$, définie par la différence entre une non-uniformité d'épaisseur visée $U_{visée}$ de la couche superficielle et la non-uniformité d'épaisseur U mesurée à l'étape a).

[0080] Partant des solutions de l'ensemble S_n^+ retenues à la première étape, seules sont conservées les recettes r_n permettant de minimiser l'erreur sur la non-uniformité de gravure u_{grav} :

$$[0081] \quad r_n = \underset{(t_{nu}, t_u) \in S_n^+}{\operatorname{argmin}} (|u_{grav}(n, t_{nu}, t_u) - u_{visée}|)$$

[0082] Le deuxième ensemble de solutions S au terme de la deuxième étape (deuxième objectif) se traduit donc comme :

[0083] $S = \{r_n \forall n \in [0 \dots N]\}$

[0084] Le troisième objectif vise à minimiser le coût du procédé, ce qui équivaut à maximiser le nombre de cycles n de l'étape b) du procédé, car l'étape b) est la plus efficace en termes d'amincissement.

[0085] La recette parmi les solutions du deuxième ensemble de solutions S proposant le nombre de cycles le plus grand est donc sélectionnée.

[0086] La courbe de tendance Av de la [Fig.2a] illustre la non-uniformité initiale (c'est-à-dire avant l'application du procédé selon l'invention) de couches superficielles de 25 substrats SOI. En particulier, les déviations en épaisseur par rapport à l'épaisseur moyenne, en tout point i mesuré, sur les 25 couches superficielles, sont compilées sur la [Fig.2a] : on remarque une surépaisseur centrale (rayon 0) de 0,5 nm en moyenne supérieure à l'épaisseur en bord.

[0087] La courbe de tendance Ap de la [Fig.2a] illustre la non-uniformité finale de ces mêmes 25 couches superficielles, après l'implémentation des étapes b), c), et d) du procédé selon l'invention. Les déviations en épaisseur par rapport à l'épaisseur moyenne, en tout point i mesuré, sur les 25 couches superficielles, sont compilées et il apparaît une non-uniformité finale améliorée avec un écart de moins de 0,2 nm en moyenne entre centre et bord. La grande majorité des points mesurés rentre en outre dans l'exigence de non-uniformité d'épaisseur visée $U_{visée}$ de +/-0,4nm.

[0088] Dans cet exemple, l'épaisseur moyenne est évaluée à partir de 625 points de mesure i . Comme cela apparaît sur les cartographies empilées des couches superficielles des 25 substrats SOI ([Fig.2b]), le profil de non-uniformité d'épaisseur est modifié après l'implémentation du procédé d'amincissement selon l'invention, et permet de gommer la surépaisseur centrale et d'améliorer globalement l'uniformité des couches superficielles.

[0089] Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation et aux exemples décrits, et on peut y apporter des variantes de réalisation sans sortir du cadre de l'invention tel que défini par les revendications.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé d'amincissement d'une couche superficielle d'un substrat SOI comprenant :

- a) une étape de mesure d'épaisseur de la couche superficielle, pour obtenir une épaisseur moyenne (E_{moy}) et une non-uniformité d'épaisseur (U) de ladite couche, puis les étapes suivantes, effectuées dans un équipement de traitement chimique monoplaque et au cours desquelles le substrat SOI est animé d'un mouvement de rotation :
 - b) l'application de n cycle(s), avec n un nombre entier supérieur ou égal à 1, d'oxydation et de gravure, à une face avant de la couche superficielle, chaque cycle impliquant une dispense d'eau ozonée suivie d'une dispense d'acide fluorhydrique,
 - c) la réalisation d'une gravure inhomogène de la face avant de la couche superficielle, impliquant une dispense d'une solution de gravure du silicium à une température comprise entre 20°C et 80°C, dans une région centrale de la couche superficielle, pendant un temps donné, dit temps de gravure non uniforme (t_{nu}),
 - d) la réalisation d'une gravure homogène de la face avant de la couche superficielle, impliquant une dispense d'une solution de gravure du silicium selon un mouvement de balayage allant du bord vers le centre de la couche superficielle et inversement, à une température comprise entre 20°C et 80°C, pendant un temps donné, dit temps de gravure uniforme (t_{u}),
- dans lequel, connaissant l'épaisseur moyenne (E_{moy}) et la non-uniformité d'épaisseur (U) de la couche superficielle, le nombre de cycle(s) (n), le temps de gravure non uniforme (t_{nu}) et le temps de gravure uniforme (t_{u}) sont déterminés, préalablement à la réalisation des étapes b), c) et d), à partir d'un modèle les liant à une épaisseur moyenne gravée (e_{grav}) de couche superficielle et à une non-uniformité moyenne de gravure (u_{grav}) définie par la différence entre une épaisseur moyenne gravée dans une région centrale de la couche superficielle et une épaisseur moyenne gravée dans une région périphérique de la couche superficielle.

[Revendication 2]

Procédé d'amincissement selon la revendication précédente, dans lequel la non-uniformité moyenne de gravure (u_{grav}) est positive.

- [Revendication 3] Procédé d'amincissement selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la région centrale et la région périphérique correspondent respectivement à 30% et 70% de l'aire de la couche superficielle.
- [Revendication 4] Procédé d'amincissement selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'épaisseur moyenne gravée (e_{grav}) et la non-uniformité moyenne de gravure (u_{grav}) s'expriment, chacune, sous une forme quadratique, en fonction des variables que sont le nombre de cycle(s) (n), le temps de gravure non uniforme (t_{nu}) et le temps de gravure uniforme (t_{u}).
- [Revendication 5] Procédé d'amincissement selon la revendication précédente, dans lequel le modèle pour déterminer le nombre (n) de cycle(s), le temps de gravure non uniforme (t_{nu}) et le temps de gravure uniforme (t_{u}) est un modèle d'optimisation à trois objectifs avec optimalité lexicographique.
- [Revendication 6] Procédé d'amincissement selon la revendication précédente, dans lequel lesdits objectifs sont :
- (i) identifier un premier ensemble de solutions ($S_n^+(t_{\text{nu}}, t_{\text{u}})$) pour le temps de gravure non uniforme (t_{nu}) et le temps de gravure uniforme (t_{u}), permettant d'atteindre l'égalité entre l'épaisseur moyenne gravée (e_{grav}) de couche superficielle et une épaisseur moyenne à graver visée ($e_{\text{visée}}$), pour tout nombre de cycle(s) (n), ladite épaisseur moyenne à graver visée ($e_{\text{visée}}$) étant définie par différence entre l'épaisseur moyenne visée ($E_{\text{visée}}$) de la couche superficielle et l'épaisseur moyenne (E_{moy}) mesurée à l'étape a) ;
 - (ii) restreindre le premier ensemble des solutions ($S_n^+(t_{\text{nu}}, t_{\text{u}})$) identifié à (i), à un deuxième ensemble de solutions ($S(t_{\text{nu}}, t_{\text{u}})$) pour le temps de gravure non uniforme (t_{nu}) et le temps de gravure uniforme (t_{u}), permettant de minimiser la différence entre la non-uniformité moyenne de gravure (u_{grav}) et une non-uniformité moyenne de gravure visée ($u_{\text{visée}}$), pour tout nombre de cycle(s) (n), la non-uniformité moyenne de gravure visée ($u_{\text{visée}}$) étant définie par différence entre une non-uniformité d'épaisseur visée ($U_{\text{visée}}$) de la couche superficielle et la non-uniformité d'épaisseur (U) mesurée à l'étape a),
 - (iii) sélectionner une recette parmi le deuxième ensemble de solutions ($S(t_{\text{nu}}, t_{\text{u}})$) défini à (ii) permettant de maximiser le nombre de cycle(s) (n).

- [Revendication 7] Procédé d'amincissement selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les étapes b), c) et d) sont effectuées dans l'ordre.
- [Revendication 8] Procédé d'amincissement selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la température au cours des étapes c) et d) est fixée à 65°C.
- [Revendication 9] Procédé d'amincissement selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, à l'étape c), la dispense de la solution de gravure du silicium est faite uniquement au centre, ou selon un mouvement de balayage allant du centre jusqu'à 50% du rayon de la couche superficielle et inversement.
- [Revendication 10] Procédé d'amincissement selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la non-uniformité moyenne de gravure (u_{grav}) dépend d'un gradient de vitesse de gravure défini entre le centre et le bord de la couche superficielle, ledit gradient étant dépendant :
- d'un débit de la solution de gravure du silicium à l'étape c), et/ou
 - d'une dispense d'une solution en face arrière du substrat SOI durant tout ou partie de l'étape c), et/ou
 - de la température appliquée à l'étape c).
- [Revendication 11] Procédé d'amincissement selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la solution de gravure du silicium, à l'étape c) et/ou à l'étape d), est le SC1.