

CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) CH 703 460 B1

(51) Int. Cl.: G04D 7/08 (2006.01)
B23K 26/36 (2014.01)

Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(12) **FASCICULE DU BREVET**

(21) Numéro de la demande: 01193/10

(22) Date de dépôt: 16.07.2010

(43) Demande publiée: 31.01.2012

(24) Brevet délivré: 13.03.2015

(45) Fascicule du brevet publié: 13.03.2015

(73) Titulaire(s):
ETA SA Manufacture Horlogère Suisse,
Schild-Rust-Strasse 17
2540 Grenchen (CH)

(72) Inventeur(s):
Laurent Klinger, 2503 Bienne (CH)
Thorsten Kramer, 4571 Lüterkofen (CH)
Marc Lippuner, 2540 Grenchen (CH)
Conus, Thierry, 2543, Lengnau (CH)

(74) Mandataire:
ICB Ingénieurs Conseils en Brevets SA,
Faubourg de l'Hôpital 3
2001 Neuchâtel (CH)

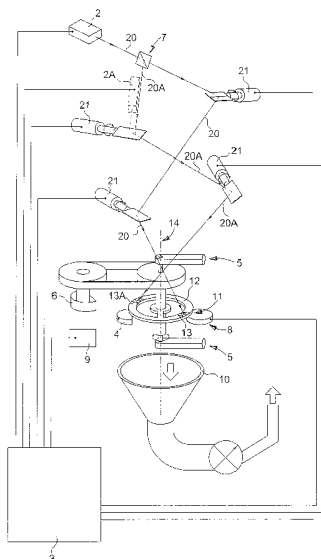
(54) **Procédé et dispositif d'ajustement d'inertie, d'équilibrage, ou de fréquence, d'un balancier d'horlogerie.**

(57) L'invention concerne un procédé d'ajustement en fréquence d'un balancier (11) d'horlogerie comportant une serge (12).

Il se caractérise en ce que:

- des moyens de pilotage (3) commandent la génération d'impulsions d'un picolaser (2) et des mouvements de son faisceau (20), interfaces avec des moyens de mesure ou de comparaison (4) agencés pour effectuer des mesures sur ledit balancier (11) en mouvement;
- lesdits moyens de pilotage (3) sont programmés pour;
- définir une zone de la surface de ladite serge (12) à micro-usiner, pour générer une série séquentielle d'impulsions dudit picolaser (2) créant une ligne d'impacts successifs du faisceau réalisant une micro-gravure par sublimation;
- créer de l'avance sur ledit balancier par la répétition desdites microgravures, pour atteindre une valeur de fréquence de consigne et pour générer lesdites micro-gravures sur lesdites zones dans le respect de l'équilibrage dudit balancier (11) relativement à une valeur de consigne.

L'invention concerne encore un dispositif de mise en œuvre de ce procédé.



Description

Domaine de l'invention

[0001] L'invention concerne un procédé d'ajustement d'un balancier d'horlogerie comportant une serge périphérique et mobile en pivotement autour d'un axe de balancier.

[0002] L'invention concerne encore un dispositif de mise en œuvre du procédé.

[0003] L'invention concerne, de façon générale, le domaine de la micromécanique, et plus particulièrement le domaine de l'horlogerie.

[0004] Tout particulièrement l'invention concerne les ajustements et réglages d'organes-réglants, et en particulier des balanciers de montres ou de pièces d'horlogerie.

Arrière plan de l'invention

[0005] Malgré l'extrême précision des usinages et leur grande reproductibilité, des ajustements doivent presque toujours être opérés, soit lors d'une opération d'assemblage, soit, plus fréquemment, lors d'une opération de réglage ou de mise au point, en particulier pour ajustement en fréquence, un réglage de balourd et un ajustement d'inertie dans le cas des pièces mobiles.

[0006] C'est en particulier au stade assemblé qu'il est nécessaire de parfaire l'appairage de certains composants qui, pris indépendamment, sont dans les tolérances d'usinage ou de réalisation, mais qui ne peuvent être assemblés purement et simplement en raison des contraintes de service propre à l'ensemble monté.

[0007] C'est en particulier le cas des organes réglants des pièces d'horlogerie, et tout particulièrement des ensembles balancier-spiral. Il apparaît en effet que les réglages de balourd et d'ajustement d'inertie, tant statique que dynamique, sont déjà très délicats au stade des composants individuels, et que ces opérations de mise au point se révèlent extrêmement complexes quand les composants sont assemblés entre eux. En particulier les réglages dynamiques se révèlent délicats à mettre en œuvre, notamment l'ajustement en fréquence.

[0008] La situation est encore plus complexe quand un tel ensemble est déjà intégré à un ensemble supérieur, comme un mouvement de montre par exemple, en raison de la moindre accessibilité, mais aussi de la perturbation du bon fonctionnement du mouvement, induite par l'exécution d'une opération d'ajustement, de réglage ou d'équilibrage.

[0009] La difficulté est donc double, car il s'agit de pouvoir dominer des réglages et des ajustements dynamiques sur des composants qui sont:

- en mouvement, ou
- intégrés dans un mouvement d'horlogerie, ou
- en mouvement et intégrés dans un mouvement d'horlogerie.

[0010] On trouve peu de solutions à ce problème dans l'art antérieur. La problématique de l'équilibrage dynamique a suscité des solutions consistant à localiser des zones d'ajout ou d'enlèvement de matière, à quantifier ceux-ci, qui sont effectués après l'arrêt de la rotation de l'organe mobile à équilibrer, comme dans le document de brevet US 2 538 528 au nom de Kohlhagen. Dans une variante, comme dans le document de brevet DE 1 142 796 au nom de Hettich, des masses sont à positionner ou au contraire à chasser au niveau de trous pré-perçés sur toute la circonférence d'un balancier de montre. Le brevet CH 367 444 au nom de OMEGA montre les inconvénients de l'enlèvement traditionnel par fraisage sur les balanciers de montres, et propose une solution d'ajout ou d'enlèvement de matière par voie électrochimique, ce qui permet d'assurer la correction de la masse et la précision de l'équilibrage.

[0011] Le brevet US 3 225 586 au nom de HAMILTON propose l'utilisation du microphone d'un appareil de type «Watch-master», lié à l'équipage mobile dans sa rotation, pour déterminer très exactement l'ajustement de 4 vis en périphérie de la serge du balancier.

[0012] Pour améliorer ces procédés en deux étapes, mesure puis ajustement, un brevet CH 390 165 au nom de Zenger propose un procédé d'équilibrage par électro-érosion, en continu avec un très léger différé après une mesure stroboscopique, mais il nécessite une rotation dans un sens uniforme de ce balancier.

[0013] Le brevet CH 690 874 au nom de Witschi décrit encore un procédé d'enlèvement ou d'apport de matière suite à une mesure préalable, avec un dispositif d'arrêt du balancier pour le maintenir face à des moyens d'enlèvement ou d'apport.

[0014] Le brevet CH 526 097 au nom de la Compagnie Générale d'Electricité propose un équilibrage d'une pièce tournante ou oscillante par rayon laser parallèle à l'axe de pivotement de la pièce à équilibrer, comportant un dispositif optique de déviation du faisceau laser de façon à ce que celui-ci soit synchrone avec la pièce en mouvement, et à ainsi vaporiser la matière à l'endroit adéquat pendant toute la durée de l'impulsion émise par le laser. Cette technologie représente un progrès important par rapport à l'art antérieur, mais n'est pas bien adaptée à un composant monté dans un ensemble, en raison des déchets et de la pollution de l'ensemble.

[0015] Il en est de même d'un brevet FR 2 159 367 au nom de Les Fabriques d'Assortiments Réunies, qui propose un procédé par usinage avec minimisation du nombre d'opérations, mais où la position de la tête d'usinage dépend du défaut à corriger, ce qui n'est pas possible dans un ensemble monté.

[0016] En somme, les procédés connus capables d'effectuer une correction d'inertie, ou d'équilibrage, sur une pièce en mouvement sont rares et mal adaptés pour effectuer cette correction sur cette même pièce montée dans un ensemble. De plus, peu conviennent à un mouvement alternatif, qui est celui d'un balancier ou d'un ensemble balancier-spiral monté.

[0017] Seul le brevet US 6 534 742 au nom de ETA SA Fabrique d'Ebauches propose une méthode d'ajustement de la fréquence d'oscillation d'un balancier-spiral, par la mise en œuvre d'un laser agissant sur le ressort-spiral pour réduire son couple élastique, en réduisant son épaisseur ou sa hauteur. Tout en représentant un progrès manifeste par rapport à l'art antérieur, cet enseignement ne résout pas tous les cas de figure, car il ne peut créer que du retard en affaiblissant le ressort. D'autre part il ne peut être utilisé qu'en-dehors du mouvement d'horlogerie, en raison de la pollution et des déchets générés par l'action du laser.

Résumé de l'invention

[0018] L'invention se propose de fournir une solution à ce problème, par la mise au point d'un procédé convenant aux réglages et ajustements dynamiques de balanciers mobiles en pivotement, et notamment dans des ensembles montés.

[0019] En particulier l'invention s'applique à proposer une méthode efficace, rapide et précise pour les réglages d'ajustement de fréquence, utilisable également pour les ajustements d'inertie, et les réglages d'équilibrage dynamique.

[0020] A cet effet l'invention concerne un procédé d'ajustement d'un balancier d'horlogerie comportant une serge périphérique et mobile en pivotement autour d'un axe de balancier, caractérisé en ce qu'on effectue un enlèvement de matière en transformant au moins une partie de la matière dudit balancier par sublimation, par la mise en œuvre d'un moyen de micro-usinage adapté pour effectuer l'ajustement d'inertie, ou/et d'équilibrage, ou/et de fréquence, dudit balancier.

[0021] Selon une forme d'exécution de l'invention, on transforme au moins une partie de la matière dudit balancier, ou de composants que porte ledit balancier, par sublimation, et on choisit comme dit moyen de micro-usinage au moins un picolaser pour effectuer ledit enlèvement de matière par microgravure sous l'effet d'au moins une impulsion dudit picolaser de façon à transformer directement la matière solide en un flux gazeux par sublimation, et on commande ladite impulsion par des moyens de pilotage agencés pour générer, séquencer, interrompre toute impulsion dudit picolaser, lesdits moyens de pilotage étant encore agencés pour piloter les mouvements d'au moins un faisceau issu dudit picolaser, lesdits moyens de pilotage étant raccordés à des moyens de mesure ou de comparaison ou encore asservis auxdits moyens de mesure ou de comparaison.

[0022] Selon une autre forme d'exécution de l'invention, on agence lesdits moyens de mesure ou de comparaison pour effectuer des mesures sur ledit balancier lors d'un mouvement dudit balancier.

[0023] Selon une autre forme d'exécution de l'invention, on programme lesdits moyens de pilotage de façon à définir au moins une zone particulière de ladite serge dudit balancier, ou de composants que porte ledit balancier, zone sur laquelle de la matière doit être enlevée, et on programme lesdits moyens de pilotage de façon à générer au moins une série séquentielle à grande fréquence moyenne d'impulsions dudit picolaser de façon à générer, sur ladite zone, au moins une ligne d'impacts successifs du faisceau dudit picolaser afin d'y réaliser une micro-gravure par enlèvement localisé de matière par sublimation.

[0024] Selon une autre forme d'exécution de l'invention, on applique ledit procédé pour effectuer l'ajustement de fréquence dudit balancier, et on programme lesdits moyens de pilotage de façon à créer de l'avance sur ledit balancier par la répétition desdites opérations de micro-gravure sur desdites zones, de façon à atteindre une valeur de fréquence de consigne qui peut être contrôlée par lesdits moyens de mesure ou de comparaison, et de façon à générer lesdites opérations de micro-gravure sur lesdites zones dans le respect de l'équilibrage dudit balancier par rapport à son axe principal d'inertie, relativement à une valeur de consigne qui peut être contrôlée par lesdits moyens de mesure ou de comparaison.

[0025] L'invention concerne encore un dispositif de mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte au moins une source picolaser, des moyens de pilotage de ladite source agencés pour générer, séquencer, interrompre au moins une série séquentielle d'impulsions dudit picolaser, lesdits moyens de pilotage étant encore agencés pour piloter les mouvements d'au moins un faisceau issu dudit picolaser ou le mouvement de ladite source elle-même, des moyens de mesure et de comparaison interfaces avec lesdits moyens de pilotage, et des moyens de préhension et d'appui dudit balancier à micro-usiner.

Description sommaire des dessins

[0026] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description détaillée qui va suivre, en référence aux dessins annexés, où:

- la fig. 1 représente un graphe avec, en ordonnée, la valeur algébrique de la position du centre de masse de la matière enlevée lors d'une opération de micro-usinage par ablation sous un faisceau de picolaser, en fonction de l'amplitude de la position angulaire d'un balancier d'horlogerie;
- la fig. 2 représente, de façon schématisée, un dispositif de mise en œuvre de l'invention;
- la fig. 3 représente, de façon schématisée et partielle, l'intervention simultanée de deux picolasers en micro-usinage sur un balancier;
- la fig. 4 représente, de façon analogue à la fig. 3, l'intervention différée de deux tels picolasers;
- la fig. 5 représente, de façon analogue à la fig. 3, l'intervention d'un seul tel picolaser.

Description détaillée des modes de réalisation préférés

[0027] L'invention concerne le domaine des ajustements et réglages fins sur les ensembles réglants d'horlogerie ou leurs organes constitutifs, et tout particulièrement sur des balanciers.

[0028] L'invention concerne un procédé d'ajustement d'un balancier d'horlogerie comportant une serge périphérique et mobile en pivotement autour d'un axe de balancier.

[0029] Selon l'invention, on effectue un enlèvement de matière en transformant au moins une partie de la matière du balancier par ablation, notamment par sublimation, par la mise en œuvre d'un moyen de micro-usinage adapté pour effectuer l'ajustement d'inertie, ou/et d'équilibrage, ou/et de fréquence, de ce balancier.

[0030] De façon particulière dans l'application décrite ci-après, le procédé est un procédé d'ajustement en fréquence d'un balancier d'horlogerie, applicable également à un ensemble balancier-spiral.

[0031] De façon préférée, on transforme au moins une partie de la matière de ce balancier, ou de composants que porte ce balancier, par sublimation, et on choisit comme tel moyen de micro-usinage au moins un picolaser pour effectuer cet enlèvement de matière par micro-gravure sous l'effet d'au moins une impulsion de ce picolaser, de façon à transformer directement la matière solide en un flux gazeux par sublimation, c'est-à-dire un passage direct de l'état solide à l'état gazeux, sans redéposition de déchets solides ni liquides sur le composant,

[0032] On commande cette impulsion par des moyens de pilotage, qui sont agencés pour générer, séquencer, interrompre toute impulsion de ce picolaser. Ces moyens de pilotage sont encore agencés pour piloter les mouvements d'au moins un faisceau issu de ce picolaser, ou encore le mouvement de la source picolaser elle-même. Ces moyens de pilotage sont interfaces ou raccordés à des moyens de mesure ou de comparaison, ou encore asservis à de tels moyens de mesure ou de comparaison. En utilisant un laser picoseconde, dit picolaser, on peut procéder à une ablation de matière sur une serge de balancier, ou encore sur un ou plusieurs composants que porte ce balancier au niveau de cette serge, comme plots, masselottes, vis de réglage, ou analogues. Cette ablation de matière réduit l'inertie de ce balancier, et donc permet de corriger un éventuel défaut de marche.

[0033] Un tel traitement est caractérisé par plusieurs paramètres: simplicité de la mise en œuvre, temps de traitement pour procéder à une correction donnée, création d'un éventuel balourd, nécessité de procéder à certaines mesures, etc.

[0034] Le présent document présente une stratégie d'ablation sur un balancier en mouvement, c'est-à-dire dans son mouvement de pivotement autour de son axe de balancier. L'invention se propose, grâce à la mise en œuvre de ce procédé nouveau, d'effectuer l'ajustement en fréquence de ce balancier, ou/et son ajustement en inertie, ou/et son ajustement en équilibrage afin de faire coïncider cet axe de pivotement de balancier avec son axe principal d'inertie.

[0035] La présente invention est développée pour être mise en œuvre aussi bien au niveau d'un balancier seul, que d'un balancier-spiral assemblé, que d'un balancier-spiral intégré et monté dans un mouvement d'une pièce d'horlogerie.

[0036] Cette stratégie a pour effet d'optimiser le temps de traitement et le balourd créé.

[0037] Selon l'invention, pour mettre en œuvre le procédé d'ajustement en fréquence ou/et en inertie ou/et en équilibrage d'un balancier d'horlogerie comportant une serge périphérique et mobile en pivotement autour d'un axe de balancier, on effectue un enlèvement de matière par ablation en transformant au moins une partie de la matière de ce balancier, de préférence par sublimation, par la mise en œuvre d'un moyen de micro-usinage adapté pour effectuer l'ajustement d'inertie, ou/et d'équilibrage, ou/et de fréquence, de ce balancier.

[0038] De façon préférée, on transforme au moins une partie de la matière du balancier, ou de composants que porte ce balancier, par sublimation, et on choisit comme tel moyen de micro-usinage au moins un picolaser pour effectuer cet enlèvement de matière par micro-gravure sous l'effet d'au moins une impulsion du picolaser, de façon à transformer directement la matière solide en un flux gazeux par sublimation. On commande cette impulsion, ou ces impulsions, par des moyens de pilotage, qui sont agencés pour générer, séquencer, interrompre toute impulsion de ce picolaser, ou de ces picolasers quand on en utilise plusieurs, comme sur l'exemple de la fig. 3. Ces moyens de pilotage sont encore agencés pour piloter les mouvements d'au moins un faisceau issu de ce picolaser, ou encore les mouvements de la source picolaser elle-même. Naturellement les moyens de pilotage pilotent les mouvements de toutes les sources picolasers utilisées dans

la mise en œuvre du procédé. Ces moyens de pilotage sont interfaces ou raccordés à des moyens de mesure ou de comparaison, ou encore asservis auxdits moyens de mesure ou de comparaison.

[0039] De préférence, on agence les moyens de mesure ou de comparaison pour effectuer des mesures sur ce balancier aussi bien en position d'arrêt que lors d'un mouvement de ce balancier.

[0040] De façon avantageuse, on programme les moyens de pilotage de façon à définir au moins une zone particulière de la serge du balancier, ou de composants que porte ce balancier. Cette zone est celle sur laquelle de la matière doit être enlevée. On programme les moyens de pilotage de façon à générer au moins une série séquentielle à grande fréquence moyenne d'impulsions du picolaser de façon à générer, sur cette zone ou sur ces zones selon le cas, au moins une ligne d'impacts successifs du faisceau du picolaser afin d'y réaliser une micro-gravure par enlèvement localisé de matière par sublimation.

[0041] On comprend que le procédé peut être mis en œuvre de différentes manières:

- en traitement différé entre des phases de mesure ou/et de comparaison d'une part, et des phases de micro-usinage d'autre part, ou
- en traitement simultané, ou semi-simultané, avec l'exécution de certaines opérations de mesure ou/et de comparaison pendant l'exécution de certaines opérations de micro-usinage.

[0042] On comprend encore qu'on parle ici de grande fréquence moyenne d'impulsions du picolaser, car il n'est pas indispensable que la fréquence des impulsions soit constante, en particulier la génération des impulsions peut être de type aléatoire, ou suivre une règle particulière de variation.

[0043] Dans un exemple de mise en œuvre préféré, la fréquence moyenne des tirs est comprise entre 50 Hz et 500 Hz, et de préférence de l'ordre de 300 kHz.

[0044] La durée d'impulsion est de l'ordre de la picoseconde, soit 10^{-12} seconde dans le cas d'un picolaser, dont la puissance moyenne est comprise entre 1 et 10 W, et, dans le cadre de l'invention, on utilise des durées d'impulsions de l'ordre de quelques picosecondes à quelques dizaines ou centaines de picosecondes.

[0045] Selon l'invention, on réalise un ajustement en fréquence, et, pour ce faire, on programme les moyens de pilotage de façon à créer de l'avance sur le balancier, par la répétition des opérations de micro-gravure sur cette ou ces zones, de façon à atteindre une valeur de fréquence de consigne qui peut être contrôlée par les moyens de mesure ou de comparaison, et de façon à générer ces opérations de micro-gravure sur ces zones dans le respect de l'équilibrage du balancier par rapport à son axe principal d'inertie, relativement à une valeur de consigne qui peut être contrôlée par les moyens de mesure ou de comparaison.

[0046] Dans un mode particulier de réalisation, on dirige simultanément au moins deux faisceaux de mêmes caractéristiques en au moins deux telles zones de la serge ou de composants que porte le balancier, ou bien par division du faisceau d'un unique picolaser, ou bien par synchronisation de plusieurs picolasers recevant les mêmes instructions de la part des moyens de pilotage. Ces zones sont distantes l'une de l'autre, et de préférence radialement distantes de la même valeur de l'axe de balancier. Et on génère sur chacune de ces zones une série séquentielle d'impulsions identique à celle de l'autre zone. De façon plus générale, on peut effectuer des balayages avec une symétrie d'ordre n quelconque.

[0047] La division du faisceau peut être faite par un élément optique tel que miroir, prisme semi-réfléchissant, ou similaire.

[0048] Il est, encore, envisageable de faire varier la répartition des puissances entre les différents faisceaux, pour agir sur l'équilibrage de balourd, sous la commande des moyens de pilotage.

[0049] Dans un mode préféré de mise en œuvre de l'invention, afin de minimiser le temps de traitement, le point d'ablation du picolaser reste fixe, ou éventuellement se meut dans une zone restreinte. De ce fait, il est possible de procéder à l'ablation de façon ininterrompue, ce qui minimise le temps de traitement.

[0050] Cependant, dans le cas général, un balourd non négligeable est créé. Toutefois, on montre ci-dessous qu'il est possible d'annuler ce balourd à condition que le balancier ait une amplitude bien choisie. Cette stratégie est donc caractérisée par deux éléments:

- (a) ablation en continu dans une zone d'une taille de l'ordre de la largeur annulaire de la serge de balancier et
- (b) balancier possédant une amplitude bien choisie pour minimiser le balourd.

[0051] Dans un autre mode particulier de réalisation, on déplace le faisceau d'un picolaser unique d'une telle zone à une autre zone en symétrie de part et d'autre d'un plan passant par l'axe de balancier, et on génère alternativement sur chacune de ces zones, vers laquelle est alors focalisé le faisceau, une telle série séquentielle d'impulsions identique à celle d'une autre zone la précédant ou la suivant directement dans la séquence de travail du picolaser. On choisit de préférence ce plan à égale distance des amplitudes extrêmes de la course de pivotement du balancier. Dans un mode particulier, on peut choisir ces zones en symétrie axiale par rapport à l'axe de pivotement du balancier.

[0052] Dans le cas où on utilise un picolaser unique, on utilise avantageusement des moyens de stabilisation d'amplitude pour maintenir le mouvement de pivotement du balancier dans une oscillation à amplitude constante pendant le déroulement de chaque série séquentielle d'impulsions.

[0053] Comme il sera détaillé ci-dessous, on stabilise alors cette amplitude à un angle d'une valeur de 137° ou de $316,5^\circ$.

[0054] Pour stabiliser l'amplitude, différentes méthodes sont utilisables, seules ou en combinaison: choix d'un état d'armage particulier du barillet, asservissement d'amplitude en boucle fermée en réglant une source de couple externe sur la tige ou sur un des mobiles du mouvement tel qu'aiguille de seconde ou de minute ou autre, utilisation d'une source extérieure de stabilisation comme un souffle d'air en oscillation libre ancre enlevée, ou autre.

[0055] Dans le cas où on utilise un picolaser unique, on peut aussi utiliser des moyens de synchronisation pour synchroniser le mouvement d'au moins un faisceau issu du picolaser au mouvement de pivotement du balancier pendant le déroulement de chaque dite série séquentielle d'impulsions.

[0056] Pour synchroniser, il s'agit d'estimer la phase de l'oscillation du balancier, ou de l'ensemble balancier-spiral selon le cas, ce qui est possible par différentes méthodes, seules ou en combinaison: méthode acoustique par captation par microphone des bruits produits par l'échappement, méthode optique par détection de bras du balancier ou de la rugosité des bras, pour déterminer position, vitesse et accélération de la serge, ou tout autre méthode.

[0057] On détaille maintenant comment sont déterminées les amplitudes qui permettent de minimiser, voire d'annuler, le balourd.

[0058] Comme le point d'ablation ne change pas pendant que le balancier se meut, l'enlèvement de matière se répartit le long de la serge (pas nécessairement sur tout le périmètre, selon l'amplitude du balancier). Pour simplifier on assimile ici à la serge les éléments qu'elle est susceptible de porter, comme masselottes, plots, vis d'équilibrage ou/et de réglage. De plus, comme l'ablation se fait de préférence à fréquence de tir constante, mais que la vitesse du balancier varie, la quantité de matière enlevée, à une position angulaire θ du balancier, varie également. Notre objectif est de trouver une amplitude d'oscillation du balancier qui annule le balourd, ou, de façon équivalente, conduit à un centre de masse de la matière enlevée se situant au centre du balancier.

La position du centre de masse de la matière enlevée est donnée par:

$$\vec{x}_{cm} = \frac{\int \vec{x} dm}{\int dm}$$

l'intégration se faisant le long de la serge. Appelons f la fonction de θ qui donne la distribution linéique (le long de la serge ou de la spire, selon le cas) de matière enlevée. Pour que le balourd créé par la matière enlevée soit nul il faut donc que

$$\int \vec{x} \cdot dm = \int \vec{x} f(\theta) \cdot d\theta = 0.$$

[0059] Le fait de ne considérer que des grandeurs linéiques vient de ce que l'on peut négliger la largeur de la zone de travail du picolaser par rapport à la taille l'ensemble balancier-spiral, ainsi que la composante du balourd selon l'axe de pivotement, et ceci bien que le fait que f varie en fonction de θ résulte en une profondeur d'ablation non constante.

[0060] Considérons pour le moment uniquement le premier quart d'une seule période. La quantité dm de matière enlevée sur un intervalle $d\theta$ autour de θ , l'a été durant un certain temps dt , et l'on a également $dm = k dt$, où k est le taux d'enlèvement de la matière. La fréquence de tir du picolaser étant de préférence constante et très élevée par rapport à la fréquence d'oscillation du balancier, on peut considérer que k est constant. On a donc $k dt = f(\theta) d\theta$.

[0061] Mais $\theta = A(t)$, où A est la fonction qui donne la position angulaire du balancier au temps t , et donc $d\theta = \dot{A}(t) dt$, ce qui implique que

$$f(\theta) = \frac{k}{\dot{A}(t)} = \frac{k}{\dot{A}(A^{-1}(\theta))}$$

[0062] En d'autres termes, la distribution de matière enlevée à la position θ de la serge est inversement proportionnelle à la vitesse de l'ensemble balancier-spiral quand son extension angulaire vaut θ .

[0063] Pour un temps de traitement de l'ordre de la seconde ou de la dizaine de secondes, l'oscillation de l'ensemble balancier-spiral est bien décrite par une évolution harmonique,

$$A(t) = A_0 \sin(\omega t).$$

Ainsi, en explicitant la dernière expression pour f , on trouve

$$f(\theta) = \frac{k}{A_0 \omega \cdot \cos(\arcsin(\theta/A_0))}$$

ce qui s'écrit finalement

$$f(\theta) = \frac{k}{A_0 \omega \cdot \sqrt{1 - (\theta/A_0)^2}}$$

Cette expression n'a pas de sens quand $\theta > A_0$, mais on convient que, pour les valeurs de θ plus grandes que A_0 , f vaut zéro, ce qui est normal, puisque le picolaser ne parvient pas à ces positions.

[0064] Pour arriver à ce résultat, nous nous sommes restreints à un quart d'oscillation de l'ensemble balancier-spiral.

[0065] L'expression finale pour f correspondant à une période complète s'obtient de celle valable pour le quart de période par symétrie. Toutefois, il n'est pas réellement nécessaire de les inclure effectivement. En outre, chaque période complète en plus n'augmente pas le balourd.

[0066] Pour comprendre pourquoi on peut se limiter au premier quart de période pour notre calcul, appelons Ox l'axe qui joint l'axe du balancier au point de travail du picolaser, et Oy l'axe perpendiculaire à Ox . En ajoutant la deuxième moitié de période à f , on ne change pas la coordonnée X_{cm} du centre de masse de la matière enlevée, et l'on s'assure que la coordonnée y sera nulle, par symétrie. En ajoutant le deuxième quart de période à f , on ne fait que multiplier f par deux, ce qui ne modifie en rien la condition pour que $X_{cm} = 0$. En conséquence, on étudie X_{cm} en fonction de f défini par l'équation (1).

On a

$$x_{cm} = \int_0^x \frac{\cos(\theta) \cdot k}{A_0 \omega \cdot \sqrt{1 - (\theta/A_0)^2}} d\theta$$

Il s'agit enfin de déterminer les valeurs de déterminer les valeurs de A_0 qui annulent X_{cm} . Comme il n'existe pas de primitive permettant d'obtenir une solution de forme fermée de l'intégrale en jeu, on obtient les zéros du membre de droite de l'équation (2) ci-dessus de façon approchée, par intégration numérique.

[0067] Un graphe du membre de droite de l'équation (2) en fonction de A_0 est donné sur la fig. 1, où est représentée en ordonnée, la valeur algébrique de la position du centre de masse X_{cm} de la matière enlevée, en fonction de l'amplitude A_0 de la position angulaire.

[0068] On voit que, pour des valeurs de l'amplitude entre 0° et 360° , il existe deux amplitudes qui donnent un balourd nul, soit $A_0 = 137^\circ$ et $A_0 = 316^\circ$.

[0069] De préférence, on applique à ces valeurs une tolérance de plus ou moins $2,5^\circ$ par microgramme x centimètre de balourd, soit par exemple plus ou moins 5° pour un balourd de 2 microgrammes x centimètre.

[0070] Dans la pratique, il n'est pas nécessaire que le picolaser reste absolument immobile. On peut par exemple lui faire faire un mouvement de va-et-vient radial, tout en restant sur la serge. On peut aussi lui faire suivre différentes figures, comme par exemple un cercle, un huit, un polygone. Mais pour autant que la zone balayée par le picolaser ait une extension typique de l'ordre de l'épaisseur de la serge, le modèle théorique ci-dessus reste une excellente approximation, et ses conclusions restent valides.

[0071] Dans le raisonnement ci-dessus, nous n'avons pas considéré l'effet d'un déphasage. Sa contribution au balourd est toutefois négligeable, car chaque oscillation complète du balancier produit un balourd nul, donc le balourd associé au déphasage se monte au plus au balourd maximum créé durant une seule période incomplète.

[0072] Le calcul concret présenté ci-dessus a été mené quand l'évolution du mouvement du balancier possède une amplitude inférieure à 360° . Toutefois, rien n'impose de se limiter à ce cas. Par exemple, si un balancier devait avoir une amplitude supérieure à 360° , la fonction $A^{-1}(\theta)$ aura alors plusieurs solutions, même sur un quart de période, ce qui complique l'écriture des expressions, sans toutefois changer le raisonnement qui les sous-tend.

[0073] L'invention concerne encore, tel que visible sur la figure 2, un dispositif 1 de mise en œuvre du procédé, qui comporte au moins une source picolaser 2 et des moyens de pilotage 3 de cette source agencés pour générer, séquencer, interrompre au moins une série séquentielle d'impulsions du picolaser 2. Ces moyens de pilotage 3 sont encore agencés pour piloter les mouvements d'au moins un faisceau 20 issu du picolaser 2 ou le mouvement de cette source 2 elle-même. Le dispositif 1 comporte encore des moyens de mesure et de comparaison 4 interfaces ou raccordés avec ces moyens de pilotage 3, et des moyens de préhension et d'appui 5 d'un balancier 11 à micro-usiner, ou d'un ensemble balancier-spiral, ou analogue. Les figures simplifiées 1 et 3 à 5, ne représentent, de ce balancier 11, que sa serge 12 et son axe de pivotement 14.

[0074] Préférentiellement, ce dispositif 1 comporte encore des moyens d'entraînement en pivotement 6 d'un balancier 11 à micro-usiner, qui sont interfaces avec ces moyens de pilotage 3. Dans une autre variante, il est également possible de mettre en œuvre le procédé de l'invention avec un balancier en oscillation libre, le dispositif 1 comporte alors des moyens d'impulsion pour sa mise initiale en oscillation.

[0075] Dans un premier mode de réalisation, tel que visible sur la fig. 2, le dispositif 1 comporte des moyens de division 7 du faisceau issu du picolaser 2. Les moyens de pilotage 3 sont agencés pour piloter chacun des faisceaux 20, 20A, issus de la division. Le dispositif 1 peut aussi comporter, en alternative ou en complément, tel que visible sur la figure 3, plusieurs sources picolaser 2, 2A, les moyens de pilotage 3 sont alors agencés pour piloter chacun de leurs faisceaux 20, 20A vers des zones de micro-usinage 13, 13A définies par les moyens de pilotage 3.

[0076] La fig. 2 donne un exemple de pilotage de faisceaux 20 et 20A issus de la division et dont la trajectoire dans l'espace est définie par l'orientation de miroirs ou de prismes motorisés 21, de préférence à un ou deux degrés de liberté

en pivotement, qui sont pilotés par les moyens de pilotage 3. De tels miroirs ou prismes 21 peuvent aussi être incorporés dans un galvanomètre, ou être réalisés de toute façon connue dans la technique générale des lasers de puissance.

[0077] Avantageusement le dispositif 1 comporte des moyens de stabilisation d'amplitude 8 pour maintenir le mouvement de pivotement du balancier 11 à micro-usiner dans une oscillation à amplitude constante.

[0078] Avantageusement le dispositif 1 comporte des moyens de synchronisation 9, de préférence débrayables, pour synchroniser le mouvement d'au moins un faisceau 20 issu du picolaser 2 au mouvement de pivotement d'un balancier 11 pendant le déroulement de chaque série séquentielle d'impulsions.

[0079] De façon préférée et avantageuse pour canaliser toute pollution ainsi que pour laisser le domaine de travail parfaitement propre, le dispositif 1 comporte des moyens d'évacuation 10 des gaz ou/et déchets liés à la sublimation, ces moyens d'évacuation fonctionnant de préférence par différence de pression. Ces moyens d'évacuation ont pour double fonction, d'une part d'éloigner les gaz issus de la sublimation du domaine de travail, et d'autre part de protéger les opérateurs dans le cas où ces gaz peuvent présenter une toxicité.

Revendications

1. Procédé d'ajustement d'un balancier d'horlogerie comportant une serge périphérique et mobile en pivotement autour d'un axe de balancier, caractérisé en ce qu'on effectue un enlèvement de matière en transformant au moins une partie de la matière dudit balancier par sublimation, par la mise en œuvre d'un moyen de micro-usinage adapté pour effectuer l'ajustement d'inertie, ou/et d'équilibrage, ou/et de fréquence, dudit balancier.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'on transforme au moins une partie de la matière dudit balancier, ou de composants que porte ledit balancier, par sublimation, et en ce qu'au moins un picolaser constitue un dit moyen de micro-usinage pour effectuer ledit enlèvement de matière par micro-gravure sous l'effet d'au moins une impulsion dudit picolaser de façon à transformer directement la matière solide en un flux gazeux par sublimation, et des moyens de pilotage agencés pour générer, séquencer, interrompre toute impulsion dudit picolaser, commandent ladite impulsion, lesdits moyens de pilotage étant encore agencés pour piloter les mouvements d'au moins un faisceau issu dudit picolaser, lesdits moyens de pilotage étant asservis à des moyens de mesure ou de comparaison.
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que lesdits moyens de mesure ou de comparaison sont agencés pour effectuer des mesures sur ledit balancier lors d'un mouvement dudit balancier.
4. Procédé selon la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce que lesdits moyens de pilotage sont programmés de façon à définir au moins une zone particulière de ladite serge dudit balancier, ou de composants que porte ledit balancier, zone sur laquelle de la matière doit être enlevée, et lesdits moyens de pilotage sont programmés de façon à générer au moins une série séquentielle à grande fréquence moyenne d'impulsions dudit picolaser de façon à générer, sur ladite zone, au moins une ligne d'impacts successifs du faisceau dudit picolaser afin d'y réaliser une micro-gravure par enlèvement localisé de matière par sublimation.
5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que ledit procédé effectue l'ajustement de fréquence dudit balancier, et que lesdits moyens de pilotage sont programmés de façon à créer de l'avance sur ledit balancier par la répétition desdites opérations de micro-gravure sur des dites zones, de façon à atteindre une valeur de fréquence de consigne qui peut être contrôlée par lesdits moyens de mesure ou de comparaison, et de façon à générer lesdites opérations de micro-gravure sur lesdites zones dans le respect de l'équilibrage dudit balancier par rapport à son axe principal d'inertie, relativement à une valeur de consigne qui peut être contrôlée par lesdits moyens de mesure ou de comparaison.
6. Procédé selon la revendication 4 ou 5, caractérisé en ce que au moins deux faisceaux de mêmes caractéristiques sont dirigés simultanément en au moins deux dites zones de ladite serge ou de composants que porte ledit balancier, lesdites zones étant distantes l'une de l'autre, et radialement distantes de la même valeur dudit axe de balancier, ou bien par division du faisceau d'un unique picolaser, ou bien par synchronisation de plusieurs picolasers recevant les mêmes instructions desdits moyens de pilotage, et qu'une dite série séquentielle d'impulsions identique à celle de l'autre zone est générée sur chacune desdites zones.
7. Procédé selon la revendication 4 ou 5, caractérisé en ce que le faisceau d'un picolaser unique est déplacé d'une dite zone à une autre dite zone en symétrie de part et d'autre d'un plan passant par ledit axe de balancier, et que, sur chacune desdites zones, vers laquelle est alors focalisé ledit faisceau, est générée alternativement une dite série séquentielle d'impulsions identique à celle d'une autre zone la précédant ou la suivant directement dans la séquence de travail dudit picolaser.
8. Procédé selon la revendication 4 ou 5, caractérisé en ce qu'un picolaser unique est utilisé, et en ce que des moyens de stabilisation d'amplitude maintiennent le mouvement de pivotement du balancier dans une oscillation à amplitude constante pendant le déroulement de chaque dite série séquentielle d'impulsions.
9. Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce que ladite amplitude est stabilisée à un angle d'une valeur de 137° ou de 316,5°.

10. Procédé selon la revendication 4 ou 5, caractérisé en ce qu'un picolaser unique est utilisé, et en ce que des moyens de synchronisation synchronisent le mouvement d'au moins un faisceau issu dudit picolaser au mouvement de pivotement dudit balancier pendant le déroutement de chaque dite série séquentielle d'impulsions.
11. Dispositif (1) de mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte au moins une source picolaser (2), des moyens de pilotage (3) de ladite source (2) agencés pour générer, séquencer, interrompre au moins une série séquentielle d'impulsions dudit picolaser (2), lesdits moyens de pilotage (3) étant encore agencés pour piloter les mouvements d'au moins un faisceau (20) issu dudit picolaser (2) ou le mouvement de ladite source (2) elle-même, des moyens de mesure et de comparaison (4) interfaces avec lesdits moyens de pilotage (3), et des moyens de préhension et d'appui (5) d'un balancier (11) à micro-usiner.
12. Dispositif (1) selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il comporte encore des moyens d'entraînement en pivotement (6) d'un balancier (11) à micro-usiner, qui sont interfaces avec lesdits moyens de pilotage (3).
13. Dispositif (1) selon la revendication 11 ou 12, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de division (7) du faisceau (20) issu dudit picolaser (2), lesdits moyens de pilotage (3) étant agencés pour piloter chacun des faisceaux (20; 20A) issus de la division, ou/et en ce qu'il comporte plusieurs sources picolaser (2; 2A), lesdits moyens de pilotage (3) étant alors agencés pour piloter chacun de leurs faisceaux (20; 20A).
14. Dispositif (1) selon l'une des revendications 11 à 13, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de stabilisation d'amplitude (8) pour maintenir le mouvement de pivotement du balancier (11) à micro-usiner dans une oscillation à amplitude constante (11).
15. Dispositif (1) selon l'une des revendications 11 à 14, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de synchronisation (9) pour synchroniser le mouvement d'au moins un faisceau (20) issu dudit picolaser (2) au mouvement de pivotement d'un balancier (11) à micro-usiner pendant le déroulement de chaque dite série séquentielle d'impulsions.
16. Dispositif (1) selon l'une des revendications 11 à 15, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens d'évacuation (10) des gaz ou/et déchets liés à ladite sublimation, ladite évacuation fonctionnant par différence de pression.

Fig. 1

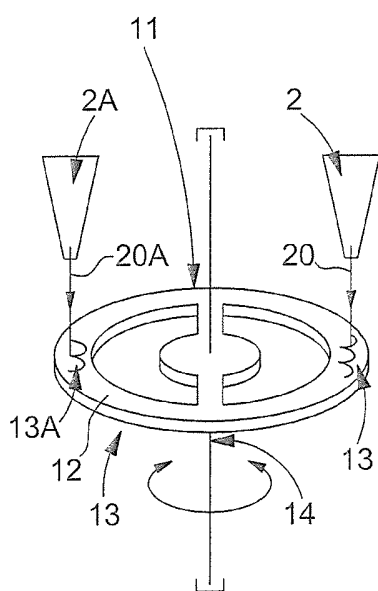
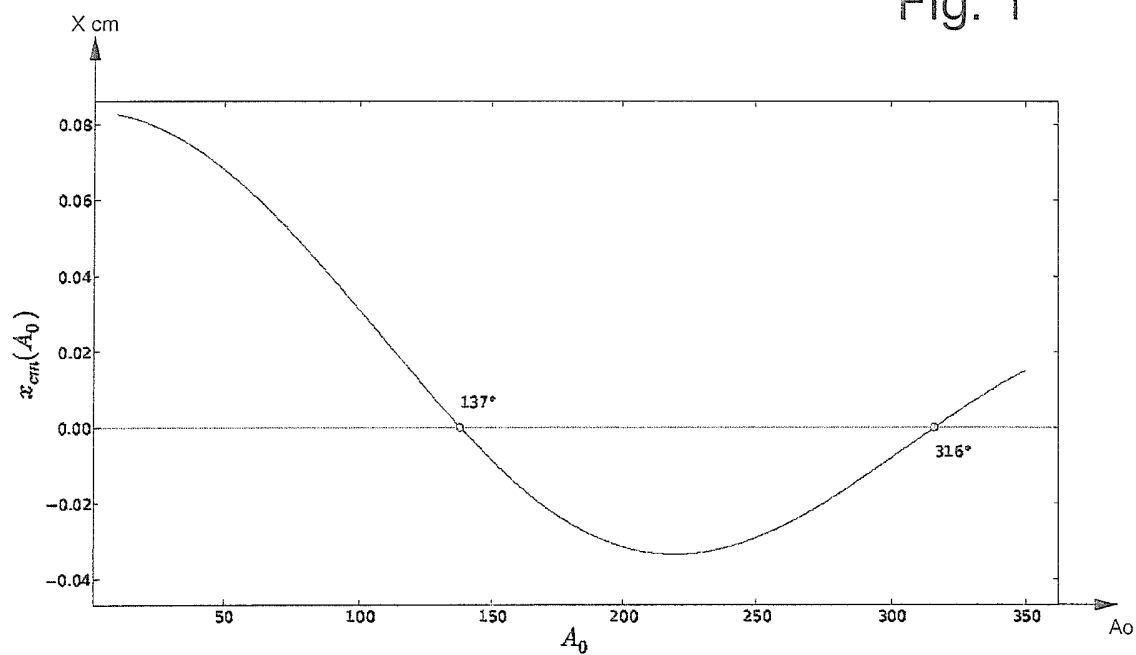


Fig. 3

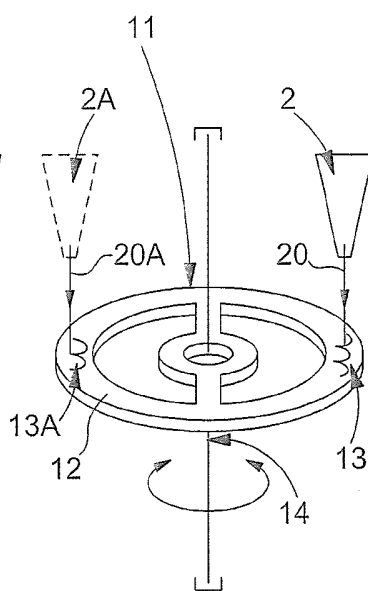


Fig. 4

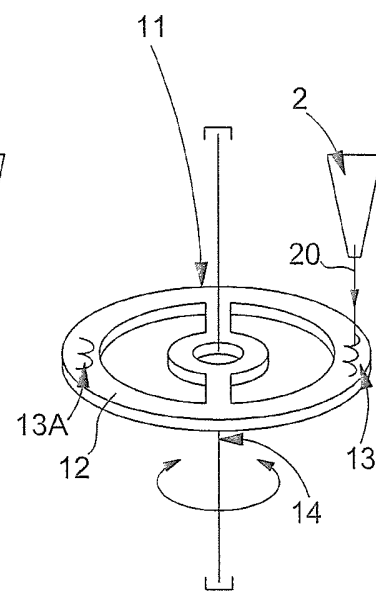


Fig. 5

Fig. 2

