

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2018/109410 A1

(43) Date de la publication internationale
21 juin 2018 (21.06.2018)

(51) Classification internationale des brevets :
G01B 9/02 (2006.01) H01L 21/66 (2006.01)
G01B 11/22 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2017/053589

(22) Date de dépôt international :
14 décembre 2017 (14.12.2017)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1662644 16 décembre 2016 (16.12.2016) FR

(71) Déposant : HORIBA FRANCE SAS [FR/FR]; 16-18 Rue
du Canal, 91160 Longjumeau (FR).

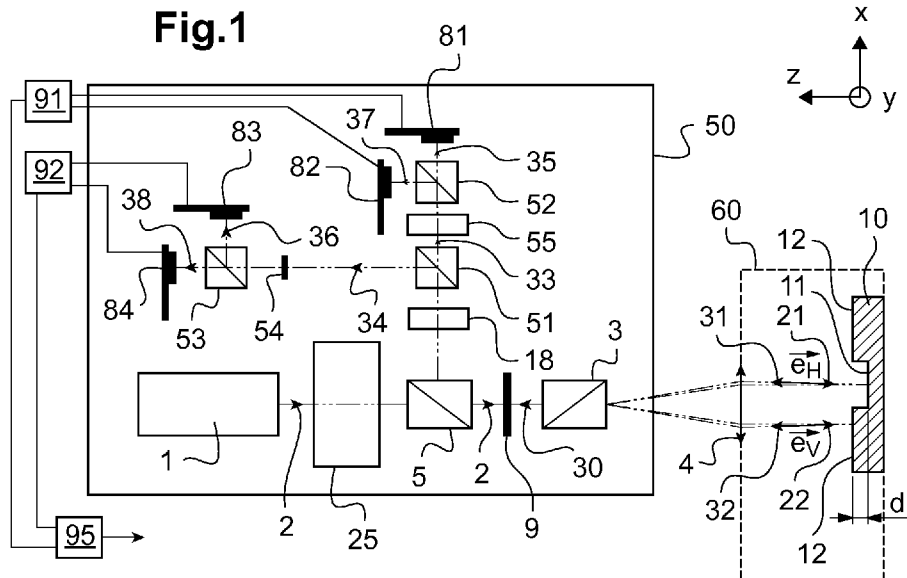
(72) Inventeur : RICHARD, Simon ; 2 avenue de Bellevue,
91120 Palaiseau (FR).

(74) Mandataire : CHAUVIN, Vincent et al. ; Jacobacci Cora-
lis Harle, 32 rue de l'Arcade, 75008 Paris (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR,
KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: METHOD AND INSTRUMENT FOR MEASURING ETCH DEPTH BY DIFFERENTIAL POLARIMETRIC INTERFEROMETRY AND GLOW DISCHARGE SPECTROMETRY APPARATUS COMPRISING SUCH A MEASURING INSTRUMENT

(54) Titre : MÉTHODE ET INSTRUMENT DE MESURE DE PROFONDEUR DE GRAVURE PAR INTERFÉROMÉTRIE POLARIMÉTRIQUE DIFFÉRENTIELLE ET APPAREIL DE SPECTROMÉTRIE DE DÉCHARGE LUMINESCENTE COMPRENANT UN TEL INSTRUMENT DE MESURE



(57) Abstract: The invention relates to a method for measuring etch depth comprising the following steps: - separating a light beam (2) into a first, and respectively second, incident beam (21, 22) directed towards a first, respectively second, area (11, 12) of a sample (10) exposed to an etching treatment to form a first, and respectively second, reflected beam (31, 32), - recombining the first reflected beam and the second reflected beam to form an interferometric beam; detecting a first, and respectively second, interferometric intensity signal relative to a first, respectively second, polarisation component (35, 37); calculating a lower envelope function and an upper envelope function of a differential polarimetric interferometry signal; determining an offset function and a normalisation function

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

from the first lower envelope function and the first upper envelope function; and calculating a differential polarimetric interferometry function normalised locally at each instant (t).

(57) Abrégé : L'invention concerne une méthode de mesure de profondeur de gravure comprenant les étapes suivantes : -séparation d'un faisceau lumineux (2) en un premier, et respectivement deuxième, faisceau incident (21, 22) dirigé vers une première, respectivement deuxième, zone (11, 12) d'un échantillon (10) exposé à un traitement de gravure pour former un premier, et respectivement deuxième, faisceau réfléchi (31, 32), -recombinaison du premier faisceau réfléchi et du deuxième faisceau réfléchi pour former un faisceau interférométrique; -détection d'un premier, et respectivement deuxième, signal d'intensité interférométrique relatif à une première, respectivement deuxième, composante de polarisation (35, 37); -calcul d'une fonction d'enveloppe inférieure et d'une fonction d'enveloppe supérieure d'un signal d'interférométrie polarimétrique différentiel; -détermination d'une fonction de décalage et d'une fonction de normalisation à partir de la première fonction d'enveloppe inférieure et de la première fonction d'enveloppe supérieure; -calcul d'une fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement à chaque instant (t).

mesure.

La gravure de matériaux ou de couches minces sert aussi à l'analyse de la composition de ces matériaux. Ainsi, la spectrométrie de décharge lumineuse est une technique de mesure qui permet d'analyser la composition chimique élémentaire et/ou moléculaire d'échantillons solides homogènes ou multicouches. La mesure peut se faire au cœur d'un échantillon ou être résolue en profondeur. La spectrométrie de décharge lumineuse est couramment utilisée pour analyser la composition d'un échantillon homogène. La spectrométrie de décharge lumineuse est également utilisée pour analyser le profil de composition de matériaux solides ou d'échantillons constitués d'empilements de couches minces en fonction de la profondeur de gravure.

Le principe de la spectrométrie de décharge lumineuse consiste à exposer une zone limitée d'une face d'un échantillon à un plasma de gravure. Le plasma arrache des atomes à la surface de l'échantillon, et les place dans des états électroniques ionisés ou excités. La nature de ces atomes peut être déterminée par l'analyse du spectre d'émission du plasma ou du spectre de masse des ions produits dans le plasma. Des atomes étant arrachés de la surface exposée au plasma, un cratère se creuse en surface de l'échantillon en fonction du temps d'exposition au plasma. Une analyse des signaux de spectrométrie de masse ou spectrométrie d'émission optique, en fonction du temps d'érosion, permet ainsi d'obtenir la composition de l'échantillon résolue en fonction du temps de gravure.

Cependant, la vitesse de gravure varie généralement au cours du procédé de gravure. La vitesse de gravure varie notamment en fonction de la composition de la zone de l'échantillon exposée au plasma, par exemple en fonction de la composition et/ou structure de différentes couches minces dans un empilement, et aussi en fonction de phénomènes transitoires liés au démarrage du plasma.

Or, il est souhaitable d'analyser la composition en fonction de la profondeur du cratère d'érosion généré par le plasma et pas seulement en fonction du temps pendant le plasma d'érosion.

Il existe différentes méthodes pour mesurer la profondeur du cratère d'érosion en fonction du temps.

La méthode la plus utilisée actuellement est basée sur une calibration de la vitesse d'érosion pour des échantillons de référence de composition connue. Cette calibration nécessite de réaliser différentes mesures sur différents échantillons de référence et repose sur des hypothèses telles que par exemple une densité connue et/ou homogène de la couche ou du matériau considéré. La précision du résultat obtenu

reste incertaine.

On connaît notamment du document WO 2015/166186 A1 un système de mesure de la profondeur de gravure combiné à un appareil de spectrométrie de décharge luminescente. Plus précisément, la mesure de profondeur de gravure d'une première zone, exposée au plasma, prend comme référence de profondeur nulle, à chaque instant, une seconde zone de référence sur l'échantillon qui est protégée du plasma. De cette façon, la mesure est insensible aux dilatations de la chambre de gravure.

Néanmoins, on observe des erreurs dans la mesure de profondeur de gravure selon la nature de la couche exposée. Ces erreurs peuvent être relativement importantes pour des valeurs correspondant à une faible profondeur de gravure allant de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres.

OBJET DE L'INVENTION

Afin de remédier à l'inconvénient précité de l'état de la technique, la présente invention propose une méthode de mesure de profondeur de gravure en fonction du temps par interférométrie polarimétrique différentielle comprenant les étapes suivantes :

- séparation d'un faisceau lumineux en un premier faisceau incident et un deuxième faisceau incident, le premier faisceau incident étant dirigé vers une première zone d'un échantillon exposée à un traitement de gravure pour former un premier faisceau réfléchi et, respectivement, le deuxième faisceau incident étant dirigé vers une deuxième zone de l'échantillon pour former un deuxième faisceau réfléchi,

- recombinaison du premier faisceau réfléchi et du deuxième faisceau réfléchi pour former un faisceau interférométrique,

- séparation en polarisation du faisceau interférométrique en au moins une première composante de polarisation et une deuxième composante de polarisation orthogonales entre elles ;

- détection, en fonction du temps (t), sur un intervalle de temps (t₀, t₁), d'un premier signal d'intensité interférométrique relatif à la première composante de polarisation et d'un deuxième signal d'intensité interférométrique relatif à la deuxième composante de polarisation;

- calcul d'un premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel en fonction de combinaisons linéaires du premier signal d'intensité interférométrique et du deuxième signal d'intensité interférométrique;

- calcul d'une première fonction d'enveloppe inférieure et d'une première fonction d'enveloppe supérieure du premier signal d'interférométrie polarimétrique

différentiel sur l'intervalle de temps (t_0, t_1);

- détermination d'une première fonction de décalage égale à une moitié d'une somme de la première fonction d'enveloppe inférieure et de la première fonction d'enveloppe supérieure à chaque instant (t) de l'intervalle de temps (t_0, t_1);

5 - détermination d'une première fonction de normalisation égale à une moitié d'une différence entre la première fonction d'enveloppe inférieure et la première fonction d'enveloppe supérieure chaque instant (t) de l'intervalle de temps (t_0, t_1);

- application de la première fonction de décalage et de la première fonction de normalisation au premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel pour former
10 une première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement à chaque instant (t) de l'intervalle de temps (t_0, t_1), et

- extraction d'une mesure de déphasage optique en fonction du temps sur ledit intervalle de temps (t_0, t_1), à partir de la première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement;

15 - calcul de la profondeur de gravure en fonction du temps à partir de la mesure de déphasage optique.

Cette méthode permet une normalisation locale (au sens temporel) ou instantanée de la moyenne et de l'amplitude du signal d'interférométrie polarimétrique. La mesure du déphasage extraite est ainsi plus juste, plus précise et moins bruitée.

20 Cette méthode permet de s'affranchir des variations de coefficient de réflexion de la surface gravée.

De plus, cette normalisation locale à chaque instant t est compatible avec une estimation en temps réel, puisque les fonctions de décalage et d'amplitude peuvent être évaluées à chaque instant de mesure.

25 De façon avantageuse, la deuxième zone de l'échantillon est une zone de référence qui comporte un masque, par exemple de type masque de photolithographie, ou qui est protégée physiquement vis-à-vis du traitement de gravure. On considère que la gravure de la deuxième zone est négligeable par rapport à la gravure de la première zone.

30 D'autres caractéristiques non limitatives et avantageuses du procédé conforme à l'invention, prises individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles, sont les suivantes :

- l'étape de séparation en polarisation du faisceau interférométrique génère en outre une troisième composante de polarisation et une quatrième composante de
35 polarisation, lesdites troisième et quatrième composantes de polarisation étant

orthogonales entre elles, et les première, deuxième, troisième et quatrième composantes de polarisation étant indépendantes les unes des autres, et la méthode comprenant en outre les étapes suivantes :

- détection, en fonction du temps (t), sur l'intervalle de temps (t₀, t₁), d'un troisième signal d'intensité interférométrique relatif à la troisième composante de polarisation et d'un quatrième signal d'intensité interférométrique relatif à la quatrième composante de polarisation ;
- calcul d'un deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel en fonction de combinaisons linéaires du troisième signal d'intensité interférométrique et du quatrième signal d'intensité interférométrique ;
- calcul d'une deuxième fonction d'enveloppe inférieure et d'une deuxième fonction d'enveloppe supérieure du deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel ;
- détermination d'une deuxième fonction de décalage égale à une moitié d'une somme de la deuxième fonction d'enveloppe inférieure et de la deuxième fonction d'enveloppe supérieure à l'instant t ;
- détermination d'une deuxième fonction de normalisation égale à une moitié d'une différence entre la deuxième fonction d'enveloppe inférieure et la deuxième fonction d'enveloppe supérieure à l'instant t ;
- application de la deuxième fonction de décalage et de la deuxième fonction de normalisation au deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel pour former une deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement, et dans lequel
- l'extraction de la mesure de déphasage optique en fonction du temps sur ledit intervalle de temps (t₀, t₁) est effectuée à partir d'un rapport entre la première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement et la deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement.

Selon un aspect particulier et avantageux, la troisième composante de polarisation et la quatrième composante de polarisation sont choisies parmi des composantes de polarisation linéaires ou, respectivement, circulaires.

Selon un aspect particulier et avantageux, le deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel est égal à une différence entre le troisième signal d'intensité interférométrique et le quatrième signal d'intensité interférométrique divisée par une somme du troisième signal d'intensité interférométrique et du quatrième signal d'intensité interférométrique.

De préférence, la première composante de polarisation et la deuxième composante de polarisation sont choisies parmi des composantes de polarisation linéaires ou, respectivement, circulaires.

Selon un aspect particulier et avantageux, le premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel est égal à une différence entre le premier signal d'intensité interférométrique et le deuxième signal d'intensité interférométrique divisée par une somme du premier signal d'intensité interférométrique et du deuxième signal d'intensité interférométrique.

Dans un mode de réalisation particulier, l'étape de calcul d'une première, et/ou respectivement deuxième, fonction d'enveloppe inférieure comporte une étape d'interpolation linéaire ou polynomiale et/ou dans laquelle l'étape de calcul d'une première, et/ou respectivement deuxième, fonction d'enveloppe supérieure comporte une autre étape d'interpolation linéaire ou polynomiale.

De façon particulièrement avantageuse, la méthode comprend en outre une étape de filtrage du premier signal d'intensité interférométrique et/ou, respectivement, du deuxième signal d'intensité interférométrique, préalable à l'étape de calcul de fonction d'enveloppe.

L'invention propose également un interféromètre polarimétrique différentiel comprenant une source de lumière adaptée pour générer un faisceau lumineux, un séparateur optique de faisceau adapté pour séparer le faisceau lumineux en un premier faisceau incident et un deuxième faisceau incident, le premier faisceau incident étant dirigé vers une première zone d'un échantillon exposée à un traitement de gravure pour former un premier faisceau réfléchi et, respectivement, le deuxième faisceau incident étant dirigé vers une deuxième zone de l'échantillon pour former un deuxième faisceau réfléchi, un combineur de faisceau adapté pour recombinaison le premier faisceau réfléchi et le deuxième faisceau réfléchi pour former un faisceau interférométrique, un séparateur de polarisation adapté pour séparer le faisceau interférométrique en au moins une première composante de polarisation et une deuxième composante de polarisation, la première composante de polarisation et la deuxième composante de polarisation étant orthogonales entre elles, un premier détecteur adapté pour recevoir la première composante de polarisation et générer un premier signal d'intensité interférométrique en fonction du temps (t) sur un intervalle de temps (t₀, t₁) et un deuxième détecteur adapté pour recevoir la deuxième composante de polarisation et générer un deuxième signal d'intensité interférométrique en fonction du temps (t) sur l'intervalle de temps (t₀, t₁).

Selon l'invention, l'interféromètre polarimétrique différentiel comporte un calculateur adapté pour calculer un premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel en fonction de combinaisons linéaires du premier signal d'intensité interférométrique et du deuxième signal d'intensité interférométrique, calculer une première fonction d'enveloppe inférieure et une première fonction d'enveloppe supérieure du premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1), déterminer une première fonction de décalage égale à chaque instant t à une moitié d'une somme de la première fonction d'enveloppe inférieure et de la première fonction d'enveloppe supérieure, déterminer une première fonction de normalisation égale, à chaque instant t de l'intervalle de temps (t_0 , t_1), à une moitié d'une différence entre la première fonction d'enveloppe inférieure et la première fonction d'enveloppe supérieure, appliquer la première fonction de décalage et la première fonction de normalisation au premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel pour former une première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement, et extraire une mesure de déphasage optique en fonction du temps sur ledit intervalle de temps (t_0 , t_1), à partir de la première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement et calculer la profondeur de gravure en fonction du déphasage optique.

Selon un mode de réalisation particulier et avantageux, l'interféromètre polarimétrique différentiel comprend en outre un autre séparateur de polarisation adapté pour séparer le faisceau interférométrique en une troisième composante de polarisation et une quatrième composante de polarisation, la troisième composante de polarisation et la quatrième composante de polarisation étant orthogonales entre elles et étant indépendantes de la première composante de polarisation et de la deuxième composante de polarisation ; un troisième détecteur (83) adapté pour recevoir la troisième composante de polarisation et générer un troisième signal d'intensité interférométrique en fonction du temps (t) sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1) et un quatrième détecteur adapté pour recevoir la quatrième composante de polarisation et générer un quatrième signal d'intensité interférométrique en fonction du temps (t) sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1); et le calculateur est adapté pour calculer un deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel en fonction de combinaisons linéaires du troisième signal d'intensité interférométrique et du quatrième signal d'intensité interférométrique; calculer une deuxième fonction d'enveloppe inférieure et une deuxième fonction d'enveloppe supérieure du deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1); déterminer une deuxième

fonction de décalage égale à chaque instant t à une moitié d'une somme de la deuxième fonction d'enveloppe inférieure et de la deuxième fonction d'enveloppe supérieure ; déterminer une deuxième fonction de normalisation égale, à chaque instant t de l'intervalle de temps (t_0, t_1) , à une moitié d'une différence entre la deuxième fonction d'enveloppe inférieure et la deuxième fonction d'enveloppe supérieure ;

5 appliquer la deuxième fonction de décalage et la deuxième fonction de normalisation au deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel pour former une deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement, et effectuer l'extraction de la mesure de déphasage optique en fonction du temps sur ledit

10 intervalle de temps (t_0, t_1) à partir d'un rapport entre la première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement et de la deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement.

L'invention concerne aussi un appareil de spectrométrie de décharge luminescente comprenant un interféromètre polarimétrique différentiel selon l'un des

15 modes de réalisation décrits.

Enfin, l'invention concerne aussi un dispositif de contrôle de gravure comprenant un interféromètre polarimétrique différentiel selon l'un des modes de réalisation décrits combiné à une caméra de visualisation adaptée pour former une image de la première zone et de la deuxième zone de l'échantillon.

20 DESCRIPTION DÉTAILLÉE D'UN EXEMPLE DE RÉALISATION

La description qui va suivre en regard des dessins annexés, donnés à titre d'exemples non limitatifs, fera bien comprendre en quoi consiste l'invention et comment elle peut être réalisée.

Sur les dessins annexés :

25 - la figure 1 représente schématiquement un système d'interférométrie polarimétrique différentiel combiné à un appareil de gravure sélective selon un mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 2 représente des courbes d'intensité en fonction du temps obtenues à partir de mesures d'interférométrie polarimétrique et un traitement de normalisation

30 globale ;

- la figure 3 représente une mesure de déphasage optique calculée à partir des courbes d'intensité avec normalisation globale de la figure 2 ;

- la figure 4, respectivement la figure 5, représente une acquisition d'intensité interférométrique suivant la polarisation linéaire L , respectivement circulaire C , en

35 fonction du temps ;

- la figure 6 illustre une étape de détermination des minima et maxima locaux sur une courbe d'intensité interférométrique polarisée ;

- la figure 7 illustre une étape de calcul d'une enveloppe de la courbe d'intensité interférométrique polarisée, par interpolation des minima et respectivement des maxima déterminés sur la figure 4 ;

- la figure 8, respectivement la figure 9, représente les mesure d'intensité interférométrique suivant la polarisation linéaire, et respectivement circulaire, après normalisation locale ;

- la figure 10 représente une mesure de déphasage optique calculée à partir des courbes d'intensité avec normalisation locale des figures 8 et 9 ;

- la figure 11 représente une mesure de profondeur de gravure calculée à partir des courbes d'intensité avec normalisation locale des figures 7 et 8 ;

- la figure 12 représente schématiquement un exemple de dispositif de caméra polarimétrique.

La présente divulgation concerne en particulier un procédé et un système de traitement des données d'interférométrie polarimétrique différentielle acquises au cours de la gravure d'un échantillon, dans un réacteur ou dans une source à plasma de décharge lumineuse.

Sur la figure 1 on a représenté schématiquement un appareil 60 de gravure sélective d'un échantillon. Cet appareil peut être un réacteur pour la gravure chimique en phase vapeur ou un réacteur de gravure assisté par plasma. Dans une application particulière, l'appareil 60 est une lampe à décharge pour un spectromètre de décharge lumineuse (ou « glow discharge spectrometer » dans la terminologie anglo-saxonne).

Un échantillon 10 est disposé dans l'appareil de gravure sélective de manière à ce qu'une première zone 11 soit exposée au traitement de gravure sélective tandis qu'une deuxième zone 12 de l'échantillon est protégée ou masquée vis-à-vis du traitement de gravure. Cette gravure sélective peut résulter d'une configuration du traitement de gravure qui est localisée spatialement sur la première zone 11. De façon alternative, l'appareil comporte un masque ou un écran adapté pour protéger sélectivement la deuxième zone 12 vis-à-vis du traitement de gravure tout en exposant la première zone 11 au traitement de gravure. Selon une autre alternative, la deuxième zone 12 de l'échantillon comporte une couche de masque déposée sur la surface de l'échantillon, cette couche de masque présentant une vitesse de gravure négligeable par rapport à la vitesse de gravure de la première zone 11 lorsque l'échantillon est exposé au traitement de gravure.

Dans l'exemple illustré sur la figure 1, l'échantillon comporte une face plane disposée dans un plan XY d'un repère orthonormé (X, Y, Z). La normale au plan de l'échantillon est parallèle à l'axe Z. On suppose que le traitement de gravure génère un cratère d'érosion à fond plat sur la première zone 11 de l'échantillon 10.

5 On note $d(t)$ la profondeur de gravure en fonction du temps, c'est-à-dire la distance entre la première zone 11 et la deuxième zone le long de l'axe Z. On cherche à mesurer précisément la profondeur de gravure $d(t)$ en fonction du temps d'exposition au traitement de gravure.

10 A cet effet, l'appareil 60 de gravure sélective est combiné avec un instrument de mesure *in situ* de profondeur de gravure. On utilise de préférence un système d'interférométrie polarimétrique comprenant un système de détection polarimétrique configuré pour détecter simultanément quatre composantes de polarisation indépendantes du faisceau interférométrique, de préférence deux composantes de polarisation linéaire orthogonales et deux composantes de polarisation circulaire
15 orthogonales.

Le système d'interférométrie polarimétrique comporte essentiellement une source de lumière 1, un séparateur optique de faisceau 3 qui sépare le faisceau source en deux faisceaux incidents se propageant suivant deux chemins optiques séparés, un combineur optique de faisceau qui recombine les deux faisceaux après réflexion sur
20 deux zones distinctes de l'échantillon, un séparateur source-détecteur 5, un système de détection polarimétrique et un système de traitement du signal.

Plus précisément, l'instrument de mesure de profondeur de gravure de la figure 1 comprend une source de lumière 1, qui est par exemple une source laser ou une diode laser. La source de lumière 1 émet un faisceau source 2, de préférence
25 monochromatique, par exemple à une longueur d'onde de 635 nm, ou encore de 780 nm, 532 nm, 405 nm. De façon avantageuse, un isolateur optique 25 est disposé sur le faisceau source 2. Un séparateur source-détecteur 5, par exemple de type lame séparatrice (50-50) ou cube séparateur non-polarisant, est disposé sur le faisceau source 2. Une lame demi-onde 9 permet de d'orienter l'axe de polarisation du faisceau
30 source. Le séparateur source-détecteur 5 dirige le faisceau source 2 vers une lame demi-onde 9 puis vers un autre séparateur de faisceau 3.

Le séparateur de faisceau 3 est par exemple un cube séparateur de polarisation, dont les axes de polarisation sont inclinés à 45 degrés par rapport à l'axe du faisceau incident 2 polarisé linéairement ayant traversé la lame demi-onde 9. A titre
35 d'exemple, le séparateur de faisceau 3 est un prisme de Wollaston qui est adapté pour

séparer angulairement le faisceau incident en un premier faisceau incident 21 et un deuxième faisceau incident 22. De façon avantageuse, le premier faisceau incident 21 et le deuxième faisceau incident 22 sont polarisés linéairement suivant des états de polarisations orthogonaux entre eux. Ainsi, le premier faisceau incident 21 polarisé p-est dirigé dans une première direction et le deuxième faisceau incident 22 polarisé s-est dirigé dans une deuxième direction. Par construction du prisme Wollaston 3, la première direction et la deuxième direction sont séparées angulairement d'un angle compris entre 0.1 et 20 degrés.

De façon avantageuse, la lame demi-onde 9 est orientée de manière à ce que le premier faisceau incident 21 et le deuxième faisceau incident 22 aient la même amplitude.

Une lentille 4 est montée sur une ouverture fournissant un accès optique à l'intérieur du réacteur de traitement. De préférence, le séparateur de faisceau 3 est disposé au foyer de la lentille 4. Ainsi, la lentille 4 forme deux faisceaux incidents 21, 22 séparés spatialement qui se propagent parallèlement dans le réacteur de traitement de gravure sélective en direction d'une face de l'échantillon. De cette manière, la lentille 4 focalise le premier faisceau incident 21 sur la première zone 11 de l'échantillon qui est exposée au plasma de gravure. D'autre part, la lentille 4 focalise le deuxième faisceau incident 22 sur la deuxième zone 12 de l'échantillon qui est protégée du plasma de gravure. L'angle d'incidence sur la première zone et sur la seconde zone est généralement inférieur à 10 degrés, et de préférence inférieur ou égal à 5 degrés. Par réflexion sur la première zone 11, le premier faisceau incident 21 forme un premier faisceau réfléchi 31. De manière analogue, par réflexion sur la deuxième zone 12, le deuxième faisceau incident 22 forme un deuxième faisceau réfléchi 32.

Dans une variante, à la place du prisme de Wollaston 3, on peut utiliser un séparateur à décalage de faisceau et remplacer la lentille 4 par une fenêtre.

Selon un mode de réalisation alternatif, on utilise un angle d'incidence non nul par rapport à la normale sur l'échantillon pour séparer angulairement le premier faisceau réfléchi 31 et le deuxième faisceau réfléchi 32 par rapport au premier faisceau incident 21 et au deuxième faisceau incident 22. De cette façon le faisceau réfléchi recombinaison 30 est séparé spatialement du faisceau incident 2, sans requérir un séparateur source-détecteur.

Dans l'exemple illustré sur la figure 1, l'échantillon présente une face plane et la gravure de la première zone 11 génère un cratère à fond plat. De préférence, comme illustré dans cet exemple, les faisceaux incidents 21, 22 se réfléchissent sur

l'échantillon sous un angle d'incidence nul. Dans ce cas, le premier faisceau réfléchi 31 se propage dans la direction opposé au premier faisceau incident 21, et, respectivement, le deuxième faisceau réfléchi 32 se propage dans la direction opposé au premier faisceau incident 22.

5 La lentille 4 collecte le premier faisceau réfléchi 31 et le deuxième faisceau réfléchi 32 et les dirige vers un système optique de recombinaison, qui est ici le même prisme de Wollaston 3 ayant servi à séparer le faisceau incident.

10 Le prisme de Wollaston 3 recombine le premier faisceau réfléchi 31 et le deuxième faisceau réfléchi 32 pour former un faisceau interférométrique 30. Le faisceau interférométrique 30 traverse la lame demi-onde 9 et est incident sur le séparateur source-détecteur 5 non-polarisant qui le réfléchit en direction d'un système de détection polarimétrique.

15 Le filtre 18 est un filtre spectral, de préférence centré sur la longueur d'onde d'émission de la source lumineuse 1. Le filtre 18 permet avantageusement d'éliminer la lumière parasite provenant du plasma ou de l'éclairage ambiant. Le filtre 18 est par exemple un filtre interférentiel centré à 635 nm d'une largeur spectrale de 10 nm.

20 Le système de détection polarimétrique comporte un séparateur non polarisant 51, un premier séparateur de polarisation 52 et un deuxième séparateur de polarisation 53, une lame quart d'onde 54, un rotateur de polarisation 55 et quatre détecteurs 81, 82, 83, 84. Dans un mode de réalisation alternatif, les positions des éléments 54 et 55 peuvent être interverties.

25 Avantageusement, le séparateur non polarisant 51 préserve au mieux l'état de polarisation du faisceau interférométrique incident à la fois sur les voies transmise et réfléchie. A ce titre les séparateurs non polarisant pour laser, optimisés pour une plage de longueur d'onde étroite sont préférables aux séparateurs large bande, couvrant par exemple tout le visible. Le séparateur non polarisant 51 reçoit le faisceau interférométrique 30 et le sépare pour former une première fraction de faisceau interférométrique 33 sur la voie de transmission du séparateur non polarisant 51 et, respectivement, une seconde fraction de faisceau interférométrique 34 sur la voie de réflexion du séparateur non polarisant 51.

35 Le rotateur de polarisation 55 est associé au séparateur de polarisation 52 pour former un analyseur de polarisations linéaires orientées à 45 degrés des axes du séparateur de faisceau 3. Le détecteur 81 détecte une composante de polarisation linéaire 35 de la première fraction de faisceau interférométrique 33, cette composante de polarisation linéaire 35 étant orientée à +45 degrés des axes du séparateur de

faisceau 3. Simultanément, le détecteur 82 détecte une autre composante de polarisation linéaire 37 de la première fraction de faisceau interférométrique 33, cette autre composante de polarisation linéaire 37 étant orientée à -45 degrés des axes du séparateur de faisceau 3.

5 La lame quart-d'onde 54 est associée au séparateur de polarisation 53 pour former un analyseur de polarisations circulaires, respectivement circulaire droite et circulaire gauche. Le détecteur 83 détecte la composante de polarisation circulaire droite 36 de la seconde fraction de faisceau interférométrique 34. Simultanément, le détecteur 84 détecte la composante de polarisation circulaire gauche 38 de la seconde
10 fraction de faisceau interférométrique 34.

Ainsi, le système de détection polarimétrique de la figure 1 permet de détecter simultanément les quatre composantes de polarisation indépendantes du faisceau interférométrique 30.

A partir des quatre signaux détectés par les quatre détecteurs 81, 82, 83, 84, il
15 est possible d'en déduire le déphasage entre le faisceau réfléchi 31 par la première zone 11, c'est-à-dire dans le cratère résultant de la gravure de l'échantillon, et le faisceau réfléchi 32 par la deuxième zone 12, qui sert de référence.

De façon particulièrement avantageuse, le système de détection polarimétrique est configuré pour détecter simultanément au moins deux et de
20 préférence quatre composantes de polarisation orthogonales du faisceau interférométrique, c'est-à-dire au moins deux composantes orthogonales de polarisation linéaire et/ou deux composantes orthogonales de polarisation circulaire.

Nous détaillons d'abord l'approche classique d'analyse des signaux correspondant aux quatre composantes de polarisation.

25 On note :

- I_{L1} l'intensité de la composante linéaire du faisceau interférométrique selon une direction à +45 degrés par rapport à la polarisation linéaire horizontale (H) du champ incident sur la première zone et par rapport à la polarisation linéaire verticale (V) du champ incident sur la seconde zone ;
- 30 - I_{L2} l'intensité de la composante linéaire du faisceau interférométrique selon une direction de -45 degrés par rapport à la polarisation linéaire H du champ incident sur la première zone et par rapport à la polarisation linéaire V du champ incident sur la seconde zone ;
- I_{C1} l'intensité de la composante circulaire droite du faisceau
35 interférométrique, et

- I_{C2} l'intensité de la composante circulaire gauche du faisceau interférométrique.

Pendant la gravure de l'échantillon, la profondeur de la première zone augmente et donc la différence de phase entre les deux ondes réfléchies varie en fonction du temps t .

Plus précisément, notons $\delta(t)$ le déphasage optique relatif entre le premier faisceau réfléchi et le deuxième faisceau réfléchi :

$$\delta(t) = 2kd(t) + \varphi_H + \varphi_V$$

où $k=2\pi/\lambda$, et $d(t)$ représente la profondeur de gravure en fonction du temps.

On exprime par les relations suivantes r_V le coefficient de réflexion sur la première zone et r_H le coefficient de réflexion sur la deuxième zone:

$$r_V = \rho_V \exp(i\varphi_V)$$

$$r_H = \rho_H \exp(i\varphi_H)$$

En interférométrie polarimétrique, on calcule classiquement, d'une part, la différence d'intensité normalisée L entre les intensités détectées sur les voies de polarisation linéaires :

$$L = \frac{I_{L1} - I_{L2}}{I_{L1} + I_{L2}} = \frac{2 E_V E_H \rho_V \rho_H \cos(\delta(t))}{E_V^2 \rho_V^2 + E_H^2 \rho_H^2}$$

D'autre part, on calcule classiquement la différence d'intensité normalisée C entre les intensités détectées sur les voies de polarisation circulaires :

$$C = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{C1} + I_{C2}} = \frac{2 E_V E_H \rho_V \rho_H \sin(\delta(t))}{E_V^2 \rho_V^2 + E_H^2 \rho_H^2}$$

Théoriquement, on montre que le déphasage $\delta(t)$ relatif entre les deux faisceaux optiques réfléchis s'écrit :

$$\delta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{C1} + I_{C2}} \cdot \frac{I_{L1} + I_{L2}}{I_{L1} - I_{L2}} \right)$$

Autrement formulé :

$$\delta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{C}{L} \right)$$

On déduit de ce déphasage la différence de profondeur relative $d(t)$ entre les deux zones sur lesquelles sont dirigés les deux faisceaux incidents.

En pratique, la détection polarimétrique peut être affectée par des défauts dus aux composants optiques, miroirs, séparateur et/ou combineur de faisceau. De plus, les signaux polarimétriques peuvent aussi être affectés par des modifications des propriétés de l'échantillon lui-même en fonction du temps de gravure. L'évolution de l'état de surface et/ou de la rugosité peut modifier les signaux polarimétriques.

Il existe une méthode dite de normalisation globale pour corriger certains

effets indésirables.

Dans le cas d'une détection polarimétrique idéale, et d'une recombinaison imparfaite des faisceaux et des miroirs, les signaux d'intensité polarimétrique reçus respectivement sur les quatre détecteurs 81, 82, 83, 84 peuvent s'écrire respectivement

5 sous la forme suivante :

$$I_{L_1} = a_{L_1} + b_{L_1} \cdot \cos \delta(t)$$

$$I_{L_2} = a_{L_2} - b_{L_2} \cdot \cos \delta(t)$$

$$I_{C_1} = a_{C_1} + b_{C_1} \cdot \sin \delta(t)$$

$$I_{C_2} = a_{C_2} + b_{C_2} \cdot \sin \delta(t)$$

Où le coefficient a représente un paramètre de décalage et, respectivement, le coefficient b représente un paramètre d'amplitude.

En utilisant une période d'échantillonnage où seulement $\delta(t)$ varie, par exemple sur un substrat de référence, on peut calculer des paramètres du type décalage (offset)

10 a et amplitude b pour chaque intensité polarimétrique tels que:

$$a = \frac{\max(I) + \min(I)}{2}$$

$$b = \frac{\max(I) - \min(I)}{2}$$

On calcule ainsi une intensité normalisée de manière globale \tilde{I} :

$$\tilde{I} = \frac{I - a}{b}$$

On en déduit $\delta(t)$ par l'équation suivante :

$$\tan \delta(t) = \frac{\tilde{I}_{C_2} - \tilde{I}_{C_1}}{\tilde{I}_H - \tilde{I}_V}$$

Cette normalisation globale est satisfaisante dans certaines situations, mais présente des inconvénients. Tout d'abord, l'utilisateur doit définir une zone temporelle

15 de normalisation après l'acquisition des données. Par conséquent, cette normalisation est incompatible avec une estimation en temps réel. L'expérience montre que pour un échantillon donné, un seul jeu de coefficients de normalisation ne peut pas être utilisé pour plusieurs mesures. De plus, cette normalisation globale suppose l'unicité des coefficients de normalisation pour une mesure donnée, alors que l'expérience montre

20 que certains échantillons ont une rugosité de surface qui évolue pendant la mesure, ce qui affecte les résultats.

La figure 2 illustre un exemple de mesure normalisée suivant la technique de normalisation globale. L'échantillon est formé d'une couche de nitrure de titane ayant une épaisseur d'environ 4 microns sur un substrat de carbure de tungstène. Les

5 courbes sont enregistrées lors de la gravure de l'échantillon. La normalisation est effectuée sur une partie temporelle de la courbe (dans l'exemple représenté correspondant à $t > 220$ s). Puis, on extrapole en appliquant les mêmes coefficients sur la reste de la courbe ($t < 220$ s). On a représenté respectivement les courbes normalisées globalement \widetilde{I}_{C1} , \widetilde{I}_{C2} , \widetilde{I}_{L1} et \widetilde{I}_{L2} en fonction du temps t sur un intervalle de temps s'étendant de 0 à 360 s. Le traitement de gravure démarre à l'instant $t=0$. Dans la partie des courbes où t est supérieur à environ 220 s, les courbes oscillent entre les valeurs +1 et -1. On observe donc une normalisation globale correcte sur la partie des courbes d'intensité correspondant à $t > 220$ s. Par contre, la normalisation globale apparaît
10 clairement inadaptée sur la première partie des courbes, pour $t < 220$ s.

La figure 3 illustre le déphasage temporel calculé à partir de ces courbes d'intensité normalisées globalement telles que représentées sur la figure 2. Le déphasage temporel $\delta(t)$ semble varier de manière monotone avec un bruit réduit dans la partie où $t > 220$ s. Par contre, pour $t < 220$ s, on observe des sauts de phase et une
15 évolution de la phase différente de l'évolution linéaire attendue. En effet, pendant la première partie jusqu'à $t \sim 100$ s, le déphasage oscille autour d'une valeur moyenne nulle, ce qui conduit à une erreur d'évaluation importante sur la profondeur de gravure.

Nous allons maintenant détailler une approche innovante d'analyse des signaux d'interférométrie polarimétrique.

20 Comme détaillé ci-dessus, le système de détection polarimétrique à quatre détecteurs illustré sur la figure 1 permet de détecter simultanément deux signaux interférométriques de polarisation linéaires orthogonales I_{L1} et I_{L2} et/ou deux signaux interférométriques de polarisation circulaires orthogonales I_{C1} et I_{C2} . A titre, d'exemple, le signal I_{L1} représente une polarisation horizontale, respectivement le signal I_{L2}
25 représente une polarisation verticale, le signal I_{C1} représente une polarisation circulaire droite et le signal I_{C2} représente une polarisation circulaire gauche.

Sur la figure 1, le système de détection polarimétrique est relié à différents modules de calcul 91, 92, 95 faisant partie d'un processeur de calcul.

Le module de calcul 91 utilise un premier rapport de combinaisons linéaires
30 des intensités de deux signaux interférométriques détectés sur les voies de polarisation linéaires orthogonales, I_{L1} et I_{L2} , pour former une première différence d'intensité normalisée L à chaque instant t :

$$L = \frac{I_{L1} - I_{L2}}{I_{L1} + I_{L2}}$$

Ainsi, le module de calcul 91 peut fournir en temps réel, ou en post-traitement, la

valeur de $L(t)$ à chaque instant t .

De façon particulièrement avantageuse, le module de calcul 92 utilise un deuxième rapport de combinaisons linéaires des intensités de deux autres signaux interférométriques détectés sur les voies de polarisation circulaires orthogonales, I_{C1} et I_{C2} , pour former une deuxième différence d'intensité normalisée C à chaque instant t :

$$C = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{C1} + I_{C2}}$$

Ainsi, le module de calcul 92 peut fournir en temps réel, ou en post-traitement la valeur de $C(t)$ à chaque instant t .

La première différence d'intensité normalisée L est une fonction de $\cos(\delta(t))$ et, respectivement, la deuxième différence d'intensité normalisée C est une fonction de $\sin(\delta(t))$:

$$L \approx \alpha_L(t) + \beta_L(t) \cos \delta(t)$$

$$C \approx \alpha_C(t) + \beta_C(t) \sin \delta(t)$$

Le but est de calculer $\cos(\delta(t))$ et $\sin(\delta(t))$ à partir de ces mesures.

On considère ici un échantillon non transparent, pour lequel les variations de phase sont proportionnelles aux variations de profondeur de gravure.

Sur la figure 4, on a représenté un enregistrement de la première différence d'intensité normalisée L en fonction du temps t sur l'intervalle temporel (0 ;360s) pour l'échantillon décrit ci-dessus. De même, sur la figure 5, on a représenté un enregistrement de la différence d'intensité normalisée C en fonction du temps t sur l'intervalle temporel (0 ;360s) pour le même échantillon.

On observe que les variations de l'enveloppe des signaux, définies par les variables $\alpha_{L,C}$ et $\beta_{L,C}$ sont lentes à l'intérieur de chaque couche de matériau, avec des variations parfois abruptes à l'interface entre deux couches. Toutefois, l'enveloppe des signaux a généralement un comportement sans oscillations.

Le traitement des données comporte ensuite les étapes suivantes.

Etape 1 :

Pour chaque courbe de différence d'intensité normalisée en fonction du temps t , on détermine les minima et maxima locaux. Autrement dit, on trouve les hauts et les bas à chaque oscillation.

Ainsi, sur la figure 6, on a représenté des petits cercles 100 correspondant aux minima locaux, et, respectivement, des petits cercles 200 correspondant aux maxima locaux sur la courbe de la première différence d'intensité normalisée L .

Dans une variante de cette étape, on effectue au préalable un filtrage, par exemple par échantillonnage et/ou par calcul d'une moyenne afin de réduire le bruit.

Selon un aspect particulier, le module de calcul 91, respectivement 92, élimine les faux minima et faux maxima. Par exemple, on vérifie qu'un minima ou un maxima de L est positionné au milieu de l'intervalle temporel entre un minimum et un maximum de C et vice versa.

Etape 2 :

On détermine une courbe d'enveloppe supérieure UL par interpolation entre les maxima locaux 200 de la première différence d'intensité normalisée L. De manière analogue, on détermine une courbe d'enveloppe inférieure LL par interpolation entre les minima locaux 100 de la première différence d'intensité normalisée L. L'interpolation peut être linéaire ou basée sur une fonction de spline ou une décomposition polynomiale.

Le module de calcul 91 est avantageusement configuré pour calculer les courbes d'enveloppe inférieure UL(t) et d'enveloppe supérieure LL(t) à chaque instant t ou suivant une période d'échantillonnage prédéterminée.

De façon particulièrement avantageuse, on détermine de manière analogue, une autre courbe d'enveloppe supérieure UC par interpolation entre les maxima locaux de la deuxième différence d'intensité normalisée C et, respectivement, une autre courbe d'enveloppe inférieure LC par interpolation entre les minima locaux de la deuxième différence d'intensité normalisée C.

De manière analogue, le module de calcul 92 est configuré pour calculer les courbes d'enveloppe inférieure UC(t) et d'enveloppe supérieure LC(t) à chaque instant t ou suivant la période d'échantillonnage prédéterminée.

Etape 3 :

Un autre module de calcul 95 reçoit les courbes d'enveloppe UL(t), LL(t), UC(t) et LC(t).

Le module de calcul 95 calcule une première fonction de décalage à chaque instant t :

$$\alpha_L(t) = \frac{UL(t) + LL(t)}{2}$$

Le module de calcul 95 calcule une première fonction de normalisation à chaque instant t :

$$\beta_L(t) = \frac{UL(t) - LL(t)}{2}$$

De façon avantageuse, le module de calcul 95 calcule une deuxième fonction

de décalage à chaque instant t :

$$\alpha_c(t) = \frac{UC(t) + LC(t)}{2}$$

Le module de calcul 95 calcule une deuxième fonction de normalisation à chaque instant t :

$$\beta_c(t) = \frac{UC(t) - LC(t)}{2}$$

Le module de calcul 95 applique la première fonction de décalage $\alpha_L(t)$ et la première fonction de normalisation $\beta_L(t)$ au premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel, pour calculer une première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée et en déduire :

$$\cos(\delta(t)) \approx \frac{L(t) - \alpha_L(t)}{\beta_L(t)}$$

La figure 8 représente ainsi la première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée égale à $\cos(\delta(t))$ en fonction du temps t.

De façon analogue, on applique la deuxième fonction de décalage $\alpha_c(t)$ et la L fonction de normalisation $\beta_c(t)$ au deuxième signal d'interférométrie polarimétrique, pour calculer une deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée et en déduire :

$$\sin(\delta(t)) \approx \frac{C(t) - \alpha_c(t)}{\beta_c(t)}$$

La figure 9 représente ainsi la deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée égale à $\sin(\delta(t))$ en fonction du temps t.

On observe que la normalisation locale est quasiment parfaite sur tout l'intervalle de temps (0 ; 360s) sur les figures 8 et 9, les courbes oscillant entre les valeurs de -1 et +1 sur tout l'intervalle de temps, malgré le changement d'interface à environ 220s.

Etape 4 :

Le module de calcul 95 extrait le déphasage instantané $\delta(t)$, par exemple en calculant la fonction arc-tangente du rapport entre la deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée, $\sin(\delta(t))$, et la première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée, $\cos(\delta(t))$.

La figure 10 représente ainsi le déphasage en radians, en fonction du temps, modulo π . Un algorithme permet de déplier le déphasage en fonction du temps. Dans l'air ou le vide, l'indice de réfraction du cratère de gravure est égal à 1. Un facteur de conversion de 50,5 nm/rad. permet d'en déduire la profondeur de gravure $d(t)$ en fonction du temps, comme illustré sur la figure 11.

En comparant l'allure de la figure 3 et celle de la figure 11, on observe que les erreurs dues à la normalisation globale ont disparu.

La méthode permet une normalisation locale automatique des signaux d'interférométrie polarimétrique différentielle. Il n'est pas nécessaire d'effectuer une calibration préalable.

L'utilisateur n'intervient pas manuellement pour définir l'intervalle temporel de normalisation.

De plus, il n'est pas nécessaire d'enregistrer des coefficients de calibration.

Dans un mode de réalisation, les calculs sont effectués a posteriori.

Dans une variante, les calculs sont effectués en temps réel, avec ajustement au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles mesures.

L'invention trouve une application particulière dans un appareil de spectrométrie de décharge lumineuse, où l'échantillon est exposé à un traitement de gravure sélective par plasma. L'instrument de mesure de profondeur de gravure permet une mesure plus précise et fiable de la profondeur de gravure dans l'échantillon.

L'invention trouve aussi une application particulière dans un dispositif de caméra polarimétrique, illustré à titre d'exemple en figure 12. Le dispositif de caméra polarimétrique comporte un interféromètre polarimétrique différentiel 50 tel que décrit dans la présente divulgation et un système d'imagerie 70. Le système d'imagerie comporte une caméra de visualisation et, de préférence, une source lumineuse d'éclairage. Le dispositif de caméra polarimétrique comporte en outre une lame séparatrice 24 et un système optique 14 à base de lentille(s) ou de miroir(s). La lame séparatrice 24 est par exemple une lame dichroïque permet de combiner les trajets optiques de l'interféromètre polarimétrique différentiel 50 et du système d'imagerie 70. La lame séparatrice 24 combinée au système optique 14 dirige le premier faisceau incident 21 vers une première zone 11 de l'échantillon, et, respectivement, le deuxième faisceau incident 22 vers une deuxième zone 12 de l'échantillon. Dans le sens retour, le système optique 14 combiné à la lame séparatrice 24 renvoie le premier faisceau réfléchi 31 et le deuxième faisceau réfléchi 32 vers le système de détection de l'interféromètre polarimétrique différentiel 50.

Simultanément, le système optique 14 combiné à la lame séparatrice 24 transmet un faisceau lumineux 71 vers la caméra de visualisation du système d'imagerie 70. Le faisceau lumineux 71 est formé par réflexion sur une surface étendue de l'échantillon comprenant de préférence la première zone 11 et la deuxième zone 12. La caméra de visualisation forme ainsi l'image de la surface de l'échantillon.

Le dispositif de caméra polarimétrique permet ainsi de mesurer précisément la profondeur de gravure entre la première zone 11 et la deuxième zone 12 de l'échantillon, tout en fournissant une image d'une surface étendue de l'échantillon.

REVENDICATIONS

1. Méthode de mesure de profondeur de gravure en fonction du temps par interférométrie polarimétrique différentielle comprenant les étapes suivantes :

- 5 - séparation d'un faisceau lumineux (2) en un premier faisceau incident (21) et un deuxième faisceau incident (22), le premier faisceau incident (21) étant dirigé vers une première zone (11) d'un échantillon (10) exposée à un traitement de gravure pour former un premier faisceau réfléchi (31) et, respectivement, le deuxième faisceau incident (22) étant dirigé vers une deuxième zone (12) de l'échantillon pour former un
- 10 deuxième faisceau réfléchi (32),
- recombinaison du premier faisceau réfléchi (31) et du deuxième faisceau réfléchi (32) pour former un faisceau interférométrique,
- séparation en polarisation du faisceau interférométrique en au moins une première composante de polarisation (35) et une deuxième composante de polarisation
- 15 (37) orthogonales entre elles ;
- détection, en fonction du temps (t), sur un intervalle de temps (t₀, t₁), d'un premier signal d'intensité interférométrique relatif à la première composante de polarisation (35) et d'un deuxième signal d'intensité interférométrique relatif à la deuxième composante de polarisation (37) ;
- 20 - calcul d'un premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel en fonction de combinaisons linéaires du premier signal d'intensité interférométrique et du deuxième signal d'intensité interférométrique;
- calcul d'une première fonction d'enveloppe inférieure et d'une première fonction d'enveloppe supérieure du premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel sur l'intervalle de temps (t₀, t₁);
- 25 - détermination d'une première fonction de décalage égale à une moitié d'une somme de la première fonction d'enveloppe inférieure et de la première fonction d'enveloppe supérieure à chaque instant (t) de l'intervalle de temps (t₀, t₁) ;
- détermination d'une première fonction de normalisation égale à une moitié
- 30 d'une différence entre la première fonction d'enveloppe inférieure et la première fonction d'enveloppe supérieure chaque instant (t) de l'intervalle de temps (t₀, t₁) ;
- application de la première fonction de décalage et de la première fonction de normalisation au premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel pour former une première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée
- 35 localement à chaque instant (t) de l'intervalle de temps (t₀, t₁), et

- extraction d'une mesure de déphasage optique en fonction du temps sur ledit intervalle de temps (t_0 , t_1), à partir de la première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement ;

5 - calcul de la profondeur de gravure en fonction du temps à partir de la mesure de déphasage optique.

2. Méthode selon la revendication 1 dans laquelle l'étape de séparation en polarisation du faisceau interférométrique génère en outre une troisième composante de polarisation (36) et une quatrième composante de polarisation (38), lesdites troisième et quatrième composantes de polarisation étant orthogonales entre elles, et
10 les première, deuxième, troisième et quatrième composantes de polarisation étant indépendantes les unes des autres, et la méthode comprenant en outre les étapes suivantes :

- détection, en fonction du temps (t), sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1), d'un troisième signal d'intensité interférométrique relatif à la troisième composante de
15 polarisation et d'un quatrième signal d'intensité interférométrique relatif à la quatrième composante de polarisation ;

- calcul d'un deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel en fonction de combinaisons linéaires du troisième signal d'intensité interférométrique et du quatrième signal d'intensité interférométrique ;

20 - calcul d'une deuxième fonction d'enveloppe inférieure et d'une deuxième fonction d'enveloppe supérieure du deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel ;

- détermination d'une deuxième fonction de décalage égale à une moitié d'une somme de la deuxième fonction d'enveloppe inférieure et de la deuxième fonction
25 d'enveloppe supérieure à l'instant t ;

- détermination d'une deuxième fonction de normalisation égale à une moitié d'une différence entre la deuxième fonction d'enveloppe inférieure et la deuxième fonction d'enveloppe supérieure à l'instant t ;

- application de la deuxième fonction de décalage et de la deuxième fonction
30 de normalisation au deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel pour former une deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement, et dans lequel

- l'extraction de la mesure de déphasage optique en fonction du temps sur ledit intervalle de temps (t_0 , t_1) est effectuée à partir d'un rapport entre la première
35 fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement et la

deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement.

3. Méthode selon la revendication 2 dans laquelle la troisième composante de polarisation et la quatrième composante de polarisation sont choisies parmi des composantes de polarisation linéaires ou, respectivement, circulaires.

5 4. Méthode selon l'une des revendications 2 à 3 dans laquelle le deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel est égal à une différence entre le troisième signal d'intensité interférométrique et le quatrième signal d'intensité interférométrique divisée par une somme du troisième signal d'intensité interférométrique et du quatrième signal d'intensité interférométrique.

10 5. Méthode selon l'une des revendications 1 à 4 dans laquelle la première composante de polarisation et la deuxième composante de polarisation sont choisies parmi des composantes de polarisation linéaires ou, respectivement, circulaires.

15 6. Méthode selon l'une des revendications 1 à 5 dans laquelle le premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel est égal à une différence entre le premier signal d'intensité interférométrique et le deuxième signal d'intensité interférométrique divisée par une somme du premier signal d'intensité interférométrique et du deuxième signal d'intensité interférométrique.

20 7. Méthode selon l'une des revendications 1 à 6 dans laquelle l'étape de calcul d'une première, et/ou respectivement deuxième, fonction d'enveloppe inférieure comporte une étape d'interpolation linéaire ou polynomiale et/ou dans laquelle l'étape de calcul d'une première, et/ou respectivement deuxième, fonction d'enveloppe supérieure comporte une autre étape d'interpolation linéaire ou polynomiale.

25 8. Méthode selon l'une des revendications 1 à 7 comprenant en outre une étape de filtrage du premier signal d'intensité interférométrique et/ou, respectivement, du deuxième signal d'intensité interférométrique, préalable à l'étape de calcul de fonction d'enveloppe.

9. Interféromètre polarimétrique différentiel comprenant :

- une source de lumière (1) adaptée pour générer un faisceau lumineux (2) ;
- un séparateur optique de faisceau (3) adapté pour séparer le faisceau

30 lumineux (2) en un premier faisceau incident (21) et un deuxième faisceau incident (22), le premier faisceau incident (21) étant dirigé vers une première zone (11) d'un échantillon exposée à un traitement de gravure pour former un premier faisceau réfléchi (31) et, respectivement, le deuxième faisceau incident (22) étant dirigé vers une deuxième zone (12) de l'échantillon pour former un deuxième faisceau réfléchi (32),

35 - un combineur de faisceau (3) adapté pour recombinaison le premier faisceau

réfléchi (31) et le deuxième faisceau réfléchi (32) pour former un faisceau interférométrique,

5 - un séparateur de polarisation (52) adapté pour séparer le faisceau interférométrique en au moins une première composante de polarisation (35) et une deuxième composante de polarisation (37), la première composante de polarisation et la deuxième composante de polarisation étant orthogonales entre elles ;

10 - un premier détecteur (81) adapté pour recevoir la première composante de polarisation (35) et générer un premier signal d'intensité interférométrique en fonction du temps (t) sur un intervalle de temps (t_0 , t_1) et un deuxième détecteur (82) adapté pour recevoir la deuxième composante de polarisation (37) et générer un deuxième signal d'intensité interférométrique en fonction du temps (t) sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1);

caractérisé en ce que l'interféromètre polarimétrique différentiel comporte un calculateur (91, 92, 95) adapté pour :

15 - calculer un premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel en fonction de combinaisons linéaires du premier signal d'intensité interférométrique et du deuxième signal d'intensité interférométrique;

20 - calculer une première fonction d'enveloppe inférieure et une première fonction d'enveloppe supérieure du premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1) ;

- déterminer une première fonction de décalage égale à chaque instant t à une moitié d'une somme de la première fonction d'enveloppe inférieure et de la première fonction d'enveloppe supérieure ;

25 - déterminer une première fonction de normalisation égale, à chaque instant t de l'intervalle de temps (t_0 , t_1), à une moitié d'une différence entre la première fonction d'enveloppe inférieure et la première fonction d'enveloppe supérieure ;

30 - appliquer la première fonction de décalage et la première fonction de normalisation au premier signal d'interférométrie polarimétrique différentiel pour former une première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement, et

- extraire une mesure de déphasage optique en fonction du temps sur ledit intervalle de temps (t_0 , t_1), à partir de la première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement ;

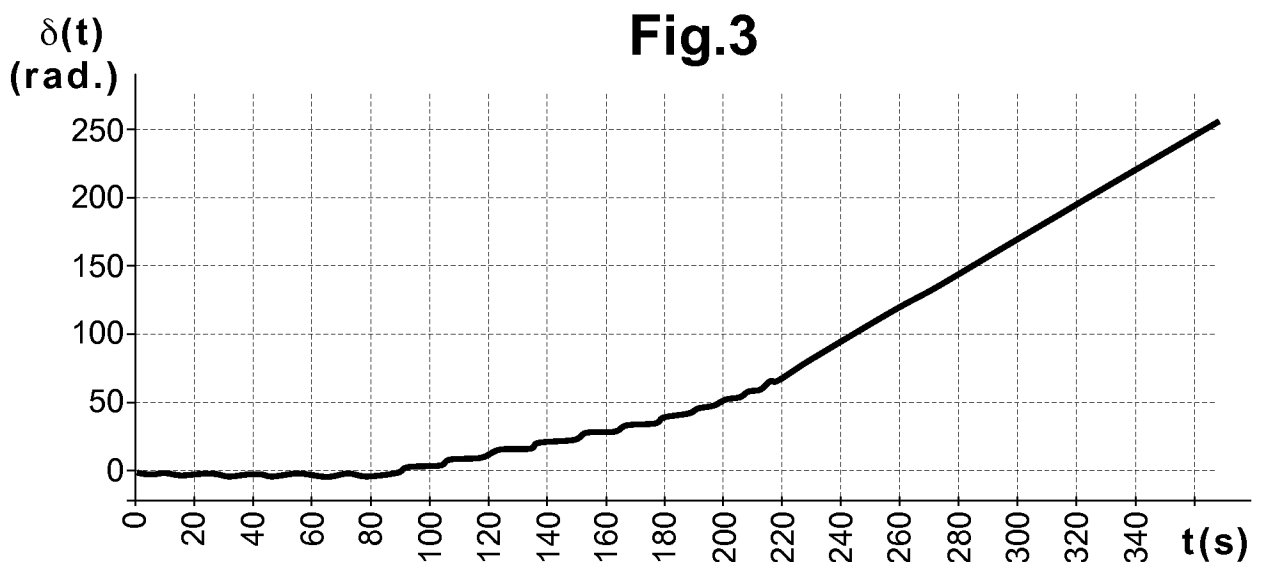
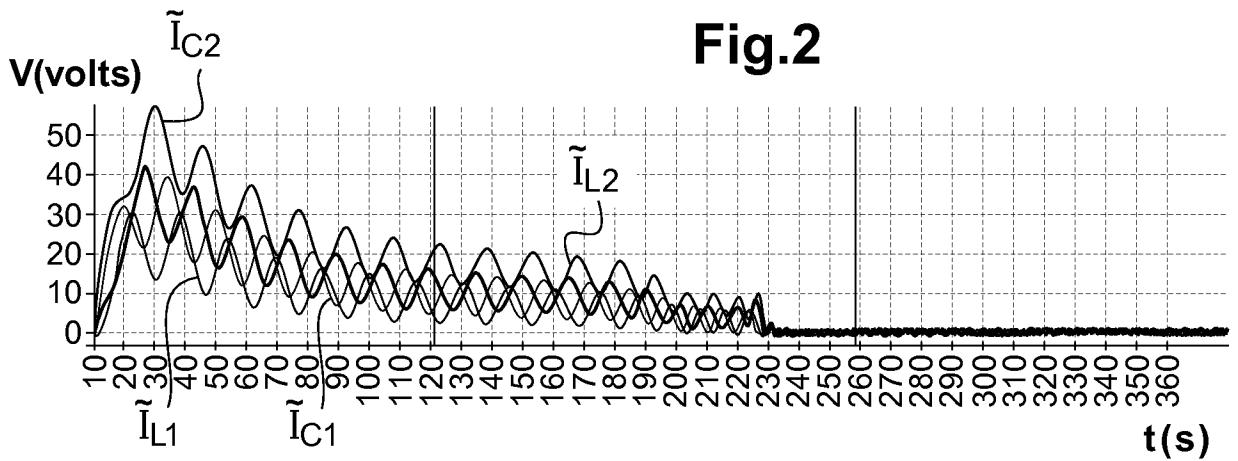
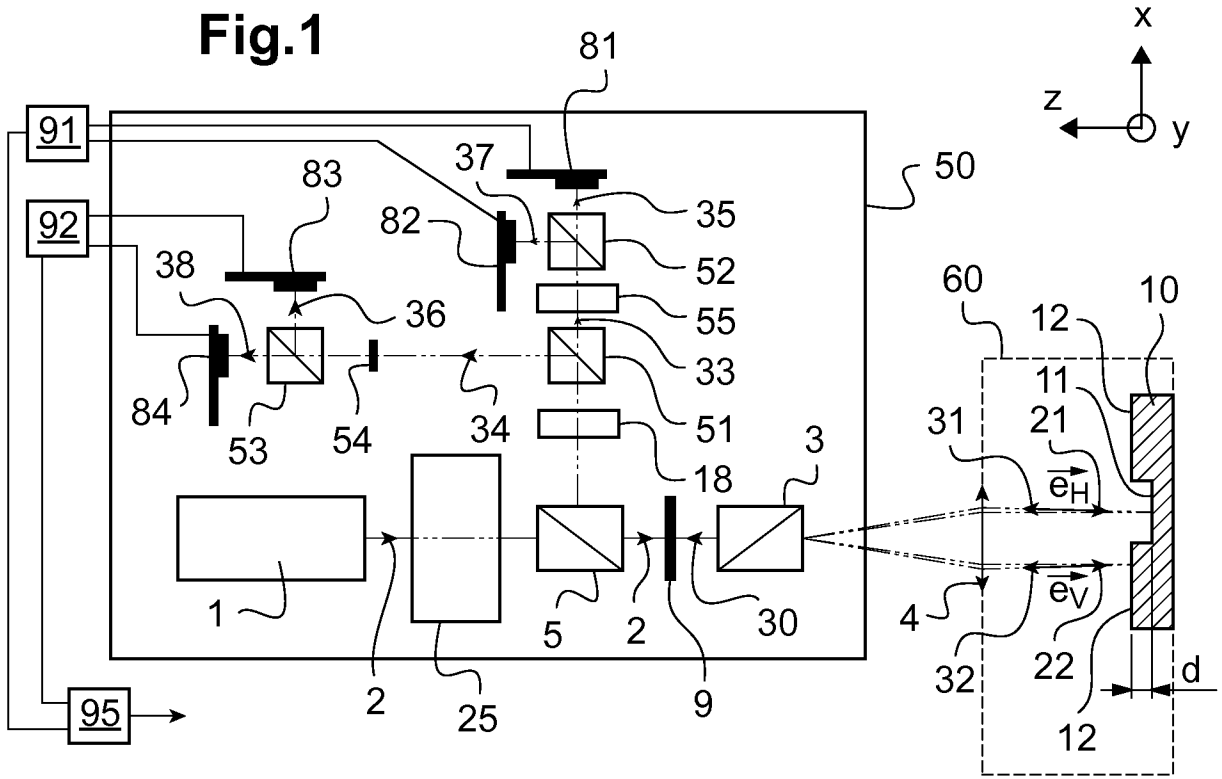
- calculer la profondeur de gravure en fonction du déphasage optique.

35 10. Interféromètre polarimétrique différentiel selon la revendication 9

comprenant en outre :

- un autre séparateur de polarisation (53) adapté pour séparer le faisceau interférométrique en une troisième composante de polarisation (36) et une quatrième composante de polarisation (38), la troisième composante de polarisation (36) et la quatrième composante de polarisation (38) étant orthogonales entre elles et étant indépendantes de la première composante de polarisation (35) et de la deuxième composante de polarisation (37) ;
 - un troisième détecteur (83) adapté pour recevoir la troisième composante de polarisation (36) et générer un troisième signal d'intensité interférométrique en fonction du temps (t) sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1) et un quatrième détecteur (84) adapté pour recevoir la quatrième composante de polarisation (38) et générer un quatrième signal d'intensité interférométrique en fonction du temps (t) sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1); et dans lequel le calculateur est adapté pour :
 - calculer un deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel en fonction de combinaisons linéaires du troisième signal d'intensité interférométrique et du quatrième signal d'intensité interférométrique;
 - calculer une deuxième fonction d'enveloppe inférieure et une deuxième fonction d'enveloppe supérieure du deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel sur l'intervalle de temps (t_0 , t_1) ;
 - déterminer une deuxième fonction de décalage égale à chaque instant t à une moitié d'une somme de la deuxième fonction d'enveloppe inférieure et de la deuxième fonction d'enveloppe supérieure ;
 - déterminer une deuxième fonction de normalisation égale, à chaque instant t de l'intervalle de temps (t_0 , t_1), à une moitié d'une différence entre la deuxième fonction d'enveloppe inférieure et la deuxième fonction d'enveloppe supérieure ;
 - appliquer la deuxième fonction de décalage et la deuxième fonction de normalisation au deuxième signal d'interférométrie polarimétrique différentiel pour former une deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement, et
 - effectuer l'extraction de la mesure de déphasage optique en fonction du temps sur ledit intervalle de temps (t_0 , t_1) à partir d'un rapport entre la première fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement et de la deuxième fonction d'interférométrie polarimétrique différentielle normalisée localement.
11. Appareil de spectrométrie de décharge lumineuse comprenant un interféromètre polarimétrique différentiel selon l'une des revendications 9 à 10.

12. Dispositif de contrôle de gravure comprenant un interféromètre polarimétrique différentiel selon l'une des revendications 9 à 10 combiné à une caméra de visualisation adaptée pour former une image de la première zone et de la deuxième zone de l'échantillon.



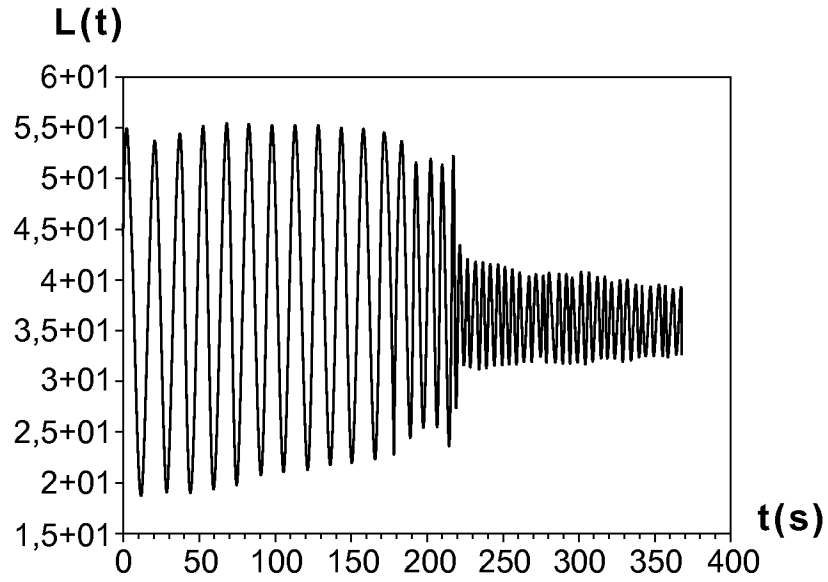


Fig.4

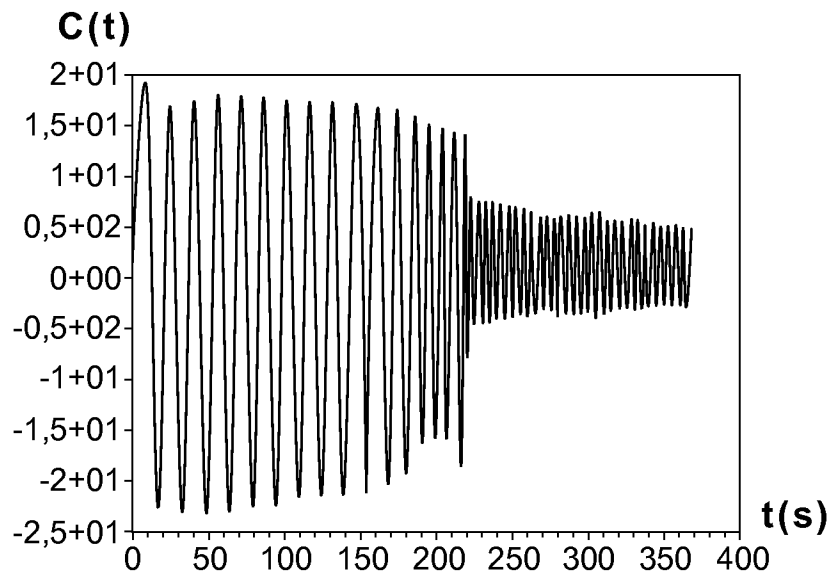


Fig.5

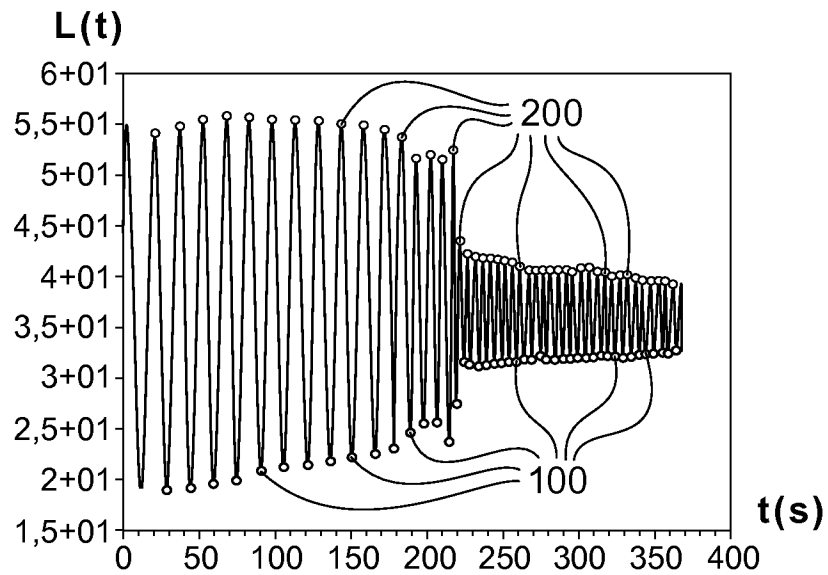


Fig.6

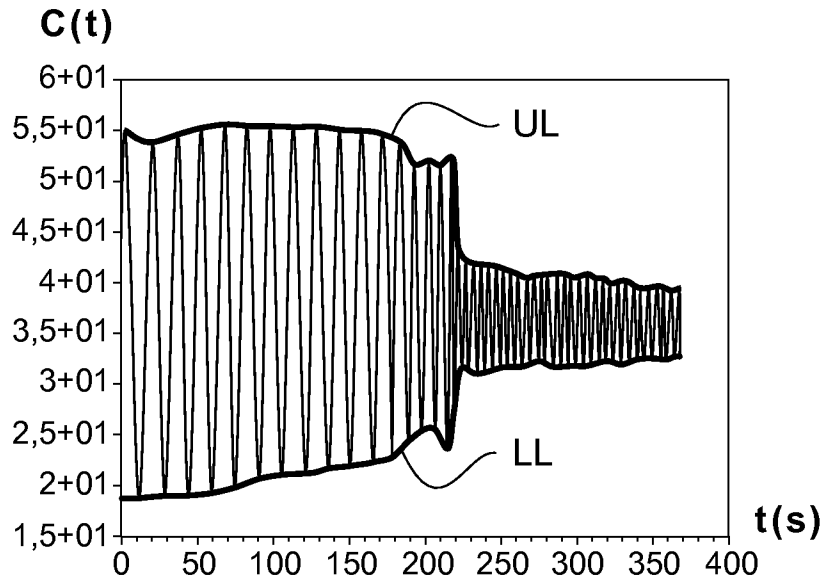


Fig.7

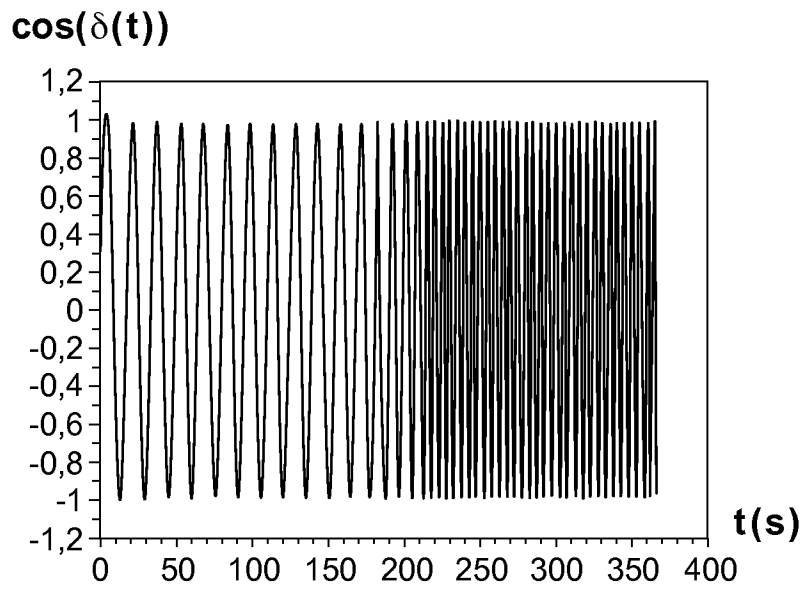


Fig.8

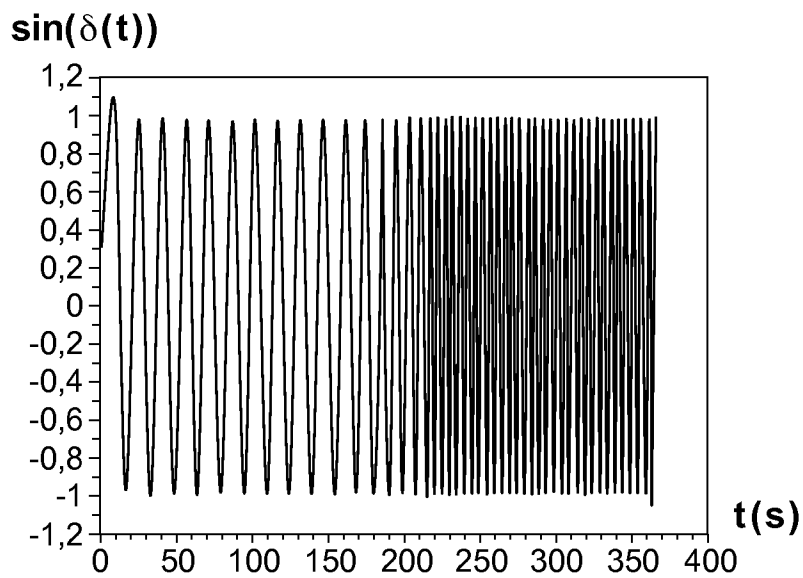
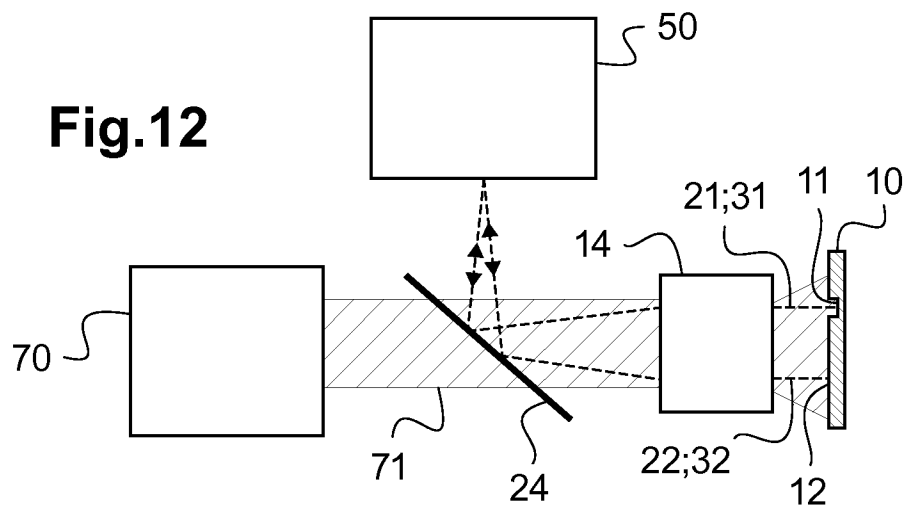
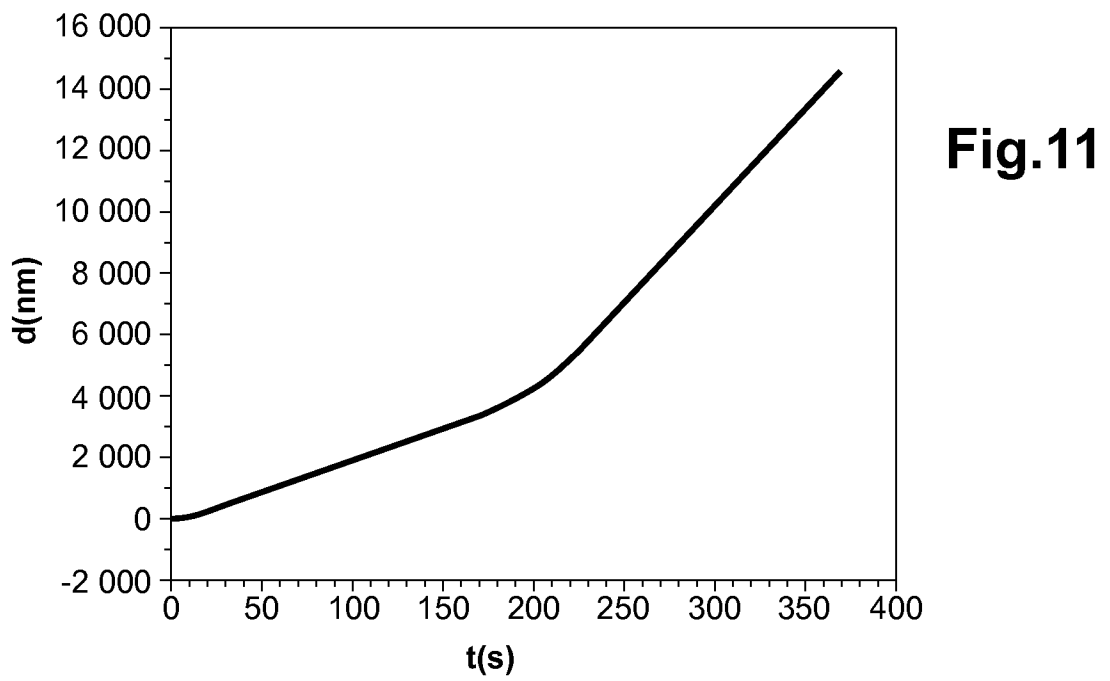
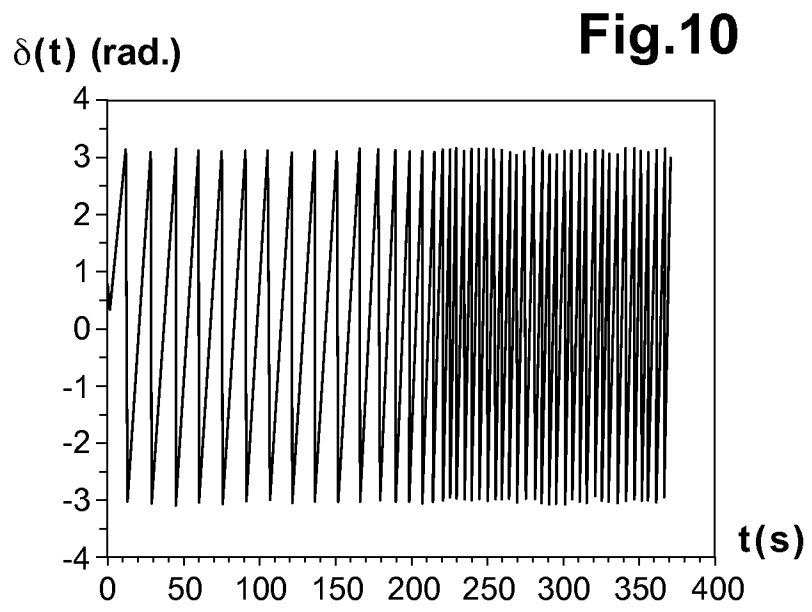


Fig.9



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2017/053589

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. G01B9/02 G01B11/22 H01L21/66
 ADD.
 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
 Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 G01B H01L
 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
 EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 3 020 684 A1 (HORIBA JOBIN YVON SAS [FR]) 6 November 2015 (2015-11-06) cited in the application page 6, line 23 - page 16, line 31; figures 1-4	1-12
A	PASCAL AMARY ET AL: "<title>New sensor for real-time trench depth monitoring in micromachining applications</title>", PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 3874, 30 August 1999 (1999-08-30), pages 205-217, XP055128888, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.361223 abstract pages 206-208	1-12

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 5 February 2018	Date of mailing of the international search report 15/02/2018
---	---

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Trique, Michael
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2017/053589

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6 259 530 B1 (MONSALLUT PIERRE [FR]) 10 July 2001 (2001-07-10) column 6, lines 18-62; claim 1; figures 1-2 -----	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2017/053589

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
FR 3020684	A1	06-11-2015	CN 106662531 A	10-05-2017
			EP 3137881 A1	08-03-2017
			FR 3020684 A1	06-11-2015
			JP 2017516089 A	15-06-2017
			US 2017045457 A1	16-02-2017
			WO 2015166186 A1	05-11-2015

US 6259530	B1	10-07-2001	DE 69923489 D1	10-03-2005
			DE 69923489 T2	16-02-2006
			EP 0942261 A1	15-09-1999
			FR 2776061 A1	17-09-1999
			JP H11325831 A	26-11-1999
			US 6259530 B1	10-07-2001

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2017/053589

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01B9/02 G01B11/22 H01L21/66 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01B H01L		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	FR 3 020 684 A1 (HORIBA JOBIN YVON SAS [FR]) 6 novembre 2015 (2015-11-06) cité dans la demande page 6, ligne 23 - page 16, ligne 31; figures 1-4	1-12
A	----- PASCAL AMARY ET AL: "<title>New sensor for real-time trench depth monitoring in micromachining applications</title>", PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 3874, 30 août 1999 (1999-08-30), pages 205-217, XP055128888, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.361223 abrégé pages 206-208 ----- -/--	1-12
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents		
<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets	
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale	
5 février 2018	15/02/2018	
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé	
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Trique, Michael	

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>US 6 259 530 B1 (MONSALLUT PIERRE [FR]) 10 juillet 2001 (2001-07-10) colonne 6, lignes 18-62; revendication 1; figures 1-2</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-12

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2017/053589

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 3020684	A1	06-11-2015	CN 106662531 A	10-05-2017
			EP 3137881 A1	08-03-2017
			FR 3020684 A1	06-11-2015
			JP 2017516089 A	15-06-2017
			US 2017045457 A1	16-02-2017
			WO 2015166186 A1	05-11-2015

US 6259530	B1	10-07-2001	DE 69923489 D1	10-03-2005
			DE 69923489 T2	16-02-2006
			EP 0942261 A1	15-09-1999
			FR 2776061 A1	17-09-1999
			JP H11325831 A	26-11-1999
			US 6259530 B1	10-07-2001
