

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication :
(A n'utiliser que pour les
commandes de reproduction).

2 519 156

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 81 24300

(54) Dispositif optique à source d'énergie radiante pour le transfert de motifs sur un substrat et procédé de mise en œuvre.

(51) Classification internationale (Int. Cl. 3). G 03 B 27/42; H 01 L 21/308.

(22) Date de dépôt..... 28 décembre 1981.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du public de la demande B.O.P.I. — « Listes » n° 26 du 1-7-1983.

(71) Déposant : Société dite : THOMSON-CSF, société anonyme. — FR.

(72) Invention de : Georges Dubroeucq, Michel Lacombat et Dorian Zahorski.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : P. Guiguet, Thomson-CSF, SCPI,
173, bd Haussmann, 75360 Paris Cedex 08.

DISPOSITIF OPTIQUE A SOURCE D'ENERGIE RADIANTE
POUR LE TRANSFERT DE MOTIFS SUR UN SUBSTRAT
ET PROCEDE DE MISE EN OEUVRE

L'invention se rapporte aux dispositifs optiques destinés au transfert de motifs sur un surface photosensible, comprenant une source d'énergie radiante en vue de l'insolation de la surface photosensible via un objet dont la transparence non uniforme caractérise le motif à reporter.

5 L'invention concerne également le procédé de mise en oeuvre d'un tel dispositif.

10 L'invention s'applique notamment à la fabrication des composants semiconducteurs par photorépétition directe sur un support d'une ou plusieurs images de faibles dimensions, à partir de motifs réalisés à une échelle beaucoup plus grande. Pour que la technique de photorépétition directe soit rentable, il est nécessaire de parvenir à des temps d'exposition très brefs.

15 Les techniques photolithographiques pour la fabrication des circuits intégrés ou autres composants semiconducteurs utilisent actuellement des sources d'énergie radiante dans le spectre visible et proche ultra-violet (longueur d'onde $\lambda \geq 365$ nm). Ces techniques font généralement appel à trois types de dispositifs qui diffèrent par la manière dont sont transférés les motifs à reproduire.

20 Le premier mode de transfert est du type "contact" ou "proximité", les motifs à transférer étant, soit mis en contact avec le substrat à exposer, soit placés à proximité immédiate (de l'ordre de $20\text{ }\mu\text{m}$) du substrat et c'est alors l'ombre projetée qui est transférée. Cette dernière méthode permet d'éviter une dégradation rapide du masque au prix d'une perte importante en résolution.

25 Le deuxième mode de transfert utilise une optique de projection 1 : 1 catadioptrique. La zone stigmatique fait 1 à 2 mm de large sur toute la longueur de la tranche. L'exposition de la tranche s'effectue en effectuant une translation simultanée du masque et de la tranche sous l'optique par balayage ou "scanning" selon l'expression anglo-saxonne la plus souvent utilisée.

30 Ces deux types de dispositifs utilisent généralement comme source

d'énergie radiante des lampes à vapeur de mercure avec notamment une sélection par filtrage de trois raies intenses de longueur d'onde 365, 405 et 436 nm. Les systèmes optiques étant inexistant dans le premier cas et, quasiment achromatique sur une large bande spectrale (supérieure à 100 nm) dans le second cas, le spectre le plus large possible de la lampe est utilisé, au prix d'une réduction de la résolution par rapport à la résolution optimale.

Le troisième mode de transfert fait appel à une optique dioptrique possédant en général un certain rapport de réduction (4 à 20). Dans ce cas le transfert se fait en projetant l'image des motifs inscrits sur un masque ou réticule à l'échelle correspondante.

Ces dispositifs appelés photorépéteurs sur tranches, utilisent des sources d'énergie radiante de longueurs d'ondes généralement à la limite du visible et de l'ultra-violet ($\lambda = 405$ nm ou $\lambda = 436$ nm) correspondant à deux raies très énergétiques des lampes à vapeur de mercure hautes pressions sélectionnées par filtrage. L'exposition se fait par arrêt sur l'image, c'est-à-dire que la tranche ou substrat est d'abord positionnée avec une grande précision ($< 0,2\mu m$) sous l'objectif de manière à faire correspondre la position de l'image du réticule qui sera projetée avec le ou les premiers niveaux d'intégration déjà inscrits sur le substrat. Dans une seconde phase, on éclaire le réticule, et l'énergie nécessaire à l'insolation de la photorésine est alors déterminé par une cellule et un intégrateur qui commandent la fermeture de l'obturateur. Les sources des illuminateurs de ces photorépéteurs sur tranches peuvent être de deux types :

- soit une lampe spectrale à vapeur de mercure haute pression dont on isole la raie pour laquelle l'optique est corrigée par l'intermédiaire de filtres interférentiels.

- soit une source cohérente continue tel le laser krypton de puissance maximale $P_{max} > 2$ watts et de longueur d'onde $\lambda = 413$ nm.

Les temps d'exposition sont typiquement de 300 ms à 1 seconde dans le cas de la lampe spectrale et de 100 ms dans le cas du laser krypton. Ils nécessitent pratiquement un arrêt de la tranche de semiconducteur pendant l'exposition, la vitesse de la table devant être inférieure à $1 \mu m/s$ dans le

meilleur des cas.

L'invention se fixe pour but, pour pallier les inconvénients de l'art connu, un dispositif optique à source cohérente d'énergie radiante permettant une augmentation importante de la cadence de transfert lithographique tout en conservant ou en améliorant la résolution atteinte dans l'art connu, ce dispositif étant en outre souple d'emploi et susceptible d'être exécuté selon de nombreuses variantes pour couvrir les besoins qui se font sentir dans le domaine de la microlithographie.

L'invention a donc pour objet dispositif optique à source d'énergie radiante pour le transfert de motifs composites permettant de reproduire avec un grandissement prédéterminé l'image d'un objet non diffusant à transparence non uniforme sur un substrat recouvert d'un matériau sensible aux radiations émises ; dispositif principalement caractérisé en ce que ladite source est un laser pulsé émettant des impulsions de durée constante et en ce qu'il comprend des moyens de commande et de contrôle de l'énergie émise par ledit laser, ces moyens comportant un organe de mesure cumulative de la quantité d'énergie transportée par lesdites impulsions et de comparaison avec une valeur de consigne.

L'invention a encore pour objet un procédé de mise en oeuvre de ce dispositif.

L'invention sera mieux comprise et d'autres caractéristiques et avantages apparaîtront au moyen de la description ci-après et des figures annexées parmi lesquelles :

- la figure 1 illustre l'organisation d'un dispositif optique de transfert de motifs sur un substrat.

- la figure 2 est un photorépéteur de l'art connu.

- les figures 3 et 4 représentent de façon détaillée des éléments entrant dans la réalisation d'un dispositif selon l'invention.

- la figure 5 est un exemple de réalisation du dispositif de l'invention selon une première variante de réalisation.

- la figure 6 illustre le procédé de mise en oeuvre du dispositif de la figure 5.

- la figure 7 illustre un exemple de réalisation du dispositif de l'invention selon une deuxième variante de réalisation.

- les figures 8 à 12 illustrent une variante supplémentaire de procédé selon l'invention.

Avant de décrire de façon détaillée le dispositif de l'invention dans ses variantes principales de réalisation, il est utile de rappeler la structure générale d'un dispositif optique de transfert de motifs sur un substrat photosensible et des éléments principaux le composant. Cette structure générale est commune à l'art connu et au dispositif de l'invention.

La figure 1 représente l'organigramme d'un tel dispositif.

Il comprend :

- 10 - une source d'énergie radiante 1
- des moyens 2 de contrôle et de commande de l'énergie d'exposition
- des moyens 3 d'extension de la dimension de la source
- des moyens 4 permettant de rendre uniforme l'éclairement en tous points de l'objet
- 15 - des moyens 5 de mise en forme du faisceau.

L'ordre des quatre derniers éléments n'est pas imposé et dépend de la mise en oeuvre particulière de chaque application. Certains éléments peuvent même être imbriqués ou confondus en un seul.

- un objet 6 portant le dessin à transférer ou réticule
- 20 - des moyens éventuels 61 de déplacement de l'objet dans son plan
- une optique de transfert 7 éventuelle
- un substrat 8 semiconducteur recouvert de photorésine 80 sensible à la radiation de la source
- des moyens éventuels 81 de déplacement du substrat.

25 L'invention est plus particulièrement concernée par les deux premiers éléments qui seront décrits de façon détaillée dans ce qui suit. Il est cependant utile de préciser quelques points de détails concernant les autres éléments constitutifs du dispositif illustré par la figure 1.

Les moyens d'extension de la dimension de la source ont pour rôle de simuler les effets d'un éclairement partiellement cohérent de l'objet, et éventuellement de contrecarrer l'apparition d'interférences parasites dues à la cohérence temporelle de la source, selon le type de source de rayonnement laser utilisé.

30 Les moyens d'uniformisation de l'éclairement de l'objet ont pour rôle

d'assurer un éclairement moyen le plus homogène possible de l'objet au cours de l'exposition (uniformité de l'ordre de 3 %) de manière à obtenir au niveau du substrat semiconducteur un transfert le plus uniforme possible du dessin dans la résine.

5 La mise en forme du faisceau consiste à adapter la forme du faisceau laser et sa divergence naturelle, aux dimensions de l'objet à éclairer, et aux caractéristiques de l'optique de transfert dans laquelle doivent converger les rayons lumineux venant de l'objet.

10 L'objet ou réticule est un support non diffusant, à transparence non uniforme ; en général une plaque de verre ou de quartz de bonne planéité ; recouvert d'une couche fine de matière opaque au rayonnement de la source ; ce matériau est typiquement du chrome, de l'oxyde de fer ou de l'oxyde de chrome.

15 L'optique de transfert peut être catadioptique, dioptrique, ou inexisteante dans le cas du transfert par contact ou proximité. Le rapport de réduction de l'objet peut être quelconque, en général compris entre 4 et 20. L'objet et le substrat sont immobiles l'un par rapport à l'autre pendant l'exposition dans le cas de transfert par contact ou proximité.

20 La figure 2 illustre un exemple de réalisation concrète d'un photorépéteur de l'art connu et qui est d'un type substantiellement analogue au photorépéteur décrit dans le brevet français publié sous le numéro FR - B - 2406 236.

25 Les mêmes références que celles de la figure 1 ont été utilisées pour les éléments communs aux deux figures. Une source laser 1 délivre en continu un faisceau 10 à très faible divergence. Pour la commodité du montage, le faisceau est transmis par un ensemble de miroirs 100, 101, 102 vers le dispositif de contrôle de l'énergie d'exposition qui comprend un obturateur 20. Ce dispositif est suivi d'une lentille convergente 30 et d'un diffuseur 31 qui jouent le rôle de moyens 3 d'extension de la source et d'uniformisation de l'éclairement 4. Les moyens de mise en forme du faisceau sont constitués d'un condenseur de lumière 5. L'optique de transfert 7 est principalement constituée d'un objectif de grossissement approprié à l'échelle désirée, qui projette le faisceau traversant l'objet 6 sur la zone désirée 8 d'un substrat semiconducteur, par exemple du silicium, recouvert

d'une couche de résine photosensible 81.

Le rôle de l'obturation est d'assurer l'éclairement de l'objet 6 avec une énergie déterminée. L'obturateur se ferme dès que l'énergie d'exposition a atteint la valeur pour laquelle la résine est impressionnée. Pour ce faire, on place sur le trajet du faisceau un photodétecteur 21 qui capte une fraction constante de l'intensité du faisceau illuminant l'objet 6. La sortie du photodétecteur est reliée à un intégrateur 22 qui délivre un signal électrique croissant avec la quantité d'énergie d'éclairement depuis l'ouverture de l'obturateur. Le signal électrique intégré est appliqué à un organe de commande 23 de l'obturateur 21. L'organe de commande comporte un comparateur à seuil auquel est appliqué le signal électrique intégré, ainsi que la valeur d'un seuil prédéterminé issue d'un sélecteur 24. Le dispositif de commande 23 provoque la fermeture de l'ouverture de l'obturateur lorsque le seuil de déclenchement est atteint. Le sélecteur 24 délivre en outre un signal de remise à zéro de l'intégrateur, entre deux poses successives.

Le mode de commande permet d'obtenir avec précision des énergies d'exposition constantes puisqu'il tient compte des fluctuations éventuelles de l'intensité du faisceau 1 pour déterminer la durée de l'exposition.

Le diffuseur 31 est chargé de remédier à un défaut qui apparaît avec une radiation cohérente sur les images projetées. L'expérience permet de constater des figures d'interférence parasites. Le phénomène est du à la cohérence temporelle de la source.

Les figures d'interférence sont gênantes pour la qualité des images obtenues sur le support. Pour y remédier, on crée, artificiellement une modulation de phase dans le faisceau provoquant un déplacement des figures d'interférence autour d'une position moyenne, de façon à obtenir plusieurs déplacements pendant la durée d'exposition. L'intégration par la couche photosensible permet ainsi d'effacer les figures d'interférence sans nuire à la qualité des images car l'objectif n'a subi aucun déplacement. Le diffuseur 31 réalise cette modulation. Il s'agit d'un disque diffusant animé d'un mouvement de rotation rapide grâce à un moteur 32. La vitesse de rotation doit être suffisante pour l'effacement des figures d'interférence.

On peut également utiliser un diffuseur vibrant, ou un objet transparent quelconque vibrant ou tournant assez rapidement, une lame de verre

ordinaire, lentille....

Lorsqu'on utilise un élément diffusant, il joue en même temps le rôle d'élargisseur de lumière qui coopère avec la lentille 30 et le condensateur 5, une lentille convergente par exemple, pour délivrer le faisceau élargi, qui éclaire l'objet 6.

Lorsqu'on utilise un élément non diffusant, l'élargissement du faisceau est assuré par les deux lentilles 30 et 5.

L'objet 6 ou réticule est supporté par un plateau 600 ou porte-réticule pouvant être déplacé dans un plan selon deux axes de références XY orthogonaux entre eux à l'aide de moteurs d'entraînement 601 et 602. Il en est de même du substrat qui est solidaire d'une table XY de translation 810 entraînée par deux moteurs 811 et 812.

Le dispositif qui vient d'être décrit est naturellement plus complexe et comporte notamment des moyens de repérage de la position de la table XY : 810 dans l'espace et des moyens pour réaliser l'alignement du réticule 6 par rapport au substrat 8. Ces moyens sont bien connus de l'homme de métier et sortent du cadre de l'invention.

Ce dispositif est du type mettant en oeuvre une technique de transfert selon le troisième mode précédemment rappelé.

Bien que permettant une cadence de répétition plus grande que celle des dispositifs antérieurement connus, permise notamment par l'utilisation de sources cohérentes du type laser, cette cadence peut être jugée insuffisante pour certaines applications.

L'invention se propose, parmi d'autres avantages, de répondre à ce besoin et un exemple de réalisation de dispositif conforme à l'invention va maintenant être décrit.

Le dispositif de l'invention conserve en grande partie la structure qui vient d'être décrite, notamment sous sa forme la plus générale en relation avec l'organigramme de la figure 1. Les mesures adoptées dans le cadre de l'invention concernent plus particulièrement la source d'énergie radiante et les moyens de contrôle de commandes de l'énergie d'exposition.

Selon une des caractéristiques principales de l'invention, il est utilisé comme source d'énergie radiante un laser pulsé.

Ce type de laser présente plusieurs caractéristiques : l'émission est

très énergétique et de très courte durée, un fonctionnement en impulsion unique très énergétique ou en impulsions répétées moins énergétiques peut être sélectionné selon l'application envisagée et certains types émettent dans l'ultrat-violet, proche ou lointain. En ce qui concerne ce dernier point les avantages d'un fonctionnement dans cette gamme de longueurs d'ondes seront détaillés ultérieurement.

Les sources laser pulsées peuvent être de deux types :

- soit des sources lasers continues rendues pulsées par divers dispositifs
- 10 - soit des sources lasers pulsées intrinsèquement par le fait de l'excitation elle-même : par exemple, les lasers eximères ou exciplexes utilisant un mélange de gaz rare et d'halogène comme milieu actif.

En ce qui concerne le premier type de sources lasers, deux méthodes entre autres (dites "Q-Switch" et "Mode locking" selon la terminologie anglo saxon), permettent de passer d'une émission continue d'un faisceau laser à une émission pulsée, avec les propriétés suivantes :

- la puissance moyenne P_m est sensiblement la même que celle du rayonnement continu
- les puissances crêtes P_c sont très élevées et obéissent à la relation :
20 $(P_c/P_m) \approx (t_R/t_p)$ dans laquelle t_p est la durée d'une impulsion et t_R l'intervalle entre deux impulsions successives.

Dans le cas mode dit "Q-Switch", on interdit l'effet laser pendant un certain temps, ce qui détermine la fréquence de "tir" $F = 1/t_R$, en empêchant la réflexion sur un des miroirs dont est munie la cavité, de sorte qu'au moment du "tir", l'inversion de population des niveaux d'énergie est maximale. Divers procédés sont connus parmi lesquels :

- utilisation de miroirs tournants
- utilisation d'une cellule électrooptique
- introduction d'un absorbant saturable

30 Dans le cas dit de "mode locking" ou modes-bloqués, on sélectionne un nombre prédéterminé de modes que l'on amplifie et on impose des pertes aux modes non sélectionnés grâce à un modulateur de perte qui peut être par exemple un cristal acousto-optique placé à l'intérieur de la cavité laser.

Le second type de source comprend les sources lasers pulsées de façon

intrinsèque. L'effet laser a lieu dans un milieu où l'inversion de population entre un niveau excité et niveau inférieur ne peut être maintenue constant. Le phénomène se passe alors en deux temps :

5

- création de l'inversion de population
- effet laser.

La fréquence maximale de "tir" est imposée dans ce cas, par le temps de restauration de l'inversion de population entre deux impulsions.

10

Ces deux derniers types de laser sont utilisés dans une variante préférée de l'invention, car ils permettent en outre un fonctionnement direct dans les gammes d'onde allant du proche ultra-violet à l'ultra-violet lointain, ce avec la forte énergie émise précitée.

15

Les lasers exciplexes sont tout particulièrement intéressants car leur puissance moyenne peut dépasser 20 watts. Par ailleurs, la cohérence temporelle de ces lasers est beaucoup plus faible que celle des sources lasers de types plus classiques et l'on peut donc en attendre une réduction importante de l'effet parasite connu sous le nom anglo-saxon de "Speckle", effet parasite qui a nécessité la mise en oeuvre du diffuseur 31 dans le dispositif décrit en relation avec la figure 2.

20

L'utilisation de longueurs d'ondes plus courtes permet à résolution égale, d'améliorer sensiblement la profondeur de champ, en duplication par contact en réduisant la diffraction et en projection en réduisant l'ouverture numérique des optiques.

25

La méthode par contact ou proximité est basée sur le principe de l'ombre portée. Le masque éclairé projette son ombre sur la résine déposée sur le substrat. En fait pour des traits de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la source lumineuse utilisée, la diffraction lumineuse déforme l'image projetée.

30

La résolution L et la profondeur de champ δ sont reliées par la relation de Fresnel :

$$\frac{L^2}{\delta} > 0.5 \lambda, \text{ dans laquelle } \lambda \text{ est la longueur d'onde émise par la source.}$$

Cette relation détermine la limite de résolution pour une uniformité d'éclairement de $\pm 5\%$ et une tolérance de largeur de trait $\Delta L/L$ de $\pm 30\%$. A profondeur de champ constante, la résolution est donc proportionnelle à $\lambda^{1/2}$. Par contre la profondeur de champ est inversement proportionnelle à λ , à résolution constante.

En photolithographie par projection, la résolution utile et la profondeur de champ s'expriment par les relations suivantes :

$$L > (1,6 \lambda / 2 \cdot ON)$$

$$|\delta| < (\lambda / ON^2)$$

dans lesquelles ON est l'ouverture numérique de l'objectif utilisé pour la projection. A ouverture numérique constante, la résolution est proportionnelle à la longueur d'onde λ et l'effet sur la résolution est plus grand. Par contre dans ce cas, la profondeur de champ diminue proportionnellement à λ .

Réduire la longueur d'onde pour augmenter la résolution est à priori plus avantageux qu'augmenter l'ouverture numérique des objectifs de projection du point de vue de la profondeur de champ puisque celle-ci décroît comme λ et comme l'inverse du carré de l'ouverture numérique.

Par contre, en diminuant simultanément la longueur d'onde et l'ouverture numérique, on maintient la résolution, tout en améliorant sensiblement la profondeur de champ.

Les deux paramètres résolution : L et profondeur de champ : δ sont liés par la relation :

$$(L^2 / \delta) \geq 0,64 \lambda$$

un compromis est donc choisi entre ces deux paramètres.

Dans les applications actuelles, une tranche ou substrat est divisée typiquement en zones élémentaires de 50 à 100 mm². Une tranche de diamètre standard 100 mm comprend 60 à 100 zones élémentaires sur lesquelles sont projetées les images à reproduire de façon répétée. Dans ces conditions, pour des champs images maximum (10x10), les lois de la diffraction optique limite la résolution utile à 1 μm pour une longueur d'onde $\lambda = 436$ nm et à 0,8 μm pour $\lambda = 250$ nm, pour une profondeur de champ limite de 4 μm.

Pour fixer les idées des exemples de lasers pouvant être utilisés dans

le cadre de l'invention sont les suivants, ce sans que cette énumération soit limitative :

- laser exciplexe krypton - fluor ($K_r F$)
- . longueur d'onde émise centrée sur : $\lambda = 248 \text{ nm}$
- 5 . énergie par impulsion : 250 mJ
- . durée d'une impulsion : 16 nS
- . puissance de crête : 15 MW
- . fréquence de répétition : typiquement dans la gamme 0,1 à 100 Hz
- 10 - laser exciplexe Argon - fluore ($A_r F$)
- . longueur d'onde émise centrée sur : $\lambda = 193 \text{ nm}$
- . énergie par impulsions : 200 mJ
- . durée d'une impulsion : 14 nS
- . puissance de crête : 10 MW
- 15 . fréquence de répétition : typiquement dans la gamme 0,1 à 60 Hz

Une deuxième caractéristique importante du dispositif selon l'invention concerne l'organisation des moyens de contrôle et de commande de l'énergie d'exposition. Ces moyens permettent un fonctionnement du dispositif selon deux modes principaux d'exposition d'une zone déterminée du substrat : l'exposition par impulsions multiples et l'exposition par une impulsion unique.

Le premier mode consiste à émettre un grand nombre d'impulsions de rayonnement laser, par exemple une centaine, tel que la somme des énergies émises corresponde à l'énergie d'exposition souhaitée.

25 Le second mode consiste à émettre une seule impulsion d'énergie suffisante, c'est-à-dire égale ou supérieure à l'énergie nécessaire pour exposer la résine photosensible.

La figure 3 illustre l'organisation des moyens de contrôle et de commande de l'énergie d'exposition. Le faisceau 10 émis par la source laser pulsée est intercepté par un séparateur de faisceau qui en extrait une partie constante et la renvoie vers des moyens de détection électronique d'intensité optique. Dans l'exemple de réalisation spécifique illustré par la figure 3, ces moyens sont constitués respectivement par une lame faiblement réfléchissante M_1 à la longueur d'onde émise et une photo-diode D sensible à cette même longueur d'onde. La tension développée en sortie de cette

photo-diode est transmise à une première entrée d'un circuit de traitement de ce signal 201. Celui-ci reçoit sur une seconde entrée e_2 une valeur de consigne issue d'un sélecteur 203. Le circuit de traitement de signal 201 élabore sur un premier signal de commande sur une première sortie S_1 destinée à piloter les circuits électroniques de commandes associés à la source laser pulsée 1. Ces circuits comprennent essentiellement des moyens d'alimentation en énergie de la source laser. Ces moyens d'alimentation comprennent habituellement un élément d'accumulation de l'énergie électrique nécessaire pour la production d'une impulsion d'énergie radiante qui peut être un condensateur et un commutateur électroniques commandant la transmission effective de l'énergie à la source laser. Ce dernier peut être constitué par un thyration, un thyristor ou tout composant électronique équivalent dont l'amorçage est commandé par le signal issu des circuits 201.

Dans le mode d'exposition à impulsions multiples, les circuits 201 comprennent un intégrateur d'impulsions et un comparateur comparant la valeur cumulée des impulsions, qui est représentative de l'énergie radiante reçue par le substrat à isoler, et la valeur de consigne transmise par les circuits sélecteurs 203. Ces circuits peuvent être réalisés selon variantes, analogiques ou numériques, accessibles à l'homme de métier. Pour fixer les idées, dans un exemple de réalisation simplifiée, on peut se contenter de compter les impulsions dans un compteur binaire ou sorties multiples jouant le rôle d'intégrateur dont le mot binaire sur ces sorties multiples est comparé après chaque impulsion émise par la source laser à un mot binaire de consigne transmis par le sélecteur 203. Celui-ci, dans cette variante, peut être constitué d'un clavier d'entrée de données manipulé par un opérateur.

Les circuits 201 transmettent aux circuits électroniques de commande 202, de la source laser pulsée 1 un signal d'autorisation après chaque comparaison tant que la valeur de l'énergie radiante produite n'a pas atteint la valeur de consigne.

Dans le mode d'exposition par une impulsion unique, les circuits 201 ont pour but de vérifier l'évolution dans le temps de l'énergie émise et de la comparer éventuellement à la valeur de consigne. Dans ce mode, le faisceau

transmis 10 par le miroir semi-transparent M_1 , après réflexion éventuelle sur un ou plusieurs miroirs tels que le miroir M_2 , placés sur le faisceau, est transmis suivant toute direction de propagation convenable. Il traverse également un élément optique atténuateur ajustable 200 placé en amont des miroirs M_1 et M_2 . Cet élément a pour but d'adapter l'énergie transmise à ladite valeur de consigne. Vue la durée très courte des impulsions émises par la source laser, il est difficile d'effectuer un calibrage en temps réel. Ce calibrage peut s'effectuer à intervalles réguliers ou de façon épisodique, par exemple avant le début du processus d'exposition d'un substrat, en émettant une impulsion test. Le circuit 201 évalue l'énergie émise et élabore un signal de commande de l'élément atténuateur ajustable 200 sur une seconde sortie S_2 . Ce signal peut être dérivé simplement, soit du signal détecté par les circuits 201 et représentant la valeur absolue de l'énergie transmise par l'impulsion test, soit de la différence entre l'amplitude de ce signal et le signal de consigne transmis à l'entrée e_2 .

Dans un exemple de réalisation pratique, représenté sur la figure 4, l'élément optique atténuateur ajustable peut comprendre un disque en matériau de densité optique variable, atténuant le faisceau 10 émis par la source laser lors de la traversée du matériau. Cette atténuation peut être continûment variable ou au contraire être réalisée par incrément successifs, le disque présentant des zones à variations discrètes de densité optique comme illustré sur la figure 4. Cette variante permet une numérisation du processus. Le disque 2001 est entraîné par un moteur 2003. Un circuit de commande 2006 recevant sur une première entrée e_3 le signal de commande élaboré par les circuits 201, transmet au moteur 2003 un signal d'alimentation pour que celui-ci mette en rotation via un axe d'accouplement 2008, le disque atténuateur 2001 autour d'un axe Δ parallèle à la direction de propagation du faisceau laser 10 et le positionne à une position déterminée. Des moyens de détection de la position angulaire du disque 2001, constitués par exemple par un disque 2004 comportant une piste codée 2004 lue par un organe détecteur 2007 permettent de déterminer à tout instant la position du disque atténuateur 2001 et de ce fait l'atténuation apportée au faisceau 10, sous la commande du signal transmis par les circuits 201.

L'élément optique atténuateur peut également être utilisé dans le

cadre du premier mode d'exposition à impulsions multiples de manière à obtenir des impulsions à énergie constante. On peut régler l'énergie émise entre chaque impulsion si le temps disponible est suffisant ou de façon épisodique de la manière indiquée précédemment.

5 On va maintenant décrire en relation avec les figures 5 à 12, plusieurs variantes d'exécution d'un dispositif et de procédé de mise en oeuvre conforme à l'invention, chacune de ces variantes étant adaptées plus particulièrement à l'un des deux modes respectifs d'exposition, par impulsions répétées et par impulsion unique.

10 La figure 5 illustre une première variante d'exécution. Dans cette variante, le choix de la source laser pulsée 1 se porte avantageusement sur un laser de type Exciplexe krypton - fluor ($K_r F$) des radiations de longeur d'onde centrée sur la valeur $\lambda = 248$ nm.

15 Les moyens de contrôle et de commande de l'énergie d'exposition 2 agissent, comme il a été décrit sur le nombre d'impulsions émises et, de façon optionnelle sur l'atténuation du faisceau émis à l'aide de l'élément optique atténuateur 200 (figure 3). Dans un exemple typique, la source laser pulsée 1 est autorisée à émettre cent impulsions calibrées à 1 mJ chacune.

20 L'élément optique atténuateur peut également jouer le rôle des moyens d'uniformisations de faisceau 4. Les moyens d'extension de la dimension du faisceau peuvent être réalisés à l'aide du dispositif décrit dans la demande de brevet Européen au nom de la demanderesse, publiée sous le N° 0 018 249. Dans le dispositif décrit, on forme l'image de la source dans un plan déterminé par des moyens optiques de balayage selon deux axes de coordonnées commandés électriquement permettant de déplacer ladite image dans le plan déterminé de manière à synthétiser dans ce plan une source de dimension, de forme et de distribution énergétique prédéterminée. L'optique de transfert 7 est constitué par un objectif dioptrique de grossissement ($1/N$) corrigé pour la longueur d'onde émise. N est par exemple compris entre quatre et vingt et dans le cas général un nombre quelconque plus grand ou égal à 1.

25 30 Les lentilles constituant l'objectif peuvent être en silice pure ou silice-fluorine. L'objectif, du fait de la longueur d'onde située dans l'ultraviolet-violet, peut être conçu avec des ouvertures numériques plus faibles que celles

habitulement utilisées dans l'art connu, à champ image et résolution égaux. Il permet par conséquent d'après ce qui a été rappelé, de disposer d'une profondeur de champ environ deux fois plus élevée que les valeurs courantes, ce qui permet de travailler avec à la fois, les défauts de planéité résiduels habituels des substrats semi-conducteurs, et la courbure de l'onde au plan image.

Le procédé d'exposition du substrat mettant en oeuvre le dispositif de la figure 6 est susceptible de deux variantes. Selon une première variante le substrat 8 est entraîné pas à pas à l'aide d'une table de translation à avance rapide 810 le réticule 6 sur lequel est inscrit le dessin à reproduire est immobile. Il y a arrêt sur image pendant le temps nécessaire à l'exposition, c'est-à-dire pendant le temps nécessaire à l'émission du nombre nécessaire d'impulsions pour obtenir l'insolation de la photorésine 80 dans la zone de projection d'image. Les circuits de contrôle et de commande d'exposition 2 peuvent transmettre un signal d'autorisation SA d'avance au pas suivant transmis aux circuits de commande des moyens de déplacement 81 du substrat 8. Dans cette variante les moyens de déplacement 60 de l'objet ou réticule 6 ne jouent pas de rôle actif.

Selon une seconde variante, le substrat 8 et l'objet 6 avancent simultanément de manière à ce que l'image du dessin porté par l'objet se forme dans la même zone élémentaire à isoler du substrat. Les vitesses relatives des moteurs d'entraînement, semblables à ceux représentés sur la figure 2 doivent être adaptées au rapport de grossissement de l'objectif 7 pour que la vitesse de déplacement de l'image projetée soit la même que celle du substrat. Une fois le nombre d'impulsions nécessaires à l'insolation de la résine atteint, l'image à reproduire est projetée dans la zone à isoler suivante du substrat.

Dans les deux variantes, comme il est connu, les insolations successives s'effectuent suivant un trajet en lacet f de la manière représentée schématiquement sur la figure 5. Les zones élémentaires 800 successives sont isolées à tour de rôle par avance suivant une direction parallèle à l'un des axes de coordonnées (Y) et selon l'une des deux méthodes précédemment décrites. Ensuite les moteurs d'entraînement de l'objet 6 et/ou du substrat 8, décalent la projection de l'image sur le substrat d'un pas égal à la largeur

d'une zone élémentaire, suivant une direction parallèle à l'autre axe de coordonnée (X), et le processus d'insolation recommence.

La figure 7 illustre une seconde variante de réalisation de l'invention spécialement adaptée à un mode d'exposition par impulsion unique. Le choix pour la source laser pulsée 1 se porte avantageusement sur un laser également de type Exciplexe au Krypton - Fluor mais de plus forte puissance. La longueur d'onde est la même que précédemment rappelée : $\lambda = 248 \text{ nm}$. Les moyens de contrôle et de commande de l'énergie d'exposition 2 mesurent, comme il a été décrit, l'énergie transmise par chaque impulsion et agissent en conséquence sur l'élément atténuateur ajustable 200 (fig.3). Cette mesure se fait de façon préférentielle sur une impulsion test dans une étape préliminaire au processus d'exposition du substrat 8. Les moyens d'extension de la dimension de la source 3 et d'uniformisation 4 sont avantageusement combinés en des moyens uniques constitués par un intégrateur de lumière de type dit "oeil de mouche". Les moyens de mise en forme de faisceau 5 peuvent être réduits à un simple système de condenseurs. Le réticule 6 et l'objectif 7 sont analogues à ce qui a été précédemment décrit en relation avec la figure 6.

Le mode d'exposition par impulsion unique est particulièrement adapté à un procédé de transfert dit "à la volée". Les moyens de déplacement du substrat 81 comprennent une table de translation 810 mise en mouvement uniforme selon l'une des coordonnées, Y par exemple. La position selon cette coordonnée est repérée en temps réel, à l'aide d'interféromètres à franges par exemple. Ce type d'organe de mesures est bien connu dans la technique de microlithographie et il est inutile de le décrire en détail. Il comporte généralement des compteurs numériques que l'on peut utiliser dans le cadre de la présente variante pour générer des impulsions de synchronisation Sy transmis aux circuits électroniques de commande 202 pour l'alimentation de la source laser pulsée 1, de façon à ce que l'émission d'impulsions par la source laser 1 soit coordonnée avec le mouvement de la cible constituée par le substrat 8 à isoler. L'insolation proprement dite peut s'effectuer selon deux variantes.

Si on se reporte à nouveau à la figure 7, chaque zone élémentaire 800 peut être isolée en une seule fois, c'est-à-dire par une seule impulsion

laser. L'énergie nécessaire étant proportionnelle à la surface, cela nécessite cependant une puissance considérable.

5 Dans le cadre de l'invention, il est également particulièrement intéressant de mettre en oeuvre un procédé qui peut se définir par le couple balayage-saut par référence aux termes anglo-saxons "scan" et "step" bien connus dans la technique de photorépétition.

10 Selon ce procédé, le transfert du dessin du masque à l'échelle 1 s'effectue ligne par ligne et en deux étapes selon une configuration analogue à celle illustrée par la figure 6.

L'optique de projection 7 au grandissement 1 fait correspondre à chaque instant une zone déterminée du masque 6 à une zone correspondante du substrat.

15 Les deux étapes sont les suivantes :
a/ transfert d'une ligne par déplacement simultané du masque et du substrat (balayage)

b/ en fin de ligne, le substrat est décalé de la largeur d'une ligne, selon une direction orthogonale à la direction de balayage (saut).

20 Le processus est ensuite répété.
Dans une variante supplémentaire non illustrée, ce sont les systèmes optiques d'éclairement et de projection qui sont déplacés simultanément pour effectuer le balayage.

25 De façon typique sur le substrat sera inscrit, niveau intégration par niveau d'intégration un certain nombre de circuits à réaliser, généralement identiques et répartis comme il vient d'être rappelé en lignes et colonnes. Cependant à la place de ces circuits à réaliser, dans des zones bien définies, il est d'usage d'inscrire des circuits dits de test servant à contrôler la bonne marche du processus au cours des différentes étapes de fabrication des circuits, selon des méthodes qui sortent du cadre de la présente invention.
30 Un niveau d'intégration sur le substrat est illustré par la figure 8 et comprend donc typiquement trois types de lignes illustrées par les séquences des figures 9 à 11. Les symboles "C" et "T" signifient respectivement circuits normaux et circuits de test. Dans ce cas, on sélectionne pour chaque ligne un dessin de masque parmi trois, par exemple en faisant effectuer un

déplacement brusque du masque en fin de ligne.

De façon plus générale le masque comporte un nombre préétabli de dessins de ligne différentes r. La sélection du dessin à réaliser peut s'effectuer par des méthodes bien connues de programmation de moyens électroniques de sélection qui sortent du cadre de l'invention. Chaque type de dessin de ligne est reproduit suivant ce programme le nombre de fois nécessaire à l'obtention de la configuration finale inscrite sur la substrat (par exemple celle illustrée par la figure 9).

L'exposition de la résine le long d'une ligne se fait de façon continue de la manière illustrée par la figure 12. Le champ de l'optique de projection est en général carré ou rectangulaire et correspond le plus souvent aux dimensions d'un circuit ou d'un nombre entier de circuits. Il correspond à une zone de projection 800 - 1 à 800 - n. Chacune de ces zones correspond à l'instant d'illumination d'une zone d'une ligne de masque par une impulsion unique issue de la source laser pulsée. Selon la vitesse de balayage et la cadence d'émission des impulsions, ces zones se chevauchent de façon plus ou moins accentuée comme illustrée par la figure 12.

Dans une variante non illustrée, le champ de projection peut être rendu variable en fonction de la taille du circuit à projeter, par exemple à l'aide d'un système de quatre caches mobiles placés dans un plan conjugué optique du plan du substrat par rapport à l'optique de projection.

L'énergie reçue par la résine obéit à la relation suivante :

$$W_r = \frac{EL}{v} (\text{m J/cm}^2) \quad (1)$$

dans laquelle : v est la vitesse de balayage d'une ligne

E l'éclairement en m W/cm^2

et L la longueur de la zone de projection.

L'avantage apporté par ce type d'exposition est qu'il n'est pas nécessaire que l'éclairement soit parfaitement uniforme selon la direction de balayage.

La condition d'uniformité s'écrit conformément à la relation :

$$\int_{t_o}^{t_o + \frac{L}{v}} E(v(t) \cdot t, y) \cdot v(t) dt = \text{constante} \quad (2)$$

ce quelquesoit y et t_0 ; relation dans laquelle :

t_0 représente l'instant de départ

y une coordonnée selon la direction orthogonale au déplacement x de ligne

5 et t un temps quelconque.

Si v est constant et $E(x,y)$ est constant quelquesoit t (stabilité temporelle de la source), la condition s'écrit plus simplement :

$$10 \quad \int_0^{L/v} E(x,y) dx = \text{constante}, \quad (3)$$

ce quelque soit y .

Dans le cas d'une source pulsée selon l'invention, la relation (3) devient :

$$15 \quad W = W_p \cdot \frac{L}{v} \cdot \frac{1}{T_p} \quad (4)$$

relation dans laquelle W_p est l'énergie par cm^2 d'une impulsion et T_p la durée d'une impulsion.

20 L'invention n'est pas limitée aux exemples de réalisations qui viennent d'être décrits. Bien que particulièrement avantageuse dans son application à la photorépétition directe, elle s'applique également aux autres procédés de transfert. En outre, les résines peuvent être de tous types, sensibles aux radiations dans le sens général de ce terme.

REVENDICATIONS

1. Dispositif optique à source d'énergie radiante pour le transfert de motifs composites permettant de reproduire avec un grandissement prédéterminé l'image d'un objet (6) non diffusant à transparence non uniforme sur un substrat (8) recouvert d'un matériau (80) sensible aux radiations émises ;
5 dispositif caractérisé en ce que ladite source est un laser pulsé (1) émettant des impulsions de durée constante et en ce qu'il comprend des moyens (2) de commande et de contrôle de l'énergie émise par ledit laser (1), ces moyens comportant un organe (201) de mesures cumulatives de la quantité d'énergie transportée par lesdites impulsions et de comparaison avec une valeur de consigne (203).
- 10 2. Dispositif selon la revendication 1 caractérisé en ce que le laser pulsé (1) émet au moins une raie de longueur d'onde comprise dans le spectre de l'ultra-violet.
- 15 3. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2 caractérisé en ce que le laser pulsé (1) est un laser à gaz de type exciplexe ou eximère utilisant un mélange de gaz rare et d'halogène comme milieu actif.
4. Dispositif selon la revendication 3 caractérisé en ce que le mélange est un mélange krypton - fluor ; le laser (1) émettant une raie centrée sur la longueur d'onde 248 nm.
- 20 5. Dispositif selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'organe de mesure cumulative comprend un séparateur de faisceau (M_1) disposé sur le trajet du faisceau émis (10) et prélevant une fraction constante de ce faisceau et un détecteur opto-électronique (D) convertissant l'intensité optique de ladite fraction de faisceau en un signal électrique représentatif.
- 25 6. Dispositif selon la revendication 1 caractérisé en ce que les moyens de commande et de contrôle comprennent en outre un élément optique atténuateur variable (200) placé sur le trajet du faisceau émis (10).
- 30 7. Dispositif selon la revendication 6 caractérisé en ce que l'élément optique atténuateur est un disque (2001) en matériau présentant des zones (2002) de densités optiques différentes et mobiles autour d'un axe (Δ) parallèle à la direction de propagation des faisceaux (10) et en ce que ce disque (2001) est associé à organe (2003 à 2008) de détection et de

commande de sa position angulaire par rapport à l'axe de rotation (Δ) recevant desdits moyens de contrôle et de commande (2), un signal de positionnement angulaire de manière à ce que le faisceau émis traverse une zone de densité optique prédéterminée.

5 8. Dispositif selon la revendication 1 caractérisé en ce que les moyens de commande et de contrôle (2) comprennent en outre un organe d'alimentation cyclique (202) en énergie électrique de la source laser pulsée (1) recevant dudit organe de comparaison (201) un signal d'autorisation d'émission d'impulsions d'énergie radiante.

10 9. Procédé de mise en oeuvre du dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 pour le transfert de motifs-composites permettant de reproduire avec un grossissement prédéterminé l'image d'un objet non diffusant à transparence non uniforme sur un substrat (8) recouvert d'un matériau (81) sensible aux radiations émises par ladite source laser pulsée (1), l'image devant être projetée de façon répétitive sur des zones élémentaires (800) de la surface du substrat (8) agencées de façon jointive suivant deux axes de coordonnées orthogonaux (X,Y), le substrat (8) pouvant être déplacé suivant des directions parallèles à ces deux axes ; procédé caractérisé en ce qu'il comprend une première phase pour l'insolation des zones élémentaires (800) successives disposées suivant le premier axe (Y) de coordonnée et comprenant les étapes suivantes :

- génération par lesdits moyens de contrôle et de commande (2) d'un signal d'autorisation (SA) de déplacement continu du substrat suivant cet axe de coordonnée d'une distance égale à la dimension d'une zone élémentaire suivant cette direction de déplacement
- immobilisation du substrat (8) après ledit déplacement
- génération par lesdits moyens de commande et de contrôle (2) d'un signal d'autorisation d'émettre des impulsions d'énergie radiante par la source laser pulsée (1)
- mesure cumulative de l'énergie radiante transmise au matériau sensible (80) recouvrant le substrat (8) et comparaison avec une valeur de consigne, représentant l'énergie nécessaire à l'insolation complète du matériau sensible d'une zone élémentaire (800)
- et arrêt du signal d'autorisation d'émettre lorsque la valeur de

consigne est atteinte ;

. une deuxième phase débutant après l'insolation de la dernière desdites zones élémentaires (800) disposées suivant le premier axe de coordonnée (Y) et comprenant les étapes suivantes :

5 - déplacement du substrat suivant le second axe de coordonnée (X) d'une distance égale à la dimension d'une zone élémentaire suivant cette direction de déplacement

- et inversion du sens de déplacement du substrat suivant le premier axe de coordonnée ;

10 . et la répétition des première et deuxième phases jusqu'à insolation de la totalité des zones élémentaires à insoler.

10. Procédé de mise en oeuvre du dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 pour le transfert de motifs-composites permettant de reproduire avec un grossissement pré-déterminé l'image d'un objet (6) non diffusant à transparence non uniforme sur un substrat (8) recouvert d'un matériau (80) sensible aux radiations émises par ladite source laser pulsée (1), l'image devant être projetée de façon répétitive sur des zones élémentaires (800) de la surface du substrat agencées de façon jointive suivant deux axes de coordonnées orthogonaux (X,Y), le substrat (8) pouvant être déplacé suivant des directions parallèles à ces deux axes à l'aide de moyens de déplacement (81) de ce substrat associés à des moyens de mesure de la position de ce substrat ; procédé caractérisé en ce qu'il comprend :

25 . une première phase pour l'insolation des zones élémentaires successives (800) disposées suivant le premier axe de coordonnée (Y) et comprenant les étapes suivantes :

- mise en mouvement continu du substrat (8) suivant cet axe de coordonnée (Y)

30 - mesure de la position du substrat le long de cet axe et génération d'impulsions de synchronisation (Sy) par lesdits moyens de mesure transmis aux moyens de commande et de contrôle (2) représentant à tout moment l'amplitude du déplacement ou la position absolue.

- génération par ces moyens d'un signal d'autorisation pour l'émission par la source laser pulsée d'une impulsion unique après chaque déplacement

du substrat d'une amplitude égale à la dimension d'une zone élémentaire suivant cette direction de déplacement (Y), l'instant de génération dudit signal d'autorisation étant déterminé par utilisation des signaux de synchronisation (Sy) ;

5 . une deuxième phase débutant après l'insolation de la dernière desdites zones élémentaires disposées suivant le premier axe de coordonnée (Y) et comprenant les étapes suivantes :

- déplacement du substrat suivant le second axe de coordonnée (X) d'une distance égale à la dimension d'une zone élémentaire (800) suivant cette direction de déplacement

10 - et inversion du sens de déplacement du substrat suivant le premier axe de coordonnée ;

. et la répétition des première et deuxième phases jusqu'à isolation de la totalité des zones élémentaires à insoler.

15 11. Procédé de mise en oeuvre du dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 pour le transfert de motifs-composites permettant de reproduire conformément à un arrangement lignes-colonnes avec un grandissement unitaire l'image d'un objet (6) non diffusant à transparence non uniforme sur ce substrat (8) recouvert d'un matériau (80) sensible aux radiations émises par ladite source laser pulsée (1), l'objet comportant le dessin à l'échelle 1 d'au moins une ligne de motifs à transférer disposés suivant un premier axe de coordonnée (X), le substrat (8) et l'objet (6) pouvant être déplacés suivant des directions parallèles à deux axes de coordonnées orthogonaux (X,Y) dont l'un est parallèle audit premier axe à l'aide de moyens de déplacement (81,60) associés à des moyens de mesure de position ; procédé caractérisé en ce qu'il comprend :

20 . une première phase pour l'insolation de zones élémentaires successives (800-1 à 800-n) du substrat disposées suivant le premier axe de coordonnée (Y) et comprenant les étapes suivantes :

25 - mise en mouvements continus et synchronisés du substrat (8) et de l'objet (6) suivant cet axe de coordonnée (Y)

30 - et génération répétée d'impulsions par ladite source laser pulsée (1) de manière à ce que chaque impulsion illuminant une zone élémentaire dudit objet insole une desdites zones élémentaires correspondantes du substrat ;

des zones élémentaires successives se chevauchant,

• une deuxième phase débutant après l'insolation de la dernière desdites zones élémentaires disposées suivant le premier axe de coordonnée (Y) et comprenant les étapes suivantes ;

5 - déplacement du substrat suivant le second axe de coordonné (X) d'une distance égale à la dimension d'une zone élémentaire (800) suivant cette direction de déplacement

- et inversion du sens de déplacement du substrat suivant le premier axe de coordonné ;

10 • et la répétition des première et deuxième phases jusqu'à insolation de la totalité des zones élémentaires à insoler.

12. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce que, l'objet comportant plusieurs dessins de lignes distinctes de motifs à transférer, la deuxième phase comprend une étape supplémentaire pour déplacer l'objet de manière à illuminer, au choix, l'une desdites lignes distinctes (figures 9 et 11).

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 12 caractérisé en ce que les moyens de commande et de contrôle (2) comportant un élément optique atténuateur (200) ajustable, du faisceau émis par la source laser pulsée (1), il comprend une phase préliminaire comprenant les étapes suivantes :

• - émission d'une impulsion unique par la source laser pulsée (1)

- mesure de l'énergie transportée par cette impulsion et comparaison avec une valeur de consigne

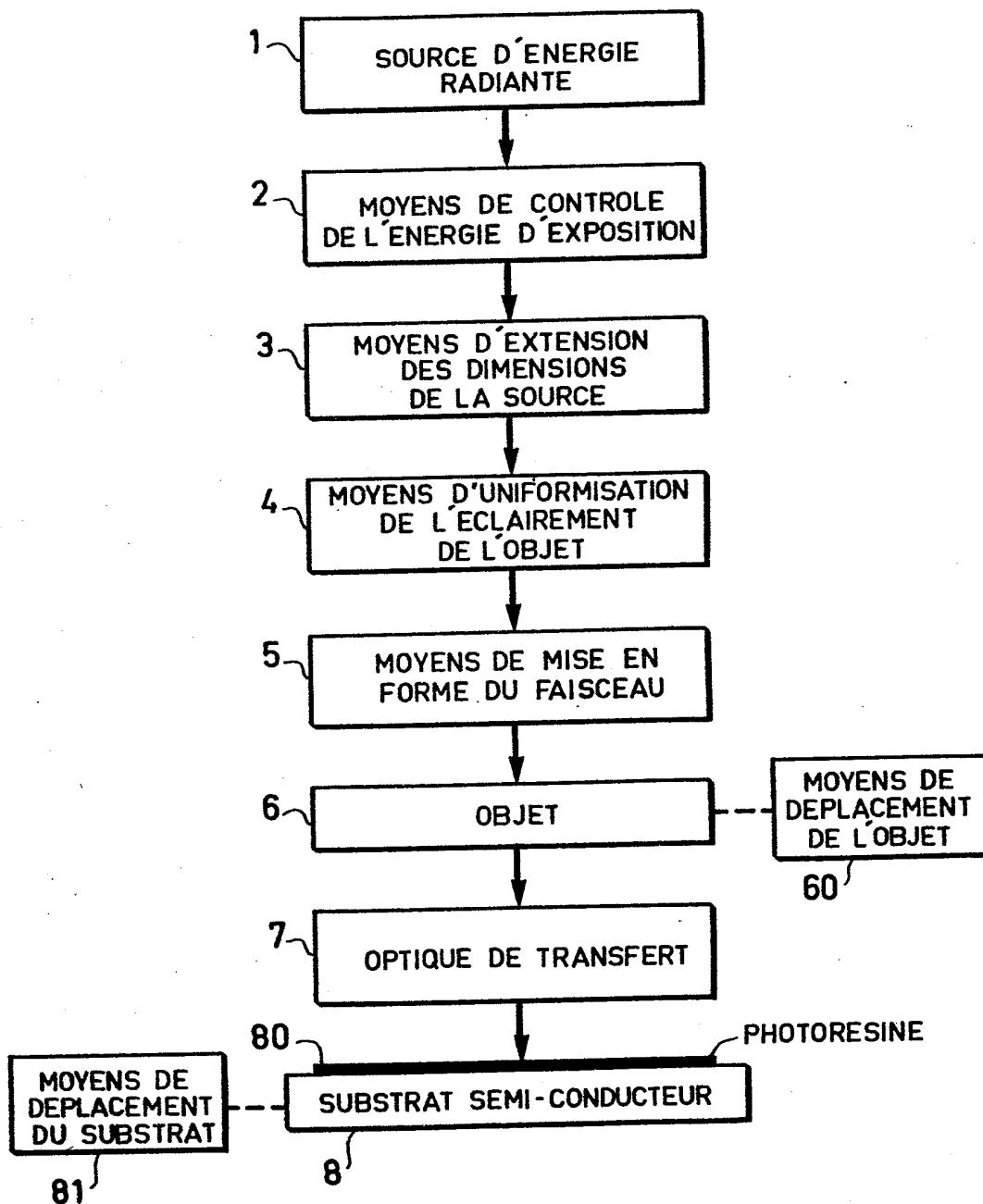
25 - et réglage de l'atténuation apportée audit faisceau (10) en accord avec la valeur de consigne

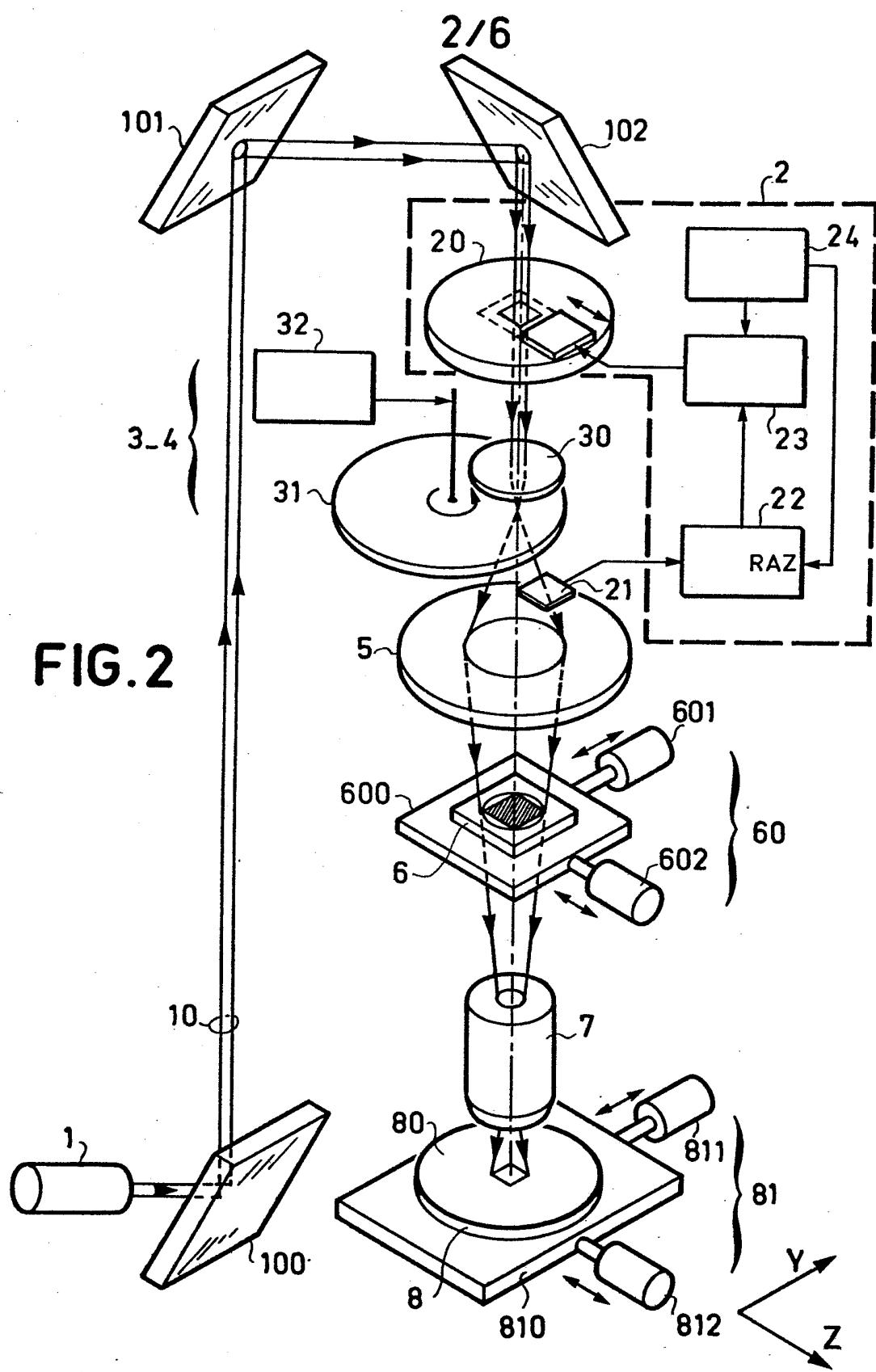
14. Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 12 caractérisé en ce que les moyens de commande et de contrôle (12) comportant un élément optique atténuateur ajustable (200) du faisceau émis (10) par la source laser pulsée (1), il comprend une étape supplémentaire pendant la

première phase consistant à mesurer l'énergie transportée par chaque impulsion émise par la source laser pulsée (1), à la comparer à une valeur de consigne et à régler ledit atténuateur (200) pour que l'impulsion émise suivante transporte une énergie en accord avec cette valeur de consigne.

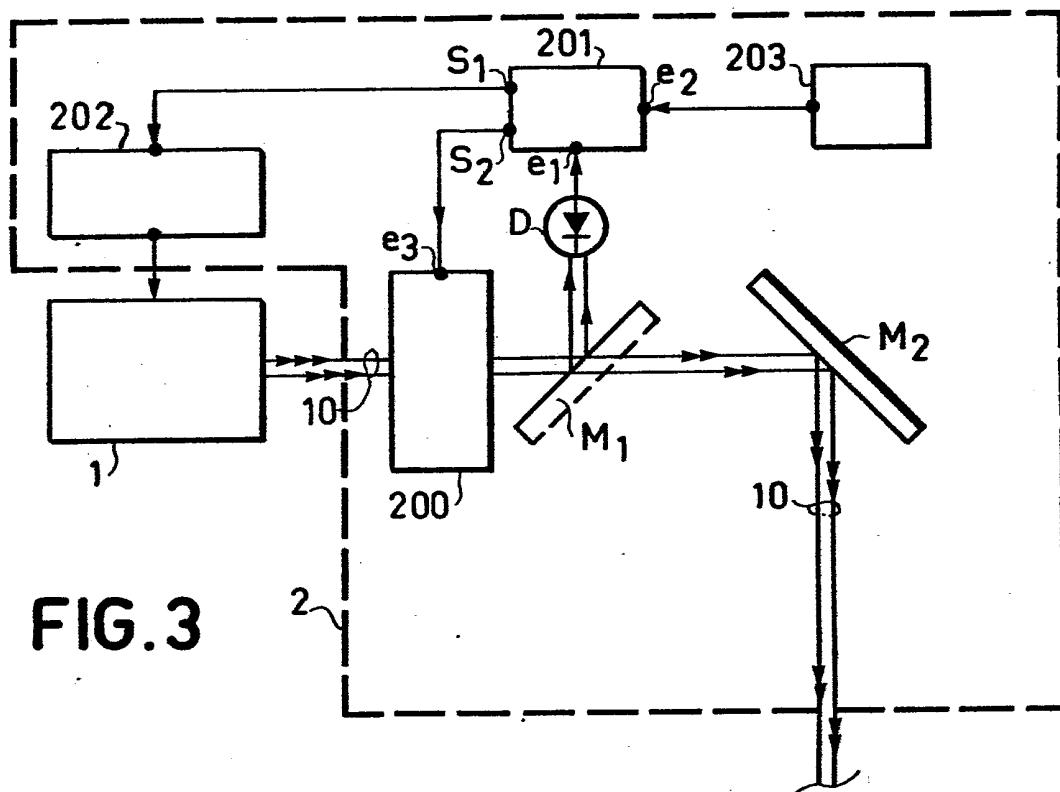
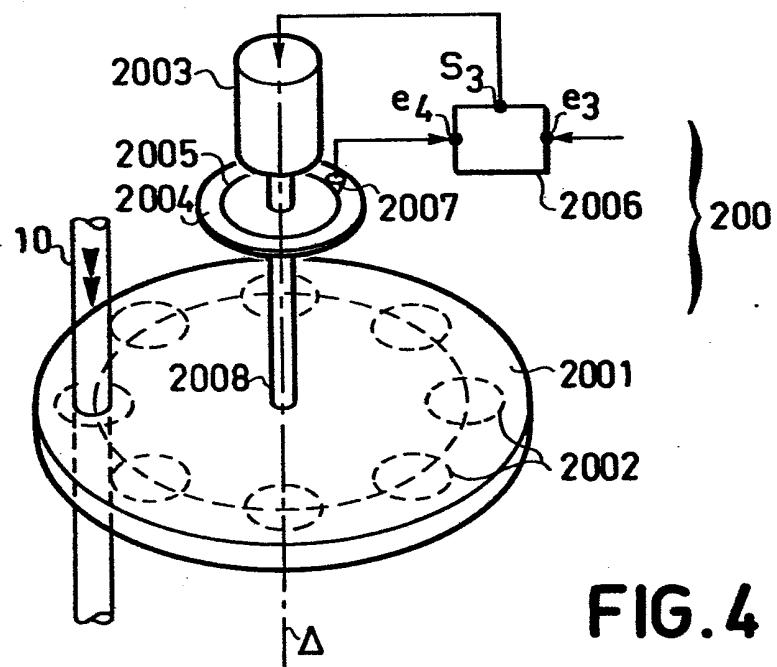
1/6

FIG.1





3/6

**FIG.3****FIG.4**

4/6

FIG.5

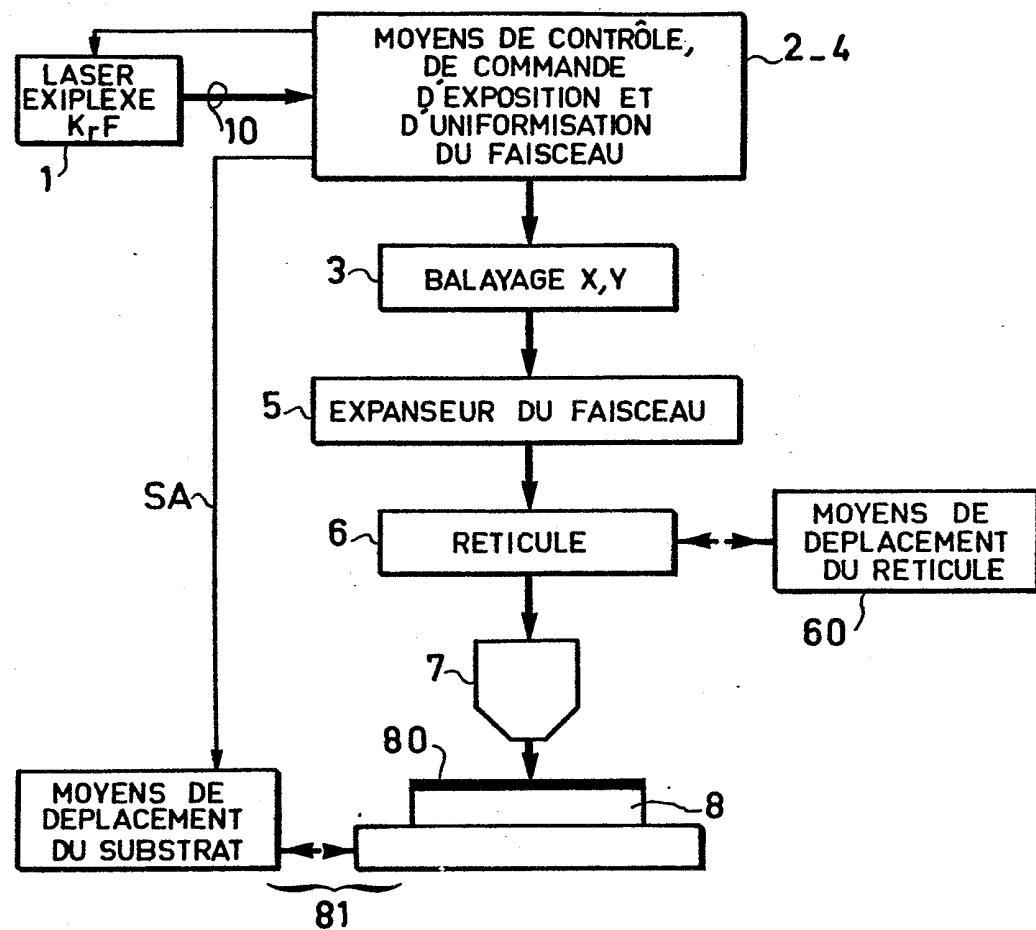
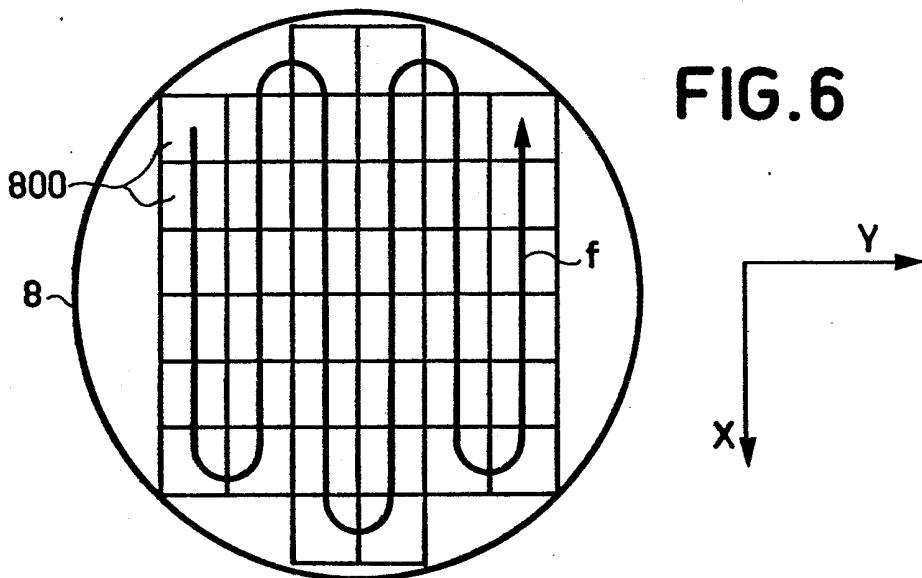
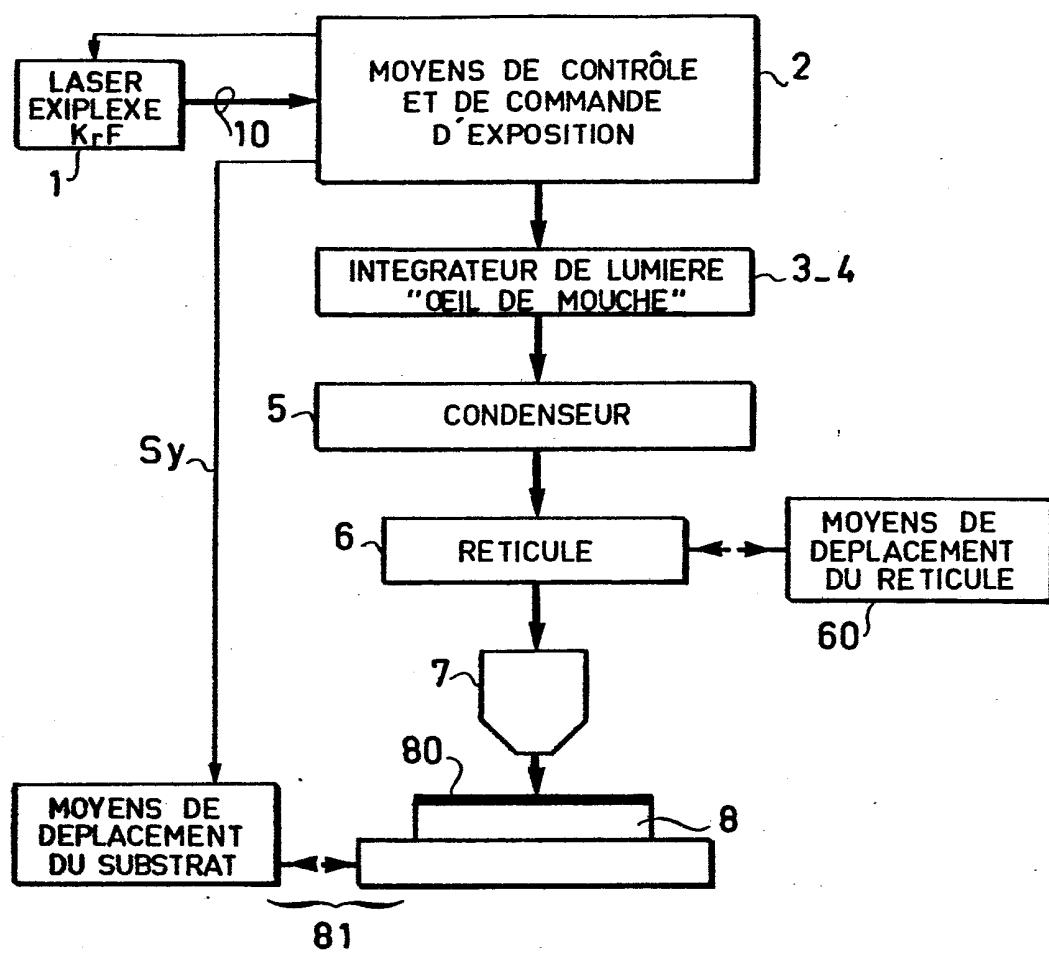


FIG.6



5/6

FIG. 7



6/6

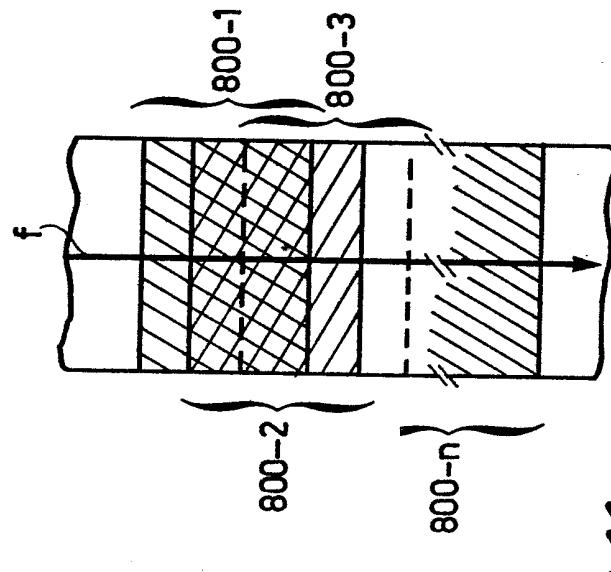


FIG.12

FIG.9 FIG.10 FIG.11

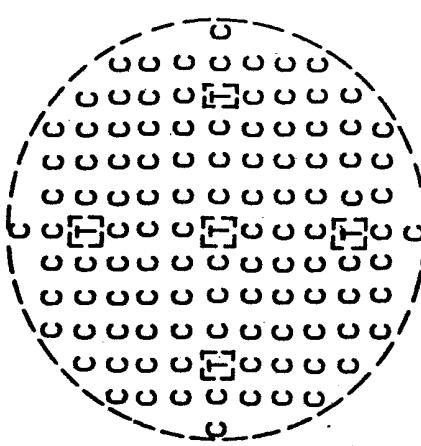


FIG.8