

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 25.07.11.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 01.02.13 Bulletin 13/05.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES — FR.

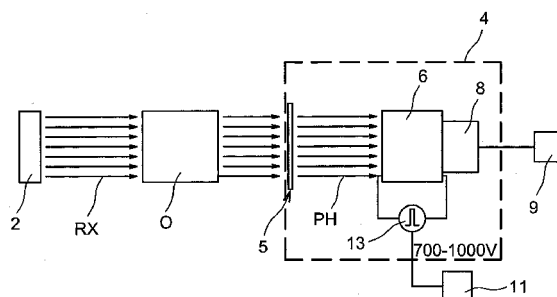
72 Inventeur(s) : BLEUET PIERRE et JALABERT
DENIS.

73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES.

74 Mandataire(s) : BREVALEX Société à responsabilité
limitée.

54 SYSTEME D'IMAGERIE POUR L'IMAGERIE D'OBJETS A MOUVEMENT RAPIDE.

57 Système d'imagerie destiné à l'imagerie d'objets pré-
sentant un mouvement rapide, comportant une source de
rayons X (2), un écran scintillateur (5), un obturateur (6, 6',
106) et un détecteur (8) du faisceau émis par l'obturateur (6,
6', 106), une unité de traitement (9) reliée au détecteur (8),
l'obturateur (6, 6', 106) étant disposé entre l'écran scintilla-
teur (5) et le détecteur (8), et un support (29) pour l'objet à
observer disposé en aval de la source de rayon X (2) et en
amont de l'écran scintillateur (5), l'obturateur (6, 6', 106)
étant un obturateur pilotable à des fréquences élevées, par
exemple supérieures à environ 1 kHz, l'obturateur (6, 6',
106) étant fixe et la transmission du signal provenant de
l'écran scintillateur vers le détecteur étant commandé par
des moyens de polarisation électrique (13) contrôlés par
une unité de commande (11).



SYSTEME D'IMAGERIE POUR L'IMAGERIE D'OBJETS A MOUVEMENT RAPIDE

DESCRIPTION

5 DOMAINE TECHNIQUE ET ART ANTÉRIEUR

La présente invention se rapporte à un système d'imagerie pour l'imagerie d'objets ayant un mouvement rapide, en particulier les systèmes microélectromécaniques MEMS (Microelectromechanical
10 Systems) et les systèmes nanoélectromécaniques (Nanoelectromechanical Systems).

Parmi les MEMS et NEMS, on trouve des oscillateurs dont le mouvement est périodique, il s'agit par exemple des commutateurs RF ou de certains
15 gyroscopes. Ces MEMS et NEMS sont des objets dit «enterrés», c'est-à-dire qu'ils sont enfermés dans du silicium. L'observation au moyen de la microscopie électronique, l'optique, la caractérisation électrique ou la vibrométrie laser ne fonctionne pas : la
20 protection en silicium est opaque aux électrons et aux photons lumineux et la caractérisation électrique ne fournit pas d'images.

A des fins de simplicité, les MEMS ou les NEMS seront tous désignés par la suite "microsystèmes".

25 Or, on cherche à étudier leur comportement lorsque leurs parties mobiles oscillent, pour comprendre leur fonctionnement et les raisons pour lesquelles ils peuvent présenter un dysfonctionnement.

Par exemple, il a été observé, en détectant des microsystèmes ne fonctionnant plus, un transfert de matière entre la partie fixe et la partie mobile.

5 Cependant le déroulement de ce transfert de matière n'a pu être observé. Dans le cas de commutateurs RF, on a observé la présence de nanofils provoquant un court-circuit, mais le phénomène d'apparition de ces nanofils reste également inobservé.

10 Par conséquent, l'observation en mouvement des microsystèmes serait utile pour pouvoir optimiser leurs structures.

 Afin d'observer des objets enterrés, l'imagerie par rayons X peut être utilisée. Par exemple, il existe des systèmes d'imagerie par rayons X
15 comportant une source rayons X, un obturateur en amont de l'objet à observer et des moyens de détection des rayons transmis par l'objet. L'obturateur est un obturateur mécanique en plomb afin d'arrêter totalement les rayons X en dehors de la période d'exposition,
20 cependant. L'obturateur est déplacé pour interrompre ou permettre l'illumination de l'objet. Du fait de l'inertie de l'obturateur et pour des raisons mécaniques et de stabilité, de tels obturateurs ne sont pas utilisables pour les fréquences de fonctionnement
25 des microsystèmes qui sont comprises entre environ 1 kHz et environ 1 GHz.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

 C'est par conséquent un but de la présente invention d'offrir un système d'imagerie permettant
30 d'imager des microsystèmes enterrés à mouvement rapide.

Le but de la présente invention est atteint par un système comportant une source de rayons X, un écran scintillateur pour convertir les rayons X en rayonnement visible, un détecteur et un obturateur
5 fixes disposés entre l'écran scintillateur et le détecteur, l'obturateur étant apte à passer d'un état passant à un état non passant avec une fréquence supérieure au kHz et une unité de commande de l'obturateur.

10 L'obturateur peut être formé par une galette de microcanaux, qui offre en plus d'une fréquence de commutation très élevée, l'avantage d'amplifier le signal transmis par le microsystème. On peut atteindre des temps d'exposition entre 10 ns et
15 100 ns.

En variante, l'obturateur peut être formé par un miroir à cristaux liquide polarisé. On peut atteindre des temps d'exposition de 1 ms.

Ce système permet une détection
20 stroboscopique dans le cas de microsystèmes à mouvement périodique.

Ce système permet également d'obtenir une radiographie du microsystème à un instant donné en synchronisant le mouvement du microsystème et l'état de
25 l'obturateur.

Grâce au système selon la présente invention, il est également possible d'obtenir une observation 4D (3 dimensions de l'espace et 1 dimension temporelle) du microsystème en mettant en œuvre une
30 observation par tomographie.

La présente invention a alors pour objet un système d'imagerie destiné à l'imagerie d'objets présentant un mouvement rapide, comportant une source de rayons X , un écran scintillateur, un obturateur et
5 un détecteur du faisceau émis par l'obturateur, une unité de traitement reliée au détecteur, l'obturateur étant disposé entre l'écran scintillateur et le détecteur, et un support pour l'objet à observer disposé en aval de la source de rayon X et en amont de
10 l'écran scintillateur, l'obturateur étant un obturateur pilotable à des fréquences élevées, par exemple supérieures à environ 1 kHz, l'obturateur étant fixe et la transmission du signal provenant de l'écran scintillateur vers le détecteur étant commandé par des
15 moyens de polarisation électrique contrôlés par une unité de commande.

Dans un exemple de réalisation, l'obturateur comporte au moins une galette de microcanaux. En variante, l'obturateur est formé par
20 deux galettes de microcanaux disposés l'une derrière l'autre.

Une polarisation résiduelle peut être appliquée à l'une des faces d'une galette.

Avantageusement, l'unité de commande
25 contrôle les moyens de polarisation de sorte qu'ils envoient des impulsions de tension à une fréquence comprise entre 1Hz et 20 MHz. La durée d'une impulsion est par exemple comprise entre 10 ns et 100 ns.

Dans un autre exemple de réalisation,
30 l'obturateur comporte au moins un miroir à cristaux liquides orienté par rapport à l'écran scintillateur et

par rapport au détecteur de sorte à réfléchir le faisceau provenant de l'écran scintillateur vers le détecteur lorsqu'il est polarisé. L'unité de commande peut contrôler les moyens de polarisation de sorte
5 qu'ils envoient au miroir à cristaux liquides des impulsions de tension à une fréquence inférieure à 1kHz. Par exemple, la durée d'une impulsion est de l'ordre de 1 ms.

Avantageusement, le support est apte à
10 pivoter suivant un pas angulaire donné autour d'un axe perpendiculaire à l'axe d'émission de la source de rayons X. Le pas angulaire peut être variable.

Selon une caractéristique additionnelle, l'unité de commande peut piloter le mouvement du
15 microsystème. L'unité de commande peut comporter des moyens pour mettre en forme des signaux de pilotage de l'objet avec un retard programmable, lesdits signaux mis en forme servant à la commande des moyens de polarisation.

20 Par exemple, le détecteur est un dispositif à transfert de charge. En variante, le détecteur est un capteur CMOS.

La présente invention a également pour objet un procédé d'imagerie mettant en œuvre un système
25 d'imagerie selon la présente invention, dans lequel l'objet à un mouvement périodique et le système est utilisé pour réaliser une détection stroboscopique, de manière à obtenir des images à plusieurs états de l'objet.

30 La présente invention a également pour objet un procédé d'imagerie mettant en œuvre un système

d'imagerie selon la présente invention, dans lequel l'unité de commande contrôle les moyens de polarisation en fonction du signal pilotant le mouvement de l'objet.

L'unité de commande peut former un signal
5 de commande des moyens de polarisation à partir du signal de pilotage de l'objet en introduisant un retard programmable, la durée du retard est modifiée de sorte à imager plusieurs états de l'objet.

L'objet peut être pivoté autour d'un axe
10 perpendiculaire à l'axe d'émission de rayons X de sorte à réaliser des images de l'objet dans différentes positions angulaires. Le pas angulaire peut être variable.

Le procédé d'imagerie peut comportant :

15 - l'étape de reconstruction mathématique des images en trois dimensions de l'objet à chaque position angulaire.

- l'étape de concaténation des images en trois dimensions.

20 Par exemple, l'objet imagé par le procédé d'imagerie est un système microélectromécanique ou un système nanoélectromécanique.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à
25 l'aide de la description qui va suivre et des dessins en annexe, sur lesquels :

- la figure 1A est une représentation schématique d'un exemple de réalisation d'un système d'imagerie selon l'invention, l'obturateur étant formé
30 par une galette de microcanaux,

- la figure 1B est une représentation d'une variante de du système de la figure 1, dans laquelle l'obturateur comporte deux galettes de microcanaux,

5 - la figure 2 est une représentation schématique d'un autre exemple de réalisation d'un système d'imagerie selon l'invention, l'obturateur étant formé par un miroir à cristaux liquide,

10 - les figures 3A et 3B sont des représentations graphiques respectivement du mouvement périodique d'un microsystème et de la commande de l'obturateur en fonction du temps afin de réaliser une détection stroboscopique,

15 - les figures 4A et 4B sont des représentations graphiques respectivement du mouvement périodique d'un microsystème et d'une autre commande de l'obturateur en fonction du temps afin de réaliser une détection stroboscopique,

20 - les figures 5A et 5B sont des représentations graphiques respectivement d'un signal d'excitation d'un microsystème imposé par l'unité de commande et du signal de commande de l'obturateur en fonction du temps, la commande de l'obturateur étant synchronisée avec le mouvement du microsystème,

25 - la figure 6 est un organigramme des étapes d'un procédé de fonctionnement du système d'imagerie selon l'invention permettant de réaliser de l'imagerie 4D,

30 - la figure 7 représente schématiquement les étapes d'enregistrement effectuées suite au déroulement des étapes de l'organigramme de la figure 6,

- la figure 8 est une représentation schématique de la rotation imprimée à l'objet à observer dans le cas où celui-ci présente un grand rapport de forme,

5 - la figure 9 est une représentation schématique de la chaîne de mesure pour réaliser l'imagerie 4D avec le système selon l'invention.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

10 Sur la figure 1A, on peut voir une représentation schématique un d'un système d'imagerie selon la présente invention comportant une source 2 de rayons X destinée à être disposée en amont de l'objet 0 à illuminer, un ensemble 4 de collecte des rayons X, désignés RC sur les figures, transmis par l'objet 0.

15 Dans la description qui va suivre, les images obtenues par le système selon l'invention seront désignées "radiographie", et sur les dessins seront désignées par "R".

20 L'ensemble 4 comporte un écran scintillateur 5 convertissant les rayons X en lumière visible, un obturateur 6 et une optique 8 de collecte et d'enregistrement numérique de la lumière visible transmise par l'objet et l'obturateur et une électronique rapide ou unité de commande 11 pour
25 commander l'obturateur 6. L'unité de commande 11 contrôle également l'actionnement du microsystème. L'actionnement du microsystème peut être thermique, électrostatique ou magnétique.

30 L'optique de détection est par exemple formée par un capteur de type dispositif à transfert de

charge ou capteur **CCD**: ("Charge-Coupled Device" en terminologie anglo-saxonne",) muni d'un scintillateur qui convertit les électrons en rayonnement visible. En variante, on pourrait utiliser un détecteur d'électron à conversion direct. Ces capteurs sont bien connus de l'homme du métier et sont par exemple décrits dans le document US 7 888 781.

En variante encore, on pourrait utiliser des capteurs CMOS qui présentent un temps de lecture plus court que les capteurs CCD, cependant ils ont une moins bonne dynamique. L'optique de détection est reliée à l'unité de traitement 9 à qui les images sont envoyées.

Dans l'exemple représenté et de manière avantageuse, l'obturateur 6 est formé par une galette de microcanaux ("Microchannel Plate" (MCP) en terminologie anglo-saxonne). Une MCP est une galette en silicium percée d'un grand nombre de microcanaux, dont la taille typique est de 10 μm . Cette galette est mise sous une tension de plusieurs centaines de volts, de manière à ce que toute particule incidente dans un microcanal et qui heurte la paroi crée une gerbe d'électrons qui sont eux-mêmes accélérés et canalisés le long du microcanal. Une MCP permet donc d'amplifier les charges. L'article *Charles P. Beetz, Robert Boerstler, John Steinbeck, Bryan Lemieux* "David R. Winn *"Silicon-micromachined microchannel plates"; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 442 (2000) 443-451* décrit de telles galettes. La mise en œuvre d'une ou plusieurs galettes de microcanaux est particulièrement adaptée à l'observation de

microsystèmes, puisque les canaux ont un diamètre de l'ordre de 10 μm , dimension qui est cohérente avec la résolution d'observation des systèmes MEMS et NEMS.

Lorsque la galette est polarisée, elle
5 convertit les photons visibles (symbolisés par des flèches et désignés PH) et UV provenant de l'écran scintillateur en électrons (symbolisés par des flèches et désignés e sur la figure 1B) et amplifie le courant électronique envoyé dans le capteur CCD. En l'absence
10 de polarisation, la galette est opaque à ces mêmes rayonnements.

Le système d'imagerie comporte un générateur de tension 13 pour polariser l'obturateur. Les impulsions en tension étant de l'ordre de 700 V
15 à 1000 V.

Par exemple, l'unité de commande polarise la galette 6 par une tension comprise entre 700 V et 1100 V pendant des temps très courts δ de l'ordre de 10 ns à 100 ns, δ étant le temps d'exposition,
20 contrôlant le temps d'acquisition de l'image.

Une polarisation résiduelle de l'ordre de 100V peut être appliquée sur l'une des faces de la galette pour éliminer les charges créées par le rayonnement optique dans la galette lors des phases
25 d'obturation.

Cette acquisition d'image peut se faire à un rythme très lent, par exemple à une fréquence de l'ordre de 1 Hz, jusqu'à des fréquences rapides de l'ordre de 2 - 20 MHz, ce qui correspond à $f \sim 1/2\delta$. Outre son
30 fonctionnement sur une gamme de fréquence très étendue,

la galette de microcanaux présente l'avantage d'amplifier le courant électronique envoyé au capteur.

Comme nous le verrons par la suite, cette fréquence d'acquisition n'est pas nécessairement régulière et peut être commandée par un générateur extérieur. En particulier, on peut choisir comme commande la fréquence qui pilote l'oscillation du microsystème, en lui appliquant un retard réglable.

Sur la figure 1B, on peut voir représenté une variante du système de la figure 1A, dans laquelle l'obturateur est formé de deux galettes de microcanaux en série, chacune amplifiant le signal d'entrée, ce qui permet d'améliorer le gain. La galette amont est polarisée par le générateur d'impulsion 13 et une polarisation résiduelle est appliquée à la galette aval par des moyens 15. Les deux galettes forment un seul et même obturateur.

Sur la figure 2, on peut voir un autre exemple de système d'imagerie dans lequel l'obturateur 106 est formé par un miroir à cristaux liquides polarisé. En fonction de la polarisation, l'image visible envoyée par l'écran scintillateur est réfléchie ou non par le miroir vers le capteur CCD. Le temps d'exposition minimal peut être de l'ordre de 1 ms. Dans ce cas, le CCD reçoit directement des photons, et non des électrons. Dans le cas d'un miroir, il s'agit d'un capteur CCD de type classique avec une région photoactive qui convertit les photons visibles en électrons, ensuite les charges créées sont lues et l'image est ainsi formée. Ce capteur est bien connu de

l'homme du métier et est par exemple décrit dans le document US 4 996 413.

Ce système d'imagerie est donc particulièrement intéressant dans le cas de
5 microsystemes à mouvement lent.

Nous allons maintenant décrire la mise en œuvre du système d'imagerie selon l'invention pour réaliser une détection stroboscopique. Cette détection s'applique aux microsystemes ayant un mouvement
10 périodique.

Les temps de lecture des capteurs CCD sont très longs. Ainsi, afin d'imager de manière dynamique l'évolution de microsystemes ayant un mouvement périodiques, on utilise la stroboscopie. Pour cela, on
15 commande en tension l'obturateur de sorte à acquérir une radiographie à différents états du microsysteme. Le temps entre deux impulsions est au moins égal au temps de lecture et d'enregistrement du capteur CCD.

Sur la figure 3A, on peut voir représenté graphiquement la position d'un microsysteme que l'on souhaite observer en fonction du temps. Les points P1 à P4 correspondent aux instants du mouvement au cours d'une période que l'on désire observer. R1 à R4 correspondent aux radiographies prises à ces instants
20 P1 à P4.

Sur la figure 3B, sont représentées les impulsions en tension de l'obturateur envoyées par l'électronique. Chaque impulsion correspond à un instant P1 à P4 du mouvement et la durée de l'impulsion
30 représente la résolution temporelle des images.

La lecture et l'enregistrement du capteur ont lieu entre deux impulsions.

Puisque le mouvement est périodique, on peut, en enregistrant des images sur plusieurs périodes, obtenir un film du mouvement périodique du microsysteme.

Les figures 4A et 4B représentent le processus d'enregistrement séquentiel des radiographies en mode stroboscopie dans les conditions suivantes :

10 - Temps d'exposition du microsysteme aux rayons X: $\delta=10\mu s$. Ce temps détermine la résolution temporelle et correspond à la durée de l'impulsion appliquée à l'obturateur.

- Période du mouvement du microsysteme :
15 $T_{micro} = 10ms$,

- Temps de lecture et d'enregistrement du capteur CCD : $t_{lecture} = 50ms$.

La période T_p des impulsions appliquées à l'obturateur est :

20 $T_p \geq T_{micro} + \delta$, soit $T_p \geq 50,01 s$.

On obtient donc deux radiographies du microsysteme, l'une à $t = 0 s$ et l'autre à $t = 50 ms + 10 \mu s = 50,01 ms$. Dans la mesure où le mouvement du microsysteme est périodique de période 10 ms, la radiographie à $t = 50,01 ms$ est équivalente à une radiographie à $0,01 ms = 10 \mu s$.

Dans cet exemple particulier, la méthode d'acquisition permet donc d'échantillonner le mouvement du microsysteme toutes les 10 μs .

Nous allons maintenant décrire une méthode de détection du mouvement d'un microsysteme, celui-ci ayant un mouvement périodique ou non.

Sur la figure 5A, on peut voir un graphique représentant le signal d'excitation appliqué au microsysteme en fonction du temps. Les points P1' à P6' représentent les instants que l'on souhaite observer. R1' à R6' correspondent aux radiographies prises à ces instants P1' à P6'.

Cette méthode relie le signal d'excitation du microsysteme et l'obturateur. Pour cela, le signal qui pilote le microsysteme est utilisé pour commander l'obturateur. L'unité de commande émet le signal pilotant le microsysteme et met en forme ce signal en introduisant un retard programmable τ qui permet de fixer l'instant et donc l'état du microsysteme que l'on souhaite observer. On détermine la durée δ pendant laquelle l'obturateur illumine le capteur CCD. Le signal ainsi transformé est envoyé au générateur de tension.

Sur la figure 5B, on peut voir représenté le signal de commande, sous forme d'impulsions en tension, de l'obturateur formé sur la base du signal de pilotage du microsysteme, le retard τ entre le début du signal d'excitation du systeme et le point P1' à détecter et la durée δ d'illumination du capteur CCD.

Cette configuration permet d'acquérir une radiographie du microsysteme à un état déterminé.

Le choix du décalage temporel τ appliqué entre le mouvement du microsysteme et l'acquisition de

la radiographie permet d'observer l'objet dans différents lors de son mouvement.

Afin d'observer différents états du microsysteme, le retard τ est modifié.

5 Le temps entre 2 impulsions peut alors être beaucoup plus court que le temps de lecture et d'enregistrement t_R du capteur CCD. Le choix du temps de mise sous tension δ de l'obturateur permet de régler la résolution temporelle des images.

10 Sur la figure 5A, on représente la répétition de l'illumination aux instants $P2'$ à $P6'$ de sorte à observer les instants $P2'$ à $P6'$ lors desquels le microsysteme est dans le même état qu'à l'instant $P1'$. Cela revient donc à prendre six images du
15 microsysteme dans le même état. Le capteur CCD est alors exposé pendant une durée totale correspondant au nombre d'impulsions de l'obturateur pendant le temps d'exposition T_{exp} du capteur CCD, c'est-à-dire $6 \times \delta$ dans l'exemple de la figure 4B. Les 6 images sont sommées,
20 ce qui permet donc d'améliorer la qualité des images en améliorant le rapport signal sur bruit. Cette méthode s'applique aux mouvements périodiques ou répétables, un mouvement est dit répétable lorsqu'il se reproduit à l'identique mais par nécessairement de manière
25 périodique. Par exemple, dans e cas représenté, on peut considérer que le mouvement se répète huit fois successivement de manière identique.

 Grâce à l'invention, on peut donc obtenir des images $R1'$ à $R6'$ en deux dimensions de tous les
30 états du microsysteme, on peut donc obtenir un film du mouvement du microsysteme enterré. On peut donc

observer l'évolution de l'état du microsysteme au cours de son fonctionnement et observer par exemple les causes d'endommagement et/ou le phénomène de transfert de masse.

5 Nous allons maintenant décrire un système et un procédé permettant de reconstruire en 4 dimensions (3 dimensions de l'espace et la dimension temporelle). Pour cela le système est associé à une technique de détection par tomographie, le système
10 comporte alors un support pour l'objet à observer mobile en rotation autour d'un axe et apte à déplacer l'objet selon un angle donné de sorte à modifier le point de vue qu'a le capteur CCD du microsysteme.

Les images obtenues à chaque angle de vue
15 sont réalisées par détection stroboscopique ou par synchronisation entre le mouvement du microsysteme et le commande de l'obturateur.

Le support est commandé par une unité centrale qui fait pivoter le support lorsque toutes les
20 images d'un point de vue ont été prises.

Sur la figure 6, est représenté un organigramme du procédé de reconstruction 4D selon la présente invention.

Le microsysteme est positionné sur le
25 support, l'angle de rotation ϕ initial est égal à 0.

n est les nombre d'images par période du microsysteme, qui a pour valeur initiale 1.

T_{micro} est la période du microsysteme.

δ est le temps d'exposition.

30 t est le temps.

En fixant δ , on détermine l'échantillonnage du mouvement du microsysteme. En échantillonnant à δ , on souhaite faire T_{micro}/δ images par période ou un multiple de ce nombre.

5 Tout d'abord, lors d'une étape 100; le microsysteme est actionné.

Ensuite, lors d'une étape 200, une impulsion de tension est envoyée à l'obturateur pendant un temps δ .

10 Lors d'une étape 300, a lieu la lecture par le capteur CDD et l'enregistrement de l'image.

A la fin de cette étape, on vérifie dans une étape 400 si t est congru à $n\delta$ modulo T_{micro} qui s'écrit $t = n\delta [T_{\text{micro}}]$.

15 Si la réponse est négative (étape 500), le systeme attend jusqu'a ce que la condition de l'étape 400 soit vérifiée (étape 600).

Si la réponse est positive (étape 700), n est augmentée de 1 (étape 800).

20 A l'étape 900, on vérifie si n , i.e. le nombre d'images effectivement réalisées est un multiple du nombre d'images que l'on souhaite acquérir par période, i.e. l'échantillonnage choisi, on vérifie donc si $n = m \times T_{\text{micro}}/\delta$, m étant un entier positif.

25 Si la réponse est négative (étape 1000), on retourne à l'étape 200 pour faire une nouvelle image.

Si la réponse est positive (étape 1100), à l'étape 1200, l'objet est pivoté en faisant tourner le support d'un angle donné. Il peut s'agir d'un angle constant égal à $360^\circ/N_\phi$, N_ϕ étant le nombre de points de

30

vue prédéterminé. ϕ peut être variable en fonction de la forme de l'objet comme nous le verrons par la suite.

On vérifie à l'étape 1300 si l'angle dont a fait pivoter l'objet est égal à 360° . Si la réponse est positive (étape 1400), cela signifie que l'objet a fait un tour complet et que toutes les prises de vues ont été réalisées. On va alors à l'étape 1500 correspondant à la fin de l'analyse.

Si la réponse est négative (étape 1600), n reprend la valeur 1 (étape 1700) et le procédé d'analyse reprend à l'étape 200.

Sur la figure 7, on peut voir schématisée une séquence d'enregistrement des images résultant du procédé de la figure 6 et la reconstruction 4D. La séquence d'enregistrement se fait par lignes

$n_{\max}$ est le nombre d'images effectivement prises pour chaque point de vue ou angle de rotation du microsysteme; $n_{\max}$ est un multiple de T_{micro}/δ .

A partir des $n_{\max}$ images prises par angle de rotation, on fait une reconstruction mathématique de chaque état du microsysteme aux différents angles de rotation (étape 1800). Sur la base de la représentation de la figure 7, la reconstruction mathématique se fait par colonne. On obtient alors une représentation en 3 dimensions de chaque état du microsysteme, chaque état étant séparé de δ . Ces représentations sont désignées $R_{1, 3D}, R_{2, 3D}, R_{2, 3D} \dots R_{n_{\max} 3D}$.

Cette reconstruction mathématique se fait par des techniques connues de l'homme du métier, il peut s'agir de la méthode Filtered Backprojection, de la méthode Algebraic Reconstruction Technique et de

toutes leurs variations décrites par exemple dans A.C.Kak, M. Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press, 1988. Celles-ci ne seront pas décrites en détail.

5 Ensuite on effectue une concaténation des volumes en 3D (étape 2000) afin d'obtenir une représentation 4D du microsystème enterré (étape 2100).

 Sur la figure 8, on peut voir une représentation d'un objet avec une schématisation du pas angulaire variable des différentes prises de vue au
10 cours de l'acquisition, i.e. un échantillonnage angulaire irrégulier.

 Ceci est particulièrement intéressant dans le cas d'objets à grand rapport de forme, ce qui est en
15 général le cas des microsystèmes. Il est alors préférable lors du mouvement de rotation de prendre des images avec un pas angulaire très fin à certaines orientations, alors que pour d'autres orientations, le pas angulaire pourra avantageusement être choisi plus
20 grand afin de diminuer le temps d'analyse.

 Dans l'exemple représenté, l'objet 0 a une forme de parallélépipède dont l'axe longitudinal X est aligné avec l'axe de rotation du support 29. L'objet présente une épaisseur très faible par rapport à sa
25 longueur et à sa largeur. Il comporte deux faces latérales de grandes dimensions 30, parallèles à l'axe longitudinal, deux faces latérales de petites dimensions 32. Les pas angulaires sont schématisés par des points. Afin de réduire le temps d'analyse, il est
30 intéressant d'avoir un pas angulaire fin lors de l'observation des zones de transition entre les faces

30 et une face 32 pour avoir un grand nombre de prises de vue (grande densité de points) puisque la configuration observée change de manière importante sur une distance angulaire réduite, et un pas angulaire plus grand lorsque l'analyse concerne les faces 30, puisque sur une grande distance angulaire la configuration observée change peu (densité de points plus faible).

Sur la figure 9, on peut voir représenté schématiquement la partie commande et traitement du système pour réaliser une reconstruction 4D dans lequel la polarisation de l'obturateur est synchronisée avec le mouvement du microsystème, comportant un ordinateur 34 formant unité de commande et unité de traitement, qui

- contrôle le positionnement de l'objet en commandant un contrôleur de rotation 35 du support 29,

- contrôle un générateur de signaux 36 qui commande le microsystème

- contrôle l'obturateur. Un discriminateur 40 génère une impulsion désignée START sur la figure 9 sur le front montant (ou descendant) du signal pilotant le microsystème. Cette impulsion START est mise en forme avec un retard τ et une largeur δ programmable.

Le signal ainsi mis en forme est amplifié par un amplificateur 42 à une haute tension 44 également programmable appliquée directement à l'obturateur. Dans le cas d'une galette de microcanaux Cette haute tension est ajustée de façon à contrôler le gain et la galette de microcanaux.

Le capteur CCD renvoie les images collectées pendant le temps d'ouverture de la galette sur l'ordinateur, qui effectue ensuite la reconstruction 4D.

5 Avantageusement, il peut être prévu afin d'accélérer davantage l'analyse, de n'utiliser qu'un nombre limité de radiographies, inférieur au nombre théorique, et de compenser ce nombre réduit en utilisant les algorithmes itératifs ART ("Algebraic
10 Reconstruction Technique" en terminologie anglo-saxonne). Par exemple, on utilisera une centaine de projections pour un détecteur de 2000x2000 pixels au lieu des 3000 projections théoriquement nécessaires. Une telle méthode est par exemple décrite dans le
15 brevet US 2008/0205737.

REVENDICATIONS

1. Système d'imagerie destiné à l'imagerie d'objets présentant un mouvement rapide, comportant une source de rayons X (2), un écran scintillateur (5), un obturateur (6, 6', 106) et un détecteur (8) du faisceau émis par l'obturateur (6, 6', 106), une unité de traitement (9) reliée au détecteur (8), l'obturateur (6, 6', 106) étant disposé entre l'écran scintillateur (5) et le détecteur (8), et un support (29) pour l'objet à observer disposé en aval de la source de rayon X (2) et en amont de l'écran scintillateur (5), l'obturateur (6, 6', 106) étant un obturateur pilotable à des fréquences élevées, par exemple supérieures à environ 1 kHz, l'obturateur (6, 6', 106) étant fixe et la transmission du signal provenant de l'écran scintillateur vers le détecteur étant commandé par des moyens de polarisation électrique (13) contrôlés par une unité de commande (11).

2. Système d'imagerie selon la revendication 1, dans lequel l'obturateur (6, 6') comporte au moins une galette de microcanaux.

3. Système d'imagerie selon la revendication 2, dans lequel l'obturateur est formé par deux galettes (6, 6') de microcanaux disposés l'une derrière l'autre.

4. Système d'imagerie selon la revendication 2 ou 3, dans lequel une polarisation résiduelle est appliquée à l'une des faces d'une galette (6, 6').

5. Système d'imagerie selon l'une des revendications 2, 3 ou 4, dans lequel l'unité de commande (11) contrôle les moyens de polarisation (13) de sorte qu'ils envoient des impulsions de tension à une fréquence comprise entre 1Hz et 20 MHz.

6. Système d'imagerie selon la revendication 5, dans lequel la durée d'une impulsion est comprise entre 10 ns et 100 ns.

10

7. Système d'imagerie selon la revendication 1, dans lequel l'obturateur (106) comporte au moins un miroir à cristaux liquides orienté par rapport à l'écran scintillateur (5) et par rapport au détecteur (8) de sorte à réfléchir le faisceau provenant de l'écran scintillateur vers le détecteur lorsqu'il est polarisé.

8. Système d'imagerie selon la revendication 7, dans lequel l'unité de commande (11) contrôle les moyens de polarisation (13) de sorte qu'ils envoient au miroir à cristaux liquides des impulsions de tension à une fréquence inférieure à 1kHz.

25

9. Système d'imagerie selon la revendication 8, dans lequel la durée d'une impulsion est de l'ordre de 1 ms.

30

10. Système d'imagerie selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel le support (29) est apte à pivoter suivant un pas angulaire donné autour d'un axe perpendiculaire à l'axe d'émission de la source de rayons X (2).

11. Système d'imagerie selon la revendication 10, dans lequel le pas angulaire est variable.

12. Système d'imagerie selon l'une des revendications 1 à 11, dans lequel l'unité de commande (11) pilote le mouvement du microsystème.

13. Système d'imagerie selon la revendication 12, dans lequel l'unité de commande (11) comporte des moyens pour mettre en forme des signaux de pilotage de l'objet avec un retard programmable, lesdits signaux mis en forme servant à la commande des moyens de polarisation.

14. Système d'imagerie selon l'une des revendications 1 à 13, dans lequel le détecteur (8) est un dispositif à transfert de charge.

15. Système d'imagerie selon l'une des revendications 1 à 13, dans lequel le détecteur (8) est un capteur CMOS.

30

16. Procédé d'imagerie mettant en œuvre un système d'imagerie selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'objet à un mouvement périodique et le système est utilisé pour réaliser une
5 détection stroboscopique, de manière à obtenir des images à plusieurs états de l'objet.

17. Procédé d'imagerie mettant en œuvre un système d'imagerie selon l'une des revendications 1 à
10 15, dans lequel l'unité de commande contrôle les moyens de polarisation en fonction du signal pilotant le mouvement de l'objet.

18. Procédé d'imagerie selon la
15 revendication 17, dans lequel l'unité de commande forme un signal de commande des moyens de polarisation à partir du signal de pilotage de l'objet en introduisant un retard programmable, la durée du retard est modifiée de sorte à imager plusieurs états de
20 l'objet.

19. Procédé d'imagerie selon l'une des revendications 16 à 18, dans lequel l'objet est pivoté autour d'un axe perpendiculaire à l'axe d'émission de
25 rayons X de sorte à réaliser des images de l'objet dans différentes positions angulaires.

20. Procédé d'imagerie selon la
revendication 19, dans lequel le pas angulaire est
30 variable.

21. Procédé d'imagerie selon la revendication 19 ou 20, comportant :

- l'étape de reconstruction mathématique des images en trois dimensions de l'objet à chaque position angulaire.
- l'étape de concaténation des images en trois dimensions.

22. Procédé d'imagerie selon l'une des revendications 16 à 21, dans lequel l'objet est un système microélectromécanique ou un système nanoélectromécanique.

The diagram illustrates a laser system for a lithographic apparatus. It consists of a laser source (2) emitting a beam through a resonator (RX) and an output coupler (O). The beam then passes through a series of phase shifters (5, PH, 6, 8) and a phase shifter (9). A dashed box (4) encloses the phase shifters 5, PH, 6, and 8. A voltage source (13) is connected to the phase shifter 6, with a label '700-1000V' indicating the voltage range. A phase shifter (11) is also shown at the bottom.

FIG. 1A

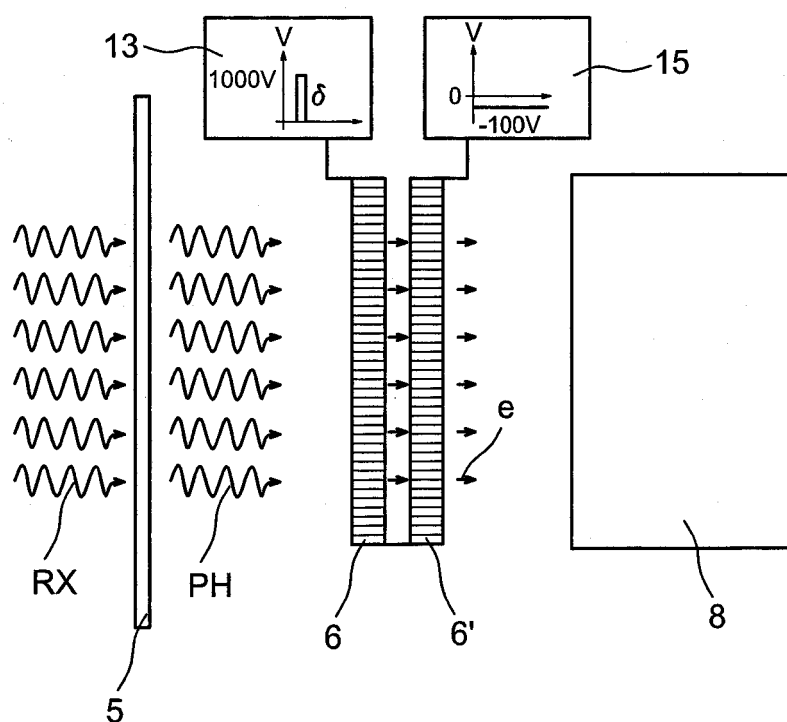


FIG. 1B

2 / 8

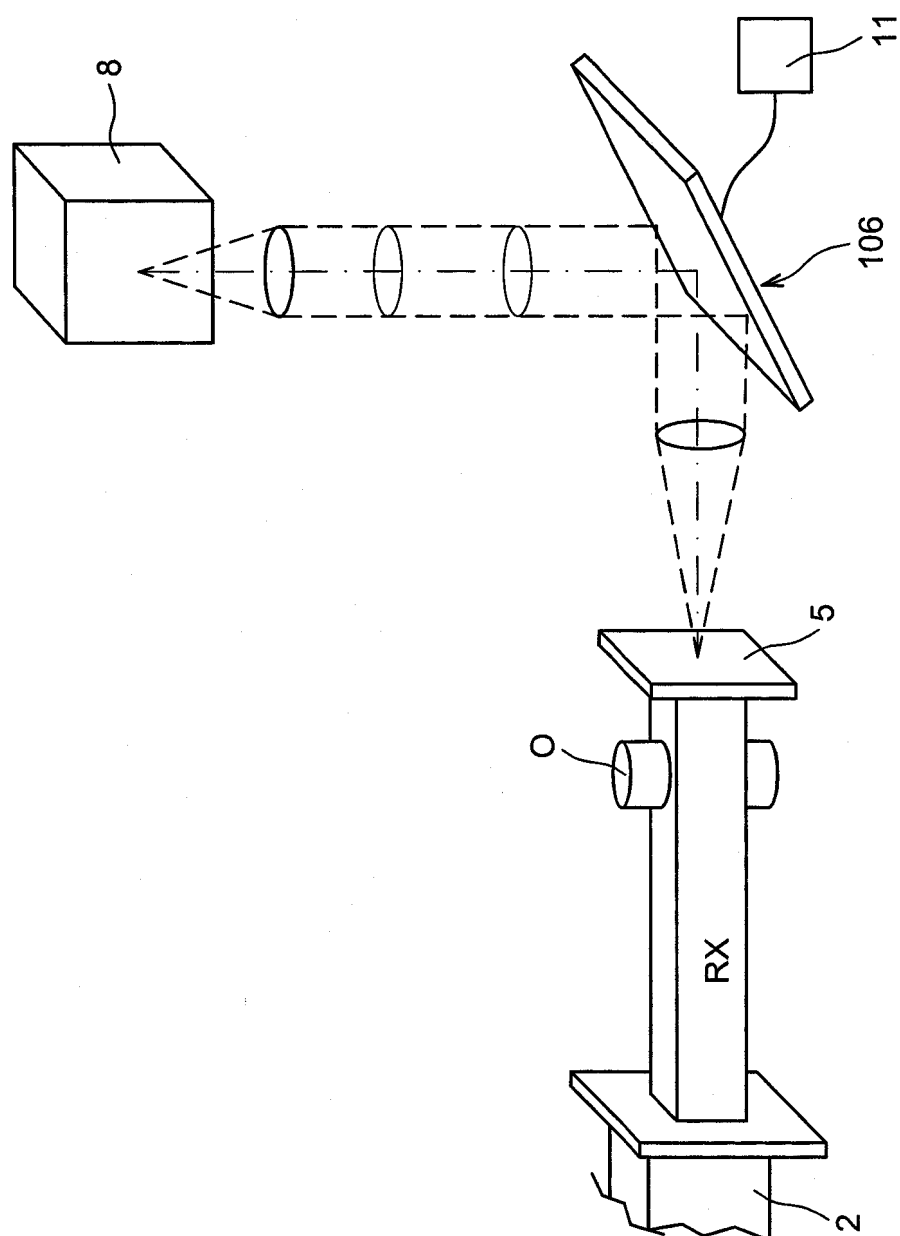


FIG. 2

3 / 8

FIG. 3A

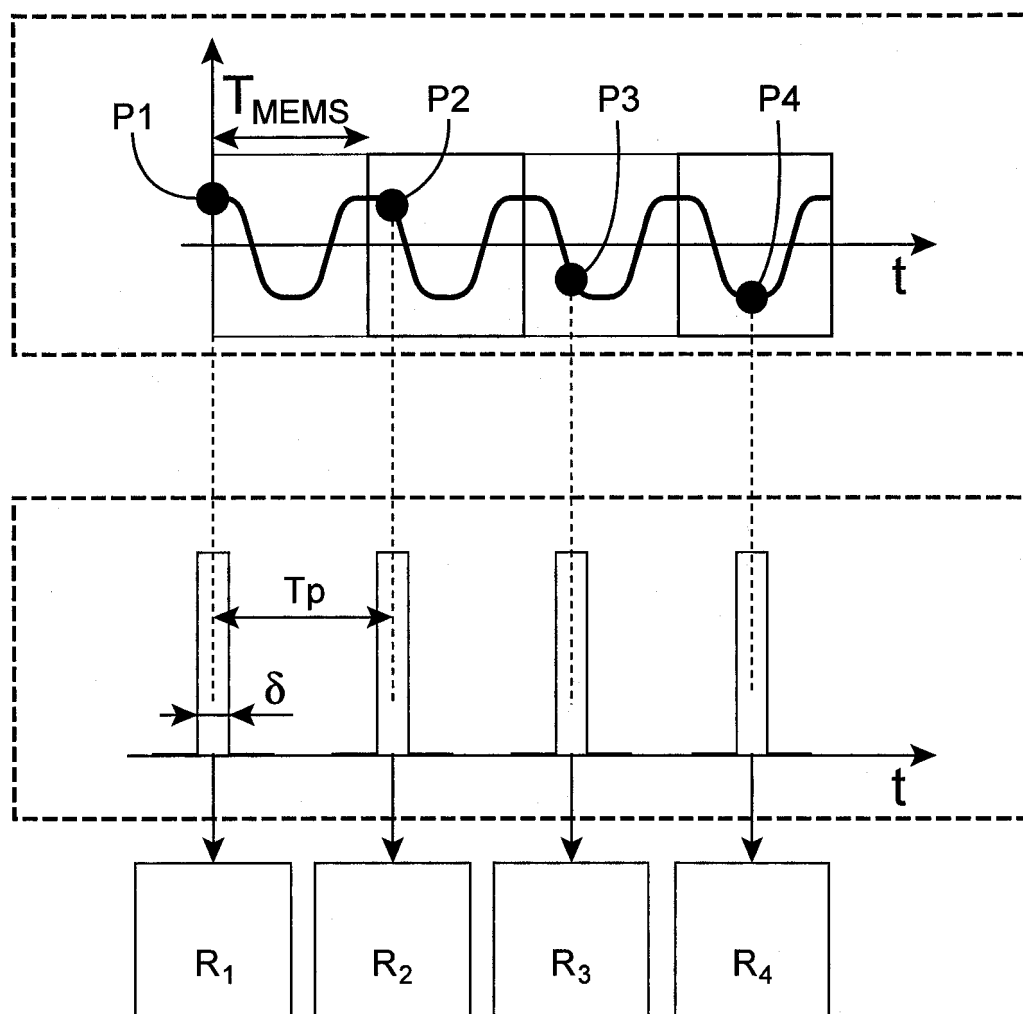


FIG. 3B

4 / 8

FIG.4A

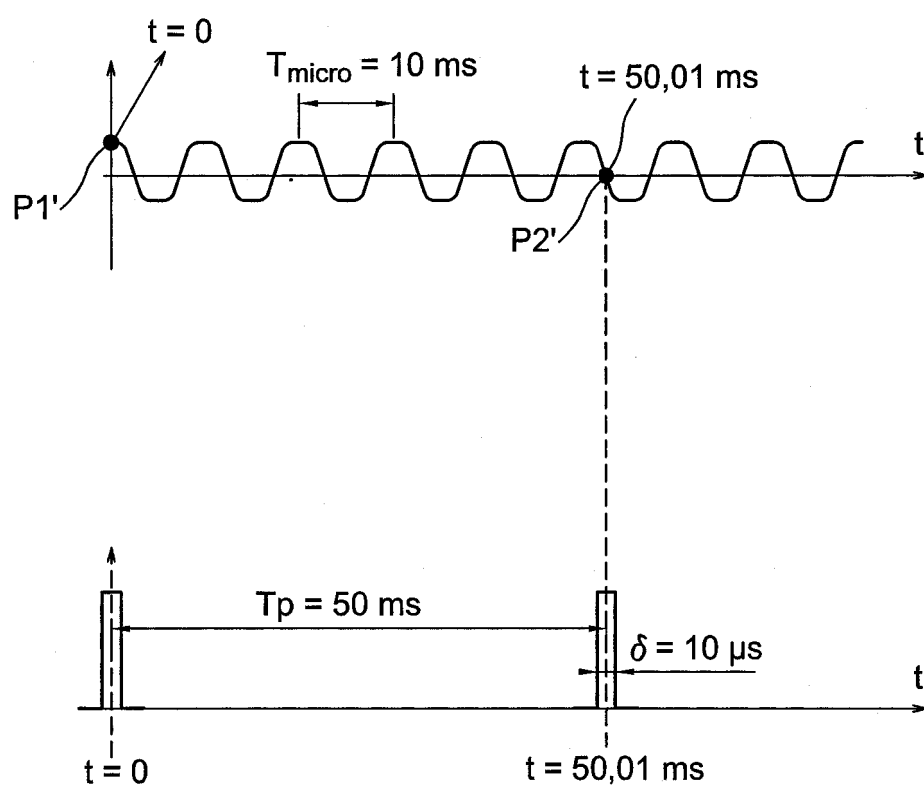


FIG. 4B

5 / 8

FIG. 5A

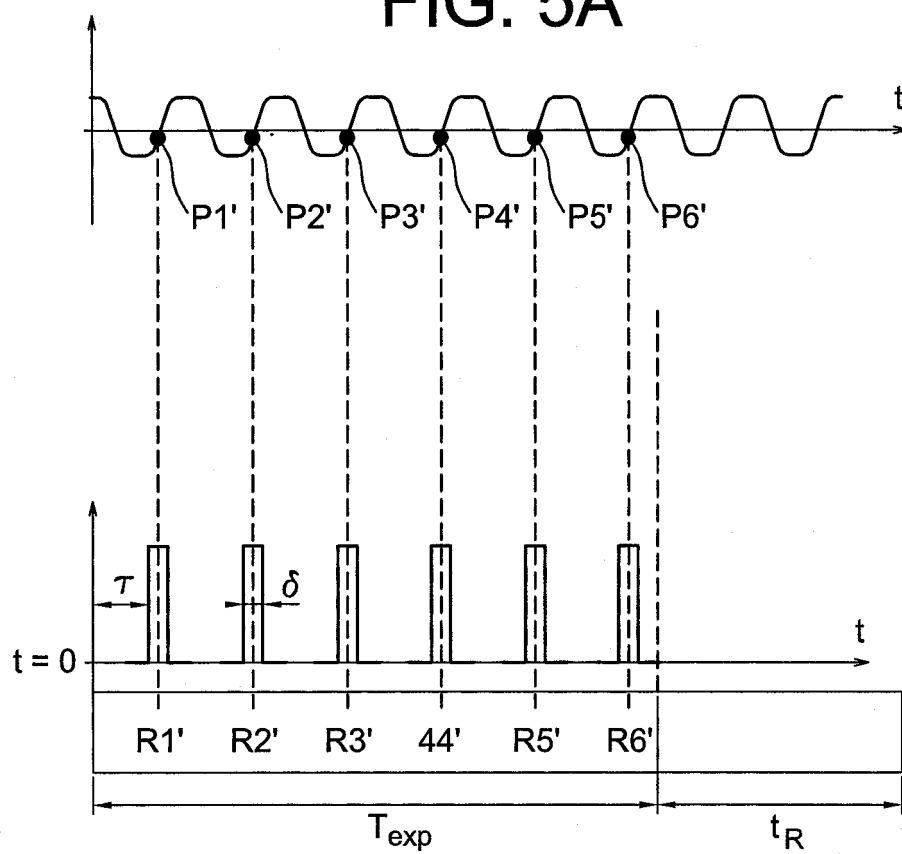


FIG. 5B

6 / 8

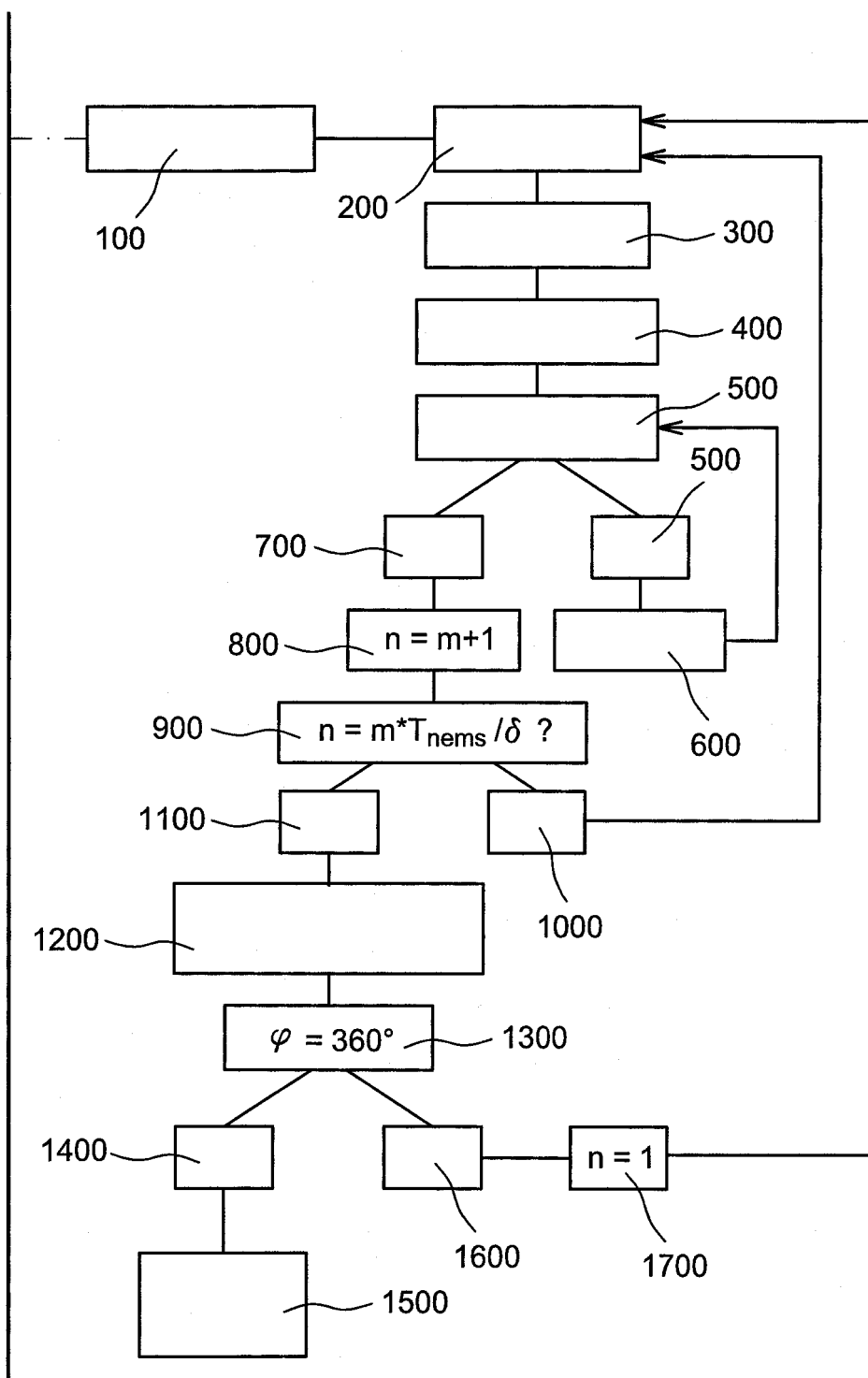


FIG. 6

7 / 8

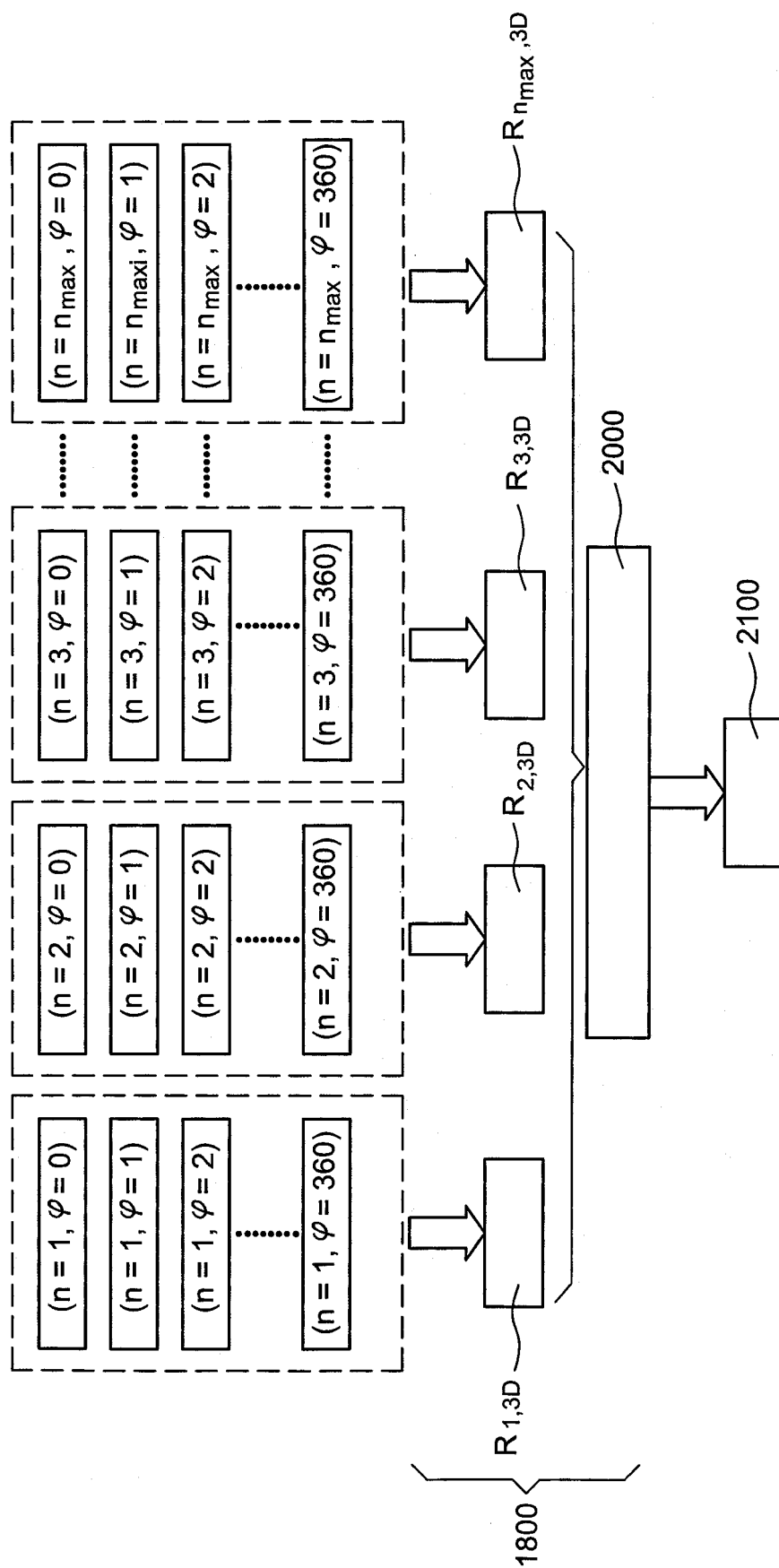


FIG. 7

8 / 8

FIG. 8

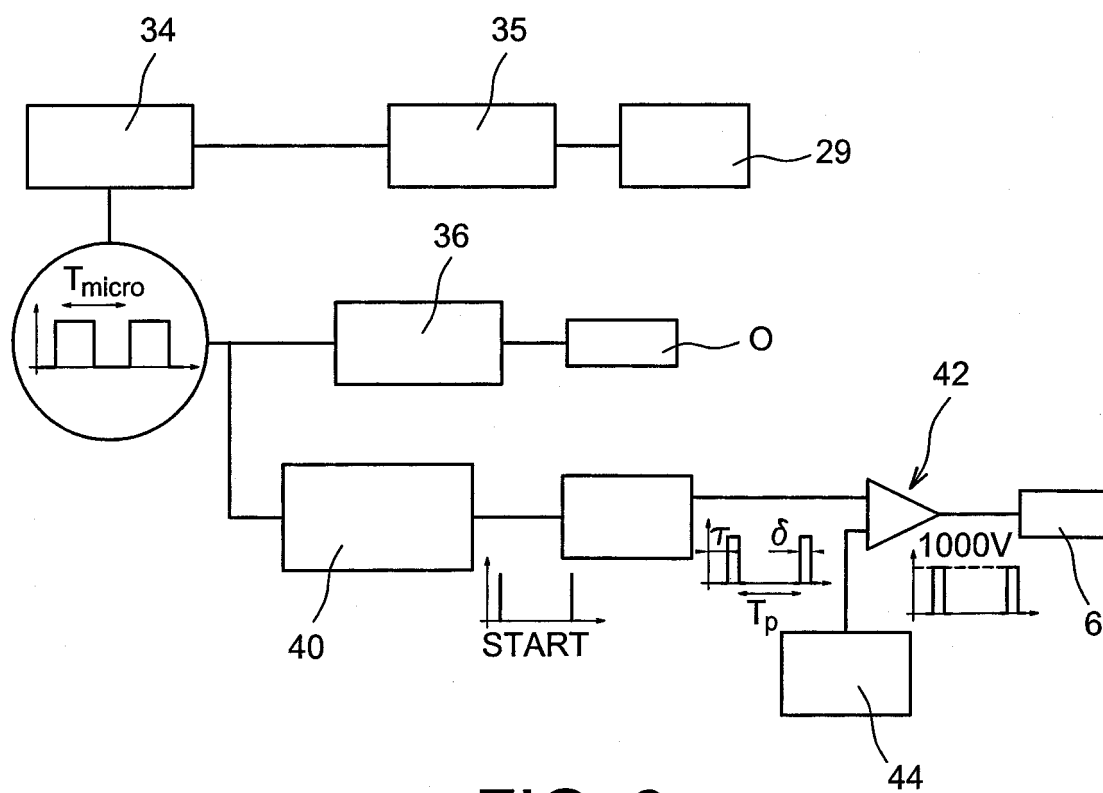
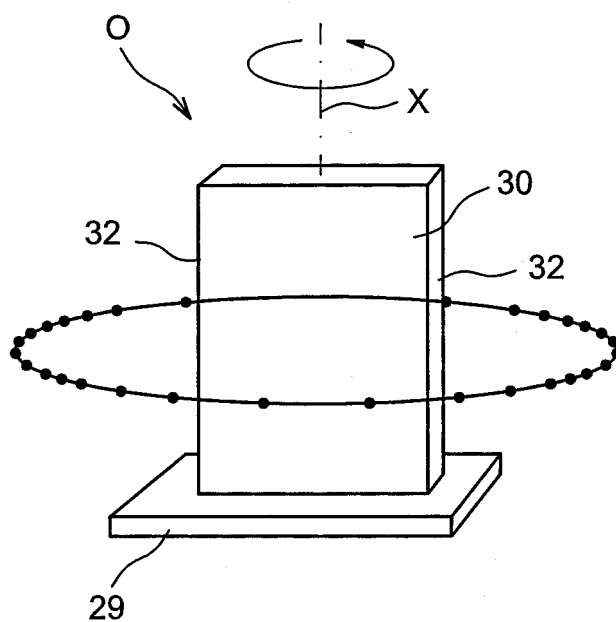


FIG. 9



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 755054
FR 1156773

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	JP 5 153495 A (FUJITSU LTD) 18 juin 1993 (1993-06-18) * abrégé * * alinéa [0006] - alinéa [0010] * -----	1-22	G03B42/02 G03B39/00 B82Y35/00
Y	GB 2 377 275 A (TOWLER MICHAEL JOHN [GB]) 8 janvier 2003 (2003-01-08) * abrégé * * page 8, ligne 45 - page 9, ligne 20 * -----	1-22	
Y	US 4 671 102 A (VINEGAR HAROLD J [US] ET AL) 9 juin 1987 (1987-06-09) * colonne 6, ligne 36 - ligne 59 * * figure 1 * -----	1-22	
Y	US 4 220 975 A (LIEBER ALBERT J [US] ET AL) 2 septembre 1980 (1980-09-02) * colonne 2, ligne 14 - ligne 33 * * colonne 5, ligne 18 - ligne 25 * -----	2-6	
Y	US 4 636 629 A (TOSSWILL CHRISTOPHER H [US]) 13 janvier 1987 (1987-01-13) * figure 1 * -----	3	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Y	JP 1 159615 A (NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE) 22 juin 1989 (1989-06-22) * abrégé * -----	7	G03B G01N G06T G01T H04N A61B
Y	JP 2010 181190 A (SHIMADZU CORP) 19 août 2010 (2010-08-19) * abrégé * -----	10,11, 19-22	
Y	US 5 887 049 A (FOSSUM ERIC R [US]) 23 mars 1999 (1999-03-23) * abrégé * -----	15	
	-/--		
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
28 novembre 2011		Breccia, Luca	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 755054
FR 1156773

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	JP 63 026083 A (NIPPON KOKAN KK) 3 février 1988 (1988-02-03) * abrégé * * figure 1 *	1	
A	----- US 3 603 828 A (SHELDON EDWARD EMANUEL) 7 septembre 1971 (1971-09-07) * colonne 22, ligne 8 - colonne 23, ligne 8 * * figure 16 *	1	
A,D	----- US 4 996 413 A (MCDANIEL DAVID L [US] ET AL) 26 février 1991 (1991-02-26) * abrégé *	1	
A,D	----- BEETZ, BOERSTLER, STEINBECK, LEMIEUX, WINN: "Silicon-micromachined microchannel plates", NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH, vol. 442, 11 mars 2000 (2000-03-11), pages 443-451, XP002664102, * abrégé *	1	
A,D	----- US 2010/052118 A1 (GALERA MANOLITO [SG] ET AL) 4 mars 2010 (2010-03-04) * abrégé *	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
28 novembre 2011		Breccia, Luca	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1156773 FA 755054**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **28-11-2011**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
JP 5153495	A	18-06-1993	AUCUN	
GB 2377275	A	08-01-2003	AUCUN	
US 4671102	A	09-06-1987	AU 585357 B2	15-06-1989
			AU 5888686 A	24-12-1986
			CA 1279776 C	05-02-1991
			DE 3673257 D1	13-09-1990
			EP 0206372 A2	30-12-1986
			NO 862392 A	19-12-1986
			US 4671102 A	09-06-1987
US 4220975	A	02-09-1980	AUCUN	
US 4636629	A	13-01-1987	BE 904544 A1	31-07-1986
			CA 1255735 A1	13-06-1989
			CH 671483 A5	31-08-1989
			DE 3610529 A1	02-10-1986
			FR 2579811 A1	03-10-1986
			GB 2175440 A	26-11-1986
			IT 1190556 B	16-02-1988
			JP 61281445 A	11-12-1986
			NL 8600700 A	03-11-1986
			US 4636629 A	13-01-1987
JP 1159615	A	22-06-1989	AUCUN	
JP 2010181190	A	19-08-2010	AUCUN	
US 5887049	A	23-03-1999	AUCUN	
JP 63026083	A	03-02-1988	AUCUN	
US 3603828	A	07-09-1971	AUCUN	
US 4996413	A	26-02-1991	CA 2034471 A1	28-08-1991
			DE 69110925 D1	10-08-1995
			DE 69110925 T2	21-03-1996
			EP 0444869 A2	04-09-1991
			JP 2951020 B2	20-09-1999
			JP 4220239 A	11-08-1992
			US 4996413 A	26-02-1991
US 2010052118	A1	04-03-2010	AUCUN	