

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 83 00936

(54) Appareil et procédé d'holographie à multiplication de phase.

(51) Classification internationale (Int. Cl. ³). G 03 H 5/00; G 01 N 23/04, 27/90 // G 01 S 17/88.

(22) Date de dépôt..... 21 janvier 1983.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée : US, 25 janvier 1982, n° 342.431.

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande B.O.P.I. — « Listes » n° 30 du 29-7-1983.

(71) Déposant : UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. — US.

(72) Invention de : Heber Dale Collins, James Michael Prince et Thomas James Davis.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Brevatome,
25, rue de Ponthieu, 75008 Paris.

Appareil et procédé d'holographie à multiplication de
phase

La présente invention se rapporte d'une façon générale à un appareil et à un procédé de contrôle non destructif d'objets, et concerne plus particulièrement un appareil et un procédé utilisant un rayonnement à
5 basse fréquence pour la production de figures de franges ou d'hologrammes synthétiques qui peuvent être reconstitués par des techniques holographiques.

D'une façon générale, l'invention concerne le contrôle non destructif pour identifier des caractéris-
10 tiques de structure d'un objet par des techniques d'analyse holographiques utilisant une source d'un rayonnement connu, comme d'un rayonnement électromagnétique ou acoustique. Bien que des techniques à rayonnement électromagnétique ou par courants de Foucault non destructifs
15 soient utilisées dans les modes de réalisation de l'invention qui seront décrits, il est bien entendu que d'autres formes de rayonnement peuvent les remplacer, en restant dans le cadre de l'invention.

Les principes du contrôle électromagnétique non destructif sont bien connus. Plus particulièrement,
20 des courants de Foucault sont produits dans un objet à inspecter, par induction à partir d'une bobine voisine et au moyen d'un courant d'excitation alternatif. Les courants de Foucault produisent ainsi des champs magné-
25 tiques qui sont couplés avec la bobine à la même fréquence de celle du courant d'excitation mais qui peuvent avoir une phase différente. La phase et l'amplitude des tensions induites dépend des caractéristiques de structure de l'objet sous contrôle. Les relations de phase
30 peuvent être mesurées par des circuits appropriés de traitement de signaux.

La circulation des courants de Foucault dans un objet sous contrôle est réglée par le phénomène d'effet de peau. Les courants décroissent en exponentielle avec

la profondeur, en fonction de la forme de l'objet, de son épaisseur et de ses propriétés électromagnétiques. En plus de la diminution de l'amplitude de courant quand la profondeur au-dessous de la surface augmente, 5 l'angle de phase du courant est de plus en plus en retard sur le courant d'excitation.

Un inconvénient commun à de nombreuses procédures d'essai par courants de Foucault est l'impossibilité d'obtenir une définition dimensionnelle précise des 10 défauts ou anomalies. Quand des images sont obtenues, des défauts dans l'objet sous contrôle sont généralement représentés en une image informe ou une image dont la forme ne correspond pas à celle du défaut lui-même. Cette limitation résulte des grandes longueurs d'ondes électromagnétiques nécessaires pour obtenir une pénétration qui 15 convient dans l'objet. Si la longueur d'onde est réduite en augmentant la fréquence d'essai, la pénétration des courants de Foucault est également réduite en raison du phénomène d'effet de peau. De plus, des limitations géométriques des dimensions dans l'appareil d'analyse disponible 20 empêche la formation d'image de défauts par des procédés de formation d'image holographique en utilisant de grandes longueurs d'ondes, car souvent une seule frange circulaire d'une seule longueur d'onde est disponible pour un point donné des caractéristiques de structure, dans un but de formation d'images. Un seul cercle 25 de frange d'une source ponctuelle est impossible à reconstituer optiquement car il n'existe aucune configuration de diffraction ou lentille pour un but de reconstitution holographique. Ainsi, une image d'un défaut ponctuel est annulée dans ces conditions. Cette ouverture 30 restreinte apparaît dans de nombreuses applications lorsque le défaut est près de la surface ou limité par la géométrie.

35 Dans l'article intitulé "Holography by Scanning" de B.P. Hildebrand et Kenneth Haines, J. Opt. Soc. Am., Volume 59, pages 1 à 19 (1969), se trouve une discussion

générale des techniques actuellement connues de formation d'images, en ce qui concerne l'holographie par analyse acoustique. Les équations de position d'image et les grossissements décrits dans cet article sont dérivés d'un facteur de multiplication de phase qui semble réduire synthétiquement la longueur d'onde de construction pour simuler ces techniques holographiques déjà connues.

Le Brevet des Etats Unis d'Amérique N° 4 084 136 décrit un dispositif de contrôle par courants de Foucault qui produit une visualisation des variations des caractéristiques d'un échantillon. Un expenseur de signaux échantillonne un signal produit et en provoque une expansion sur une base choisie d'ondes rectangulaires ou de fonctions de Walsh pour produire plusieurs composantes représentatives du signal échantillonné. Ces dernières sont combinées par un circuit pour produire une visualisation d'un défaut. Les signaux initiaux forment des figures de Lissajou qui sont ensuite projetées et tournées pour obtenir une image linéaire d'un défaut sous-jacent. Bien qu'une visualisation soit obtenue, il ne résulte pas une représentation précise des dimensions et de la forme du défaut détecté.

Le Brevet des Etats Unis d'Amérique N° 3 721 896 décrit une technique de contrôle par courants de Foucault selon laquelle le signal de sortie provenant de l'objet est traité pour doubler sa fréquence et sa phase afin d'obtenir un signal de phase de référence. La phase de référence doublée est comparée avec une phase de référence développée par un déphaseur pour augmenter la sensibilité d'un comparateur synchrone. Le système détermine la différence entre les deux phases et il en résulte un signal final de sortie représentant la différence détectée. Ce Brevet identifie la possibilité d'augmenter la sensibilité dans la technique d'essai par courants de Foucault mais il ne renferme aucune suggestion pour utiliser un tel signal afin de produire des

images de franges contenant des informations holographiques pour un autre traitement.

Le Brevet des Etats Unis d'Amérique N° 4 005 358 décrit un magnétomètre dans lequel les distorsions du moment magnétique mesuré, résultant des courants de Foucault, sont éliminées par l'annulation des signaux hors de phase par un circuit de réaction en courant alternatif. Il ne contient aucune description d'une multiplication de phase potentielle ou de formation d'images holographiques.

Un autre Brevet antérieur orienté sur l'accroissement d'informations pouvant être obtenues par des dispositifs d'essai par courants de Foucault est le Brevet des Etats Unis d'Amérique N° 3 229 918. Le dispositif décrit utilise une bobine d'essai excitée par un signal multi-fréquence. Les signaux de sortie résultant de l'appareil sont des signaux analogiques représentant des caractéristiques d'un objet. Aucune technique de formation d'image n'est décrite. Le Brevet des Etats Unis d'Amérique N° 4 207 520 décrit un type analogique-numérique de système équilibré, reposant sur des techniques d'essai par courants de Foucault. Ces signaux de sortie sont traités dans un calculateur pour assurer une détection sensible à la phase de défauts comme des fissures, mais aucune formation d'images n'est décrite.

Le Brevet des Etats Unis d'Amérique N° 3 678 452 se rapporte à l'holographie acoustique, et met en oeuvre un multiplicateur de fréquence pour développer les techniques d'échantillonnage décrites. Il subdivise la période d'ondes cohérentes en un certain nombre d'intégrales de phase représentant chacune un degré correspondant dans un paramètre d'hologramme final comme une densité d'échelle des gris. Les techniques de multiplication de phase pour la production synthétique d'une image reproductible par des techniques holographiques ne sont pas mentionnées.

Le Brevet des Etats Unis d'Amérique N° 4 222 273 décrit un appareil holographique pour détecter et former

l'image de défauts dans des objets. Un hologramme est visualisé en une image de franges et la position et la forme de l'objet peuvent être déterminées à partir de cette image par des techniques de reproduction. Les
5 techniques de division de fréquence sont utilisées mais une multiplication synthétique des signaux de phase détectés n'est pas décrite.

Un objet de l'invention est donc de proposer un appareil et un procédé d'expansion d'ouverture synthétique dans des applications de formation d'images
10 holographiques pour construire des images de franges permettant une reproduction holographique lorsque des restrictions d'ouverture dans des applications de contrôle non destructif rendraient impossibles ces techniques de formation d'images.
15

Un autre objet de l'invention est de permettre la production de ces images de franges sans augmenter la fréquence du rayonnement dirigé vers l'objet en essayant ce qui pourrait limiter la pénétration possible.

20 Un autre objet de l'invention est de produire synthétiquement des images de franges à partir des signaux d'essai mesurés dans une forme qui peut être convertie par des techniques holographiques en une visualisation précise de caractéristiques de structure dans un objet en
25 essai.

Un autre objet de l'invention est de permettre une technique d'essai non destructif qui peut être mise en oeuvre avec toute forme de rayonnement compatible avec des procédés de traitement de signaux cohérents. Cette
30 technique permet d'inspecter un objet à une fréquence plus basse avec une excellente pénétration en profondeur et en produisant une image qui simule celle pouvant être obtenue à des fréquences plus élevées, avec une excellente résolution latérale.

35 Pour obtenir ce résultat ainsi que d'autres et dans le cadre de l'invention tel que réalisée et décrite largement ci-après, l'appareil peut comporter un

dispositif d'analyse qui produit un signal de sortie à une fréquence constante dont la phase varie en fonction des caractéristiques de structure de l'objet sous contrôle. Un multiplicateur de phase est utilisé pour multiplier la fréquence et la phase du signal de sortie par un nombre prédéterminé. Un circuit de détecteur détecte les déphasages entre le signal de sortie multiplié et un signal d'excitation de référence dont la fréquence est également multipliée par le nombre prédéterminé. Les signaux qui en résultent sont appliqués à un dispositif de visualisation pour enregistrer une courbe d'analyse de l'objet comme des images de franges pouvant être reconstituées par des techniques holographiques.

Selon un autre aspect, l'invention concerne également un procédé qui peut consister à pénétrer un objet sous contrôle par un rayonnement à partir d'un signal d'excitation de fréquence constante, à balayer l'objet pour produire un signal de sortie dont la phase varie en fonction des caractéristiques de structure de l'objet, à multiplier la phase et la fréquence du signal de sortie par un nombre prédéterminé, à détecter le déphasage entre les phases multipliées et les phases du signal d'excitation après que sa fréquence a également été multipliée par le même nombre prédéterminé et à enregistrer une courbe d'analyse de l'objet en fonction des déphasages détectés pour produire des images de franges qui peuvent être reconstituées par des techniques holographiques.

L'appareil et le procédé permettent de produire une image frontale définie avec précision des caractéristiques de structure qui ne pourraient pas autrement être reproduites car elles apparaissent près de la surface de l'objet ou sont limitées par des dimensions d'ouverture limitatives géométriquement, pour des buts d'analyse. La profondeur de la caractéristique de structure au-dessous de la surface de l'objet, peut aussi être déterminée par les paramètres de reconstitution qui produisent le lieu le plus précis. La résolution latérale est établie

par une réduction simulée de la longueur d'onde de rayonnement et peut être facilement d'un ordre de grandeur au-dessous de la longueur d'onde électromagnétique dans la matière ou deux fois la profondeur standard de pénétration. Etant donné que la technique de multiplication de phase est mise en oeuvre sur les données détectées, la profondeur de pénétration possible en raison des signaux de plus grande longueur d'onde appliqués à l'objet en essai reste inchangée. La technique de multiplication de phase peut aussi être appliquée à l'holographie acoustique à basse fréquence ce dont il résulte un essai qui combine une pénétration excellente de matières difficiles avec des images de haute résolution.

Il est bien entendu que les techniques déjà connues de contrôle électromagnétique et d'holographie acoustique, et celles selon l'invention dont la description doit suivre, ne dépendent pas du rayonnement ondulatoire particulier utilisé. L'invention peut s'appliquer à tout le spectre de rayonnement électromagnétique, y compris la lumière visible, les hyperfréquences, les rayons infrarouges, ultraviolets, les rayons X, les ondes radioélectriques, etc., et à toutes les plages de rayonnement de compression ou acoustique. Elle s'applique à des techniques de formation d'images cohérentes et non cohérentes utilisant des processus de calcul de phase holographique en temps réel. Les hologrammes ou les images de franges développées synthétiquement qui résultent de l'invention contiennent des informations holographiques pouvant être traitées en utilisant de la lumière cohérente, pour obtenir une image visuelle des caractéristiques de structure de l'objet sous contrôle.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront au cours de la description qui va suivre de plusieurs exemples de réalisation et en se référant aux dessins annexés sur lesquels :

La Figure 1 est une courbe des angles de phase de courants de Foucault en fonction de la profondeur,

la Figure 2 est un schéma simplifié illustrant le problème des limitations d'ouverture et du manque
5 qui en résulte de produire des images de franges susceptibles d'être développées en une image,

la Figure 3 est un schéma similaire qui illustre la technique selon le présent procédé,

la Figure 4 est un schéma simplifié d'un système
10 à courants de Foucault selon l'invention,

la Figure 5 illustre schématiquement la construction et la reconstruction géométrique utilisées dans l'analyse de la technique,

la Figure 6 est un schéma d'un exemple de circuit
15 pour la mise en oeuvre de l'invention,

la Figure 7 est un schéma d'un circuit modifié

la Figure 8 représente schématiquement un dispositif de reconstitution optique destiné à être utilisé conjointement avec l'invention,

20 la Figure 9 est une photographie des images de franges obtenues comme résultat de l'invention,

la Figure 10 est une reconstitution d'une image ponctuelle à partir des images de franges de la Fig. 9,

les Figures 11 et 13 sont des photographies
25 d'hologrammes de référence,

les Figures 12 et 14 sont des images correspondant aux images de franges respectivement des figures 11 et 13,

la Figure 15 représente schématiquement la construction géométrique utilisée pour vérifier la présente technique,
30

la Figure 16 est une photographie des images de franges obtenues comme résultat des expériences illustrées par la Fig. 15,

la Figure 17 est une image reconstituée développée à partir des images de franges de la Figure 16,
35

les Figures 18 et 20 sont des photographies d'hologrammes acoustiques de référence,

les Figures 19 et 21 sont des images construites à partir des images de franges respectivement des figures 18 et 20,

5 la Figure 22 est une vue schématique en plan illustrant une procédure d'essai utilisant la présente technique,

la Figure 23 est une vue en plan illustrant la procédure d'essai de la figure 22,

10 la Figure 24 représente des images de franges résultant de la procédure d'essai des Figures 22 et 23,

la Figure 25 est une image reconstituée développée à partir des images de franges de la Fig. 24

15 la Figure 26 est une vue schématique en plan illustrant une procédure d'essai utilisant la présente technique,

la Figure 27 est une vue en plan illustrant la procédure d'essai de la Fig. 26,

la Figure 28 illustre des images de franges résultant de la procédure d'essai des figures 26 et 27,

20 la Figure 29 est une image reconstituée développée à partir des images de franges de la Fig. 28 et

la Figure 30 est une comparaison schématique des techniques courantes par courants de Foucault et celles selon l'invention.

25 Lorsqu'ils sont utilisés dans des buts de contrôle électromagnétique non destructif, les courants de Foucault sont amenés à circuler dans un objet à contrôler par induction à partir d'une bobine voisine qui est excitée par un courant alternatif. Les courants de Foucault développement des champs magnétiques qui sont
30 couplés avec la bobine réceptrice et ils induisent des tensions dans cette bobine, à la même fréquence que celle du courant d'excitation appliqué à la bobine émettrice, mais pouvant avoir un angle de phase différent.
35 L'angle de phase et l'amplitude des tensions induites dépendent des caractéristiques de l'objet en cours de contrôle. La tension induite peut être mesurée par un

équipement électromagnétique approprié qui détecte soit une variation de tension (procédé des deux bobines) soit une impédance équivalente de la bobine (procédé à une seule bobine).

5 Un inconvénient commun à de nombreux essais par courants de Foucault est l'impossibilité d'obtenir une définition dimensionnelle précise des défauts ou anomalies. Les dimensions restreintes d'ouvertures disponibles lorsque le défaut ou l'anomalie se trouve
10 près de la surface d'un objet ou est de toute autre manière comprimé par la géométrie, rendent impossible la formation d'une image car les images de franges enregistrées ne contiennent pas des franges multiples pour produire un réseau ou une lentille à diffraction
15 utilisable.

 L'invention décrite ci-après apporte une solution à ce problème en ce que la longueur d'onde effective peut être synthétiquement réduite d'un ou deux ordres de grandeur par une manipulation des signaux de
20 sortie détectés. Etant donné que les signaux de sortie sont manipulés, la technique préserve le degré possible de pénétration qu'autorise l'utilisation de plus longues fréquences d'essai. Il en résulte la possibilité de produire des images de haute résolution des défauts ou
25 anomalies en utilisant des techniques de reconstitution d'images lorsque cette formation d'image est autrement impossible. Il apparaît que la multiplication de fréquence et de phase des signaux de défaut reçus réduit synthétiquement la longueur d'onde de construction ou
30 d'essai par le facteur de multiplication. La réduction apparente de longueur d'onde produit un hologramme synthétique en translation de fréquence. Les images de franges qui en résultent construites avec la fréquence synthétique élevée sont similaires à celles qui se trouvent dans un hologramme de la même fréquence. Ce concept
35 permet l'inspection d'objets à de plus basses fréquences

d'essai avec une excellente profondeur de pénétration et il en résulte la production d'images reconstituées à la plus haute fréquence synthétique, avec un grossissement et une résolution accrues. Cela permet d'appliquer la technique pour la quantification, la classification et la formation d'images de haute résolution des défauts et anomalies en utilisant les courants de Foucault ou des données acoustiques.

La circulation des courants de Foucault dans un objet sous contrôle est régie par le phénomène d'effet de peau. Les courants décroissent en exponentielle avec la profondeur et l'angle de phase du courant prend de plus en plus de regard sur le signal d'excitation. La Figure 1 montre la relation normalement linéaire et de phase multipliée entre la profondeur et l'angle de phase dans le cas d'une onde plane idéalisée. Il apparaît que l'angle de phase augmente avec la profondeur dans l'objet. Ce paramètre est utilisé pour construire la réalisation des images de franges selon l'invention.

Selon le présent procédé, l'objet à contrôler est d'abord pénétré par un rayonnement ondulatoire produit par un signal d'excitation de fréquence constante. Pour l'utilisation du procédé électromagnétique, la source de fréquence est un oscillateur dont le signal d'excitation est appliqué à une bobine. L'objet est ensuite balayé pour produire un signal de sortie à la fréquence constante. L'angle de phase du signal de sortie peut varier en fonction des caractéristiques de structure rencontrées dans l'objet.

Dans les applications des courants de Foucault l'objet est balayé par une bobine de balayage. Les valeurs de phase et de fréquence du signal de sortie provenant du dispositif ou de la bobine de balayage sont multipliées par un nombre prédéterminé pour réduire synthétiquement la longueur d'onde de signal. Les différences de phase dans le plan de balayage sont ensuite détectées entre les valeurs de phase multipliées du signal de sortie à fréquence multipliée et les valeurs de phase de la

fréquence du signal d'excitation multipliée de façon similaire. La détection de ces différences de valeur de phase en des points autour desquels l'objet est analysé est utilisé pour produire une courbe d'analyse de
5 l'objet en fonction des différences de phase détectées. Cela produit des images de franges pouvant être reconstituées par des techniques holographiques comme une image visuelle des caractéristiques de structure de l'objet.

10 Dans un mode de réalisation, la phase d'enregistrement est exécutée sur un oscilloscope à enregistrement. Les différences de phase détectées sont utilisées comme un signal d'écriture pour commander l'affichage sur l'écran d'oscilloscope, conjointement avec un balaya-
15 ge bidimensionnel couplé avec le fonctionnement normal de la bobine de balayage.

La Figure 2 illustre la séquence des événements qui se produisent pour la construction d'images de franges avec les restrictions antérieures quant à la pro-
20 fondeur et les dimensions d'ouverture. La Figure 3 illustre de façon similaire les phases utilisées dans le présent procédé.

La Figure 2 montre une bobine à courant de Foucault balayant un plan de balayage 10, passant
25 par un défaut ponctuel 11. La longueur d'onde appliquée est indiquée par la ligne 12. L'image de franges 13 résultante consiste en une frange circulaire bidimensionnelle. La limitation à une seule frange est due aux dimensions d'ouverture balayée insuffisantes pour produire un holo-
30 gramme à franges multiples qui peut être reconstitué. Cette limitation d'ouverture apparaît dans de nombreuses applications lorsque le défaut est près de la surface ou enfermé par la géométrie de l'équipement. Sous l'effet de la lumière cohérente de laser 14, en utilisant les
35 techniques holographiques courantes, aucune image ne peut être produite par cette image d'une seule frange.

La Figure 3 illustre de façon similaire le ré-

sultat obtenu quand les angles de phase et la fréquence du signal de sortie sont multipliés par un nombre prédéterminé. Dans l'exemple choisi, le facteur de multiplication est égal à neuf. La longueur d'onde entre les cercles concentriques illustrés, et émanent d'un défaut ponctuel 11a est maintenant le neuvième de celle de la Fig. 2. Des franges multiples 13a sont produites dans le même plan de balayage 10, en observant le même défaut ponctuel 11a. La longueur d'onde réduite synthétiquement est représentée par la ligne 12a. Maintenant, lorsque l'image qui contient les franges multiples 13a est irradiée par un laser 14a, une image conjuguée réelle de l'objet ponctuel est obtenue en 15.

Selon l'invention, toutes les valeurs de phase obtenues dans la solution générale classique illustrée schématiquement par la figure 2 sont multipliées synthétiquement par un facteur d'expansion arbitraire. La multiplication des valeurs de phase produit un nouvel hologramme d'ouverture agrandie avec la configuration à franges multiples ou de lentilles de zone qui est familière en holographie acoustique. Ainsi, par une réduction synthétique de longueur d'onde, il est possible de construire une image bidimensionnelle unique des défauts détectés par des courants de Foucault ou autres techniques de balayage par un rayonnement ondulatoire.

Le schéma simplifié de la Fig. 4 illustre un exemple d'un appareil pour la mise en oeuvre du procédé ci-dessus de contrôle par des courants de Foucault. La bobine de balayage 16 est excitée à une fréquence d'essai de (ω_1) . Tout signal non nul ou de défaut provenant du pont à courants de Foucault est appliqué à un multiplicateur de phase 17. Le signal de défaut est représenté par le symbole S_f .

La fréquence et la phase du signal de défaut S_f sont multipliées par un nombre prédéterminé (n) dans

le multiplicateur de phase 17. La phase du signal résultant est ensuite détectée par rapport à un signal de référence provenant de l'oscillateur d'excitation 18 à la même fréquence ($n\omega_1$). Le signal de référence est désigné par S_R sur la Fig. 4. L'information de phase détectée provenant du détecteur de phase comprenant le multiplicateur de signaux 20 et un filtre passe-bas 21 est un signal de phase de défaut désigné par S_H sur la Figure 4. Le signal de phase de défaut est utilisé comme une commande d'écriture sur l'oscilloscope à rémanence 22.

Le mouvement de la bobine de balayage 16 est transmis à l'oscilloscope 22 par les entrées habituelles 26 et 27 de signaux d'accès de balayage mécanique. Une configuration similaire à un hologramme et consistant en un jeu unique d'images de franges 23 est formée sur l'écran quand un défaut 24 est balayé dans l'objet 25.

D'une façon générale, l'appareil de contrôle comporte de préférence un dispositif de balayage, illustré par la bobine de balayage 16 pour produire un signal de sortie (signal de défaut S_f) de fréquence constante dont la phase varie en fonction des caractéristiques de structure de l'objet 25, particulièrement la détection d'un défaut 24. Un multiplicateur de phase, représenté globalement en 17, est utilisé pour multiplier la fréquence et la phase du signal de défaut S_f par un nombre prédéterminé (n). Un dispositif est prévu pour détecter les différences de phase entre le signal de sortie multiplié ou signal de défaut (S_f) et un signal d'excitation de référence ou signal de référence S_R qui est égale à la fréquence de balayage multipliée par le facteur appliqué au signal de défaut. Les fréquences multipliées sont traitées par un dispositif qui réagit à la détection de ces différences de phase en enregistrant une courbe de balayage de l'objet 25 comme des images de franges 23. Ce dispositif est représenté par l'oscilloscope 22 dont les entrées de commande d'écriture sont connectées au

détecteur de phase constitué par un multiplicateur de signaux 20 et un filtre passe-bas 21. Les images de franges 23 résultantes peuvent être reconstituées par des techniques holographiques, comme par le système optique représenté à la droite de la Figure 3. Cette reconstitution conduit à produire une image visuelle des caractéristiques de structure ou de défaut 24 détectée dans l'objet 25.

La discussion mathématique ci-après présente une analyse d'holographie par multiplication de phase utilisant un balayage simultané de source focalisée (ou ponctuelle) et récepteur. L'analyse utilisée est similaire à celle utilisée dans la publication de Hildebrand et Haines mentionnée dans le préambule. Les équations de position d'image sont dérivées des différentes techniques de balayage qui sont utilisées en holographie par multiplication de phase.

La géométrie de construction et de reconstruction d'hologramme synthétique utilisée dans l'analyse est illustrée sur la figure 5. La phase au point récepteur (x, y, z) pendant la construction d'hologramme synthétique est:

$$\phi(x, y, z) = \phi_0(x, y, z) - \phi_r(x, y, z) \quad (1)$$

et

$$\phi(x, y, z) = \frac{2\pi n}{\lambda_S} (r'_0 + r'_1 - r'_2) \quad (2)$$

La phase au point récepteur (x, y, z) après irradiation de l'hologramme synthétique par la source de reconstitution est:

$$\phi_1(x, y, z) = \pm \frac{2\pi n}{\lambda_S} (r'_0 + r'_1 - r'_2) - \frac{2\pi}{\lambda_L} r'_a \quad (3)$$

où

n = facteur de multiplication de phase

λ_S = longueur d'onde de construction

λ_L = longueur d'onde reconstruction

$+$ désigne l'image conjuguée

$-$ désigne l'image vraie.

Si la phase de l'équation (2) est au foyer au point d'image, (x_b, y_b, z_b) , il vient:

$$\phi_1(x, y, z) = \frac{2\pi}{\lambda_L} r'_b \quad (4)$$

qui est appelée la sphère d'images de Gauss. La procédure habituelle consiste à développer les termes de distance (r'_a , r'_b , r'_1 , r'_2 et r'_0) dans une série binomiale et d'égaliser les coefficients de x , y et z .
 5 Les termes des distances sont développés autour de l'origine du système (x, y, z) et la distance a_0 est développée autour du système α, β, γ . La zone dans laquelle le récepteur balaye est supposé petite par rapport aux distances et elle est centrée à l'origine
 10 (x, y, z) . Une restriction similaire s'applique au mouvement de la source. Les termes de premier ordre donnent les équations de position d'image de gauss:

$$\frac{1}{r'_b} = \pm \frac{n}{m^2} \frac{\lambda_L}{\lambda_S} \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_a} \quad (5)$$

$$15 \quad \frac{x_b}{r'_b} = \pm \frac{n}{m} \frac{\lambda_L}{\lambda_S} \left\{ \frac{x_1}{r_1} + \frac{(x_1 - x_0)}{r_0} \right\} - \frac{x_a}{r_a} \quad (6)$$

$$\frac{y_b}{r'_b} = \pm \frac{n}{m} \frac{\lambda_L}{\lambda_S} \left\{ \frac{y_1}{r_1} + \frac{(y_1 - y_0)}{r_0} \right\} - \frac{y_a}{r_a} \quad (7)$$

où $r_2 = \infty$ (faisceau de référence d'onde plane) et le grossissement d'hologramme synthétique $m = n_x = m_y$.
 Si l'on suppose une configuration de balayage simultané source-récepteur, la distance approximative d'image -
 20 phasogramme est donné par l'équation (8).

$$r_b = \frac{\lambda_S}{n} \frac{m^2}{\lambda_L} \frac{r_1}{2} \quad (8)$$

L'hologramme synthétique semble avoir été construit à la plus petite longueur d'onde synthétique
 25 (c'est-à-dire λ_S/n). Cela réduit la distance effective dans le rapport $1/n$ comparativement à un hologramme construit avec λ_S . L'hologramme synthétique a la même distance d'image qu'un hologramme construit avec la longueur d'onde équivalente λ_S/n . L'hologramme synthétique construit à la plus basse fréquence simule un hologramme
 30 de fréquence plus élevée.

Le grossissement d'image latéral pour la même configuration de balayage est facilement dérivé des équations de position d'image et il est donné par l'équation (9). Le grossissement d'image est effective-
 5 ment:

$$M_L = \frac{2\lambda_L}{\lambda_S/n} \left(\frac{1}{m}\right) \frac{r_b}{r_1} \quad (9)$$

Cette analyse justifie mathématiquement la construction d'un hologramme à translation de fréquence synthétique en utilisant la présente technique. Elle
 10 vérifie les procédures expérimentales décrites ci-après.

Les figures 6 et 7 illustrent deux procédés généraux pour réaliser l'opération de multiplication de phase afin de produire des hologrammes. Dans le procédé illustré par la figure 6, une fréquence d'essai ω_1 est
 15 obtenue d'un oscillateur d'excitation 30 et un compteur 31 diviseur par n. La fréquence d'essai est appliquée à des circuits électroniques conventionnels à courants de Foucault, représentés par un pont à courants de Foucault
 32 et une bobine de recherche 33. Les signaux de déséquilibre du pont 32, représentés graphiquement en 34, sont
 20 amplifiés dans un amplificateur approprié 35. Il sont mis en forme rectangulaire par un détecteur 36 de passage par zéro et sont utilisés comme une fréquence de référence pour une boucle 37 à verrouillage de phase. La multiplication de phase est effectuée par la boucle à verrouillage
 25 de phase 37. La fréquence et la phase de l'oscillateur 38 commandé par tension faisant partie de la boucle sont n fois la fréquence et la phase du signal appliqué à la bobine de recherche 33. La sortie de l'oscillateur commandé par tension est appliquée à un détecteur de phase
 30 40 dont la fréquence de référence fournie par l'oscillateur 30 est $n\omega_1$. Le présent mode de réalisation du détecteur de phase 40 consiste en une porte exclusive ou logique dont le signal de sortie passe par un filtre passe-bas. La sortie du détecteur de phase est utilisée comme
 35 une commande d'écriture d'accès Z pour le dispositif de

visualisation ou oscilloscope (non représenté).

Des dispositions sont prises dans la boucle 37 à verrouillage de phase pour obtenir l'équivalent d'un signal de référence hors axe en 41. Cela facilite
5 le processus de reconstitution d'image optique en séparant spatialement la lumière d'ordre zéro de l'image diffractée. Un retard de phase est introduit dans l'oscillateur 38 commandé par tension, qui est une fonction linéaire de la tension appliquée à l'entrée
10 de commande hors axe.

La Figure 7 représente un second procédé plus avantageux de production d'hologramme. Ce procédé utilise une translation de fréquence de la bobine 33a en une fréquence intermédiaire qui est $1/n$ fois la fréquence d'essai (ω_1). La fréquence est divisée par le
15 nombre prédéterminé n au moyen d'un translateur de fréquence représenté en 42. Les autres éléments représentés schématiquement sur la Fig. 7 sont numérotés pour correspondre aux éléments illustrés sur la Figure 6.
20 La translation de fréquence du signal de la bobine est extrêmement avantageuse car le détecteur de phase final 40a et l'oscillateur 38a commandé par tension peuvent fonctionner à la fréquence d'essai (ω_2) plutôt qu'à un multiple de la fréquence d'essai ($n\omega_1$). Si par exemple
25 une fréquence d'essai de 1 MHz et une multiplication (n) de 40 sont utilisées, l'oscillateur 38 commandé par tension de la Figure 6 peut fonctionner à 40 MHz. La disposition illustrée par la figure 7 élimine la nécessité d'une conception rigoureuse de ces circuits à
30 haute fréquence.

Un procédé d'application de la translation de fréquence nécessaire conjointement avec la technique de la Figure 7 est une modulation d'amplitude de porteuse supprimée à bande latérale unique. L'amplitude et la
35 phase du signal à haute fréquence sont préservées dans la bande latérale inférieure ou la fréquence de différence. Un autre procédé implique la détection des coef-

ficients d'amplitude en phase et en quadrature du signal du pont (coefficient d'amplitude de Fourier) et l'utilisation de ces niveaux pour commander les amplitudes respectivement d'ondes sinusoïdales et cosinusoïdales à la
5 fréquence intermédiaire inférieure. Lorsque ces deux ondes sont additionnées ensemble, le résultat est une sinusoïde de fréquence intermédiaire ayant les caractéristiques de phase et d'amplitude du signal du pont.

A titre d'exemple de paramètres des circuits
10 utilisés, dans une application, une fréquence d'essai de 400 KHz et une multiplication de phase égale à 40 ont été employées. La fréquence intermédiaire était donc 10 KHz, permettant à l'oscillateur 38a commandé par tension et au détecteur de phase 40a (Fig. 7) de fonctionner à la
15 fréquence d'essai initiale.

La reconstitution de l'hologramme synthétique électromagnétique ou acoustique pour produire une image optique d'un défaut détecté peut se faire par un simple
20 calculateur optique comme le montre la Fig. 8. Un laser 50 produit la lumière de source cohérente pour irradier et reconstituer l'hologramme développé synthétiquement monté dans une porte liquide 51. Le filtre spatial 52 met en forme ou filtre le faisceau du laser 50 pour assurer que la source lumineuse s'approche d'une source pon-
25 tuelle. L'appareil doit comporter un obturateur temporisé mécaniquement ou électroniquement pour produire l'exposition lumineuse nécessaire à la photographie des images de défaut pour des enregistrements permanents. L'ouverture mécanique réglable 53 fournit la lumière requise sur
30 toute la surface de l'hologramme. La position de la lentille 54 est variable. Le déplacement de la lentille 54 met au point l'image vraie ou réelle du défaut sur l'écran de visualisation 55. Différentes positions de la lentille correspondent à différentes profondeurs du défaut dans
35 l'échantillon contrôlé.

L'hologramme est représenté dans une fenêtr
liquide 51 contenant une solution avec un indice de réfraction qui s'approche de celui du film d'hologramme. La

fenêtre liquide élimine essentiellement les effets indésirables de variations d'épaisseur du film qui entraîneraient autrement des erreurs de phase. La solution entoure le film entre deux plans optiques, de sorte que le film apparaît à la lumière cohérente aussi épais que la largeur de la fenêtre. Les surfaces lisses optiquement représentent maintenant les surfaces du film éliminant ainsi les variations d'épaisseur. L'écran de visualisation 55, par exemple en verre dépoli, est généralement disposé à une distance spécifiée de l'hologramme. Les images des défauts sont ensuite observées directement sur un écran de contrôle de télévision (non représenté). Des enregistrements permanents peuvent être obtenus, en remplaçant simplement l'écran de contrôle 55 par une caméra (non représentée).

Des expériences initiales concernant l'invention ont consisté à vérifier les différents paramètres d'images de phase en utilisant une source stationnaire et de configuration acoustique de récepteur en balayage. Le système acoustique est utilisé dans la recherche par courants de Foucault car les paramètres d'image et les techniques de reconstitution qui le concernent sont bien connus. Cela réduisait le nombre des variables inconnues.

L'objectif des expériences acoustiques était de comparer des hologrammes synthétiques construits à 2,5 MHz (en utilisant un facteur de multiplication de phase de deux) avec des hologrammes acoustiques à 5 MHz et 2,5 MHz. La présente théorie de reconstitution prévoit que l'hologramme synthétique et l'hologramme à 5 MHz ont les mêmes paramètres de reconstitution et des grossissements d'image identiques.

Les Figures 9 à 14 montrent des hologrammes synthétiques, des hologrammes acoustiques ou leurs images reconstituées pour comparaison. Les Figures 9 et 10 montrent l'hologramme synthétique à 2,5 MHz et l'image. Les Figures 11 et 12 montrent l'hologramme acoustique

à 5 MHz et l'image. Les Figures 13 et 14 montrent l'hologramme acoustique à 2,5 MHz et l'image.

L'hologramme acoustique à 5 MHz (Figure 11) et l'hologramme synthétique à 2,5 MHz (Figure 9) ont essentiellement la même structure de franges. Ils apparaissent identiques et sont facilement différenciés de l'hologramme à 2,5 MHz (Fig. 13). L'hologramme acoustique représenté sur la Figure 13 a une structure de franges qui contient des fréquences spatiales inférieures comparativement avec l'hologramme synthétique construit à la même fréquence et ensuite manipulé par un facteur de multiplication de phase de 2 (Fig. 9).

Les Figures 10, 12 et 14 montrent les trois images reconstituées d'un petit objet ponctuel (1,5 mm de diamètre). Les images de l'hologramme acoustique à 5 MHz et de l'hologramme synthétique à 2,5 MHz ont été reconstituées dans des conditions identiques, comme si l'hologramme synthétique était un hologramme acoustique synthétique à 5 MHz. La distance effective de la source de reconstitution était 5,1 m des hologrammes. La distance image vraie-hologramme était 6,1 m et le grossissement latéral 0,005. L'image à 2,5 MHz a aussi été reconstituée à 6,1 m avec une distance effective de source de 5,6 m. Le grossissement latéral était exactement la moitié de la valeur à 5 MHz (0,025). L'image d'une grande lettre métallique non symétrique "F" a été formée dans la séquence suivante d'expérience pour montrer que les grossissements d'image sont égaux pour l'hologramme acoustique à 5 MHz et l'hologramme synthétique à 2,5 MHz. La Figure 11 montre la géométrie de construction de l'hologramme synthétique et de la grande lettre "F" de 12,7 cm. Les hologrammes synthétiques et les hologrammes acoustiques ont été construits en utilisant la configuration de balayage optimale (simultanément source-récepteur). Comme le montre la Figure 15, le jambage de la lettre "F" 60 était supporté sur un pied 61 pour le balayage simultané source-récepteur 62. Les Figures 16 à 21

montrent les hologrammes synthétiques, les hologrammes acoustiques et les images reconstituées de la lettre "F". L'hologramme synthétique à 2,5 MHz et son image sont représentés sur les figures 16 et 17. L'hologramme acoustique à 6 MHz et son image sont représentés sur les figures 18 et 19. L'hologramme à 2,5 MHz et son image sont représentés sur les Figures 20 et 21.

La structure des franges de l'hologramme acoustique à 5 MHz (Fig. 18) et de l'hologramme synthétique à 2,5 MHz (Fig. 16) fait apparaître un plus grand contenu de fréquences spatiales comparativement avec l'hologramme acoustique à 2,5 MHz (Figure 20). L'hologramme acoustique est représenté sur la Figure 18 et l'hologramme synthétique représenté sur la Figure 16 semblent similaires en ce qui concerne les densités des franges.

Les images reconstituées de la lettre "F" sont représentées au-dessous des images de franges respectives sur les Figures 17, 19 et 21. La distance effective de la source de reconstitution était 4,3 m de l'hologramme synthétique ou de l'hologramme acoustique. La distance image vraie-hologramme pour l'hologramme synthétique était 6,1 m et le grossissement latéral 0,3. L'image de l'hologramme synthétique à 2,5 MHz représentée sur la Fig. 17 a exactement les mêmes dimensions et la même configuration que l'image de l'hologramme acoustique à 5 MHz représentée sur la Fig. 19. L'image holographique acoustique à 2,5 MHz représentée sur la Fig. 21 à titre de comparaison a un grossissement latéral d'image de 0,07.

Les résultats des expériences décrites ci-dessus vérifient que les paramètres de reconstitution et les grossissements d'image sont identiques entre l'hologramme synthétique à multiplication de phase et l'hologramme acoustique de fréquence équivalente. Le procédé décrit ici paraît réduire synthétiquement la longueur d'onde de construction par le facteur de mul-

tiplication de phase.

Les Figures 22 et 23 montrent la géométrie de construction de l'hologramme synthétique par courants de Foucault pour la détection d'un défaut circulaire connu. L'hologramme synthétique résultant est représenté sur la Figure 24 et son image reconstituée apparaît sur la Figure 25. La fréquence d'irradiation ou d'essai était 500 KHz et l'entrefer d'environ 0,1 mm. La sonde électromagnétique balayait une ouverture de $2,4 \times 2,4$ cm au-dessus de la plaque d'acier inoxydable 63 comportant un défaut circulaire 64 de 6 mm. Le défaut 64 a été localisé à 0,25 mm au-dessous de la surface supérieure de la plaque 63. Le signal de phase de défaut par courants de Foucault résultant a été multiplié par 40. Comme le montre la Figure 24, l'écartement de l'image de franges résultante semble très similaire à celle d'un hologramme acoustique d'objet ponctuel. Les écartements des quatre franges intérieures correspondent très exactement aux écartements prévus théoriquement mais non la frange extérieure. Cette frange extérieure était le résultat d'erreurs de phase aux extrémités d'ouverture et elle peut être éliminée dans le processus de reconstitution par des techniques de réduction d'ouverture.

La reconstitution optique de l'image de franges (Fig. 25) illustre graphiquement l'image unique par courants de Foucault d'un trou à sommet plat dans l'acier inoxydable.

Les Figures 26 à 29 montrent de façon générale similaire la géométrie de construction d'un hologramme synthétique par courants de Foucault, produisant des images de franges et l'image reconstituée d'une fissure superficielle simulée 65 dans une plaque d'acier inoxydable 66. La fente 65 avait une longueur de 6,25 mm, une largeur de 0,25 mm et une hauteur de 0,5 mm. L'hologramme synthétique était construit à 60 KHz avec un facteur de multiplication de phase de 40. La forme générale de l'image de franges représentée sur la Fig. 28

5 ressemble à un hologramme d'objet linéaire. L'écartement de la frange extérieure est à nouveau le résultat d'erreurs de phase quand la sonde atteint les extrémités d'ouverture. L'image reconstituée montre la vue de dessus de la fente superficielle. C'est là une image exceptionnelle si l'on considère la fréquence d'irradiation extrêmement faible.

10 La Figure 30 est une comparaison graphique des procédés conventionnels par courants de Foucault de contrôle non destructif, avec la présente technique pour l'inspection d'un tube 67 de générateur de vapeur. Une sonde tournante 68 est utilisée pour construire les hologrammes synthétiques bidimensionnels comme cela apparaît en bas de la Figure 30. Les signaux absolus
15 conventionnels d'une sonde courante 70 forment seulement des profils unidimensionnels d'un trou 71 et d'une fente 72 pour l'analyse. La présente technique d'holographie par multiplication de phase produit des images bidimensionnelles montrant les géométries des défauts. Cela
20 améliore considérablement l'analyse dans les procédures d'essai et réduit substantiellement l'entraînement nécessaire de l'opérateur.

Bien entendu, de nombreuses modifications peuvent être apportées au procédé et à l'appareil décrits
25 ci-dessus à titre d'exemples nullement limitatifs sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

- 1 - Procédé de contrôle non destructif pour identifier des caractéristiques de structure d'un objet, procédé caractérisé en ce qu'il consiste essentiellement à faire pénétrer dans l'objet un rayonnement ondulatoire à partir d'un signal d'excitation (18) de fréquence constante, à balayer (16) l'objet pour produire un signal de sortie à ladite fréquence constante et de phase variable en fonction des caractéristiques de structure de l'objet, à multiplier (17) la phase et la fréquence du signal de sortie par un nombre prédéterminé, à détecter (20, 21) les différences de phase entre la phase multipliée du signal de sortie à la fréquence multipliée et la phase du signal d'excitation après multiplication de sa fréquence par ledit nombre prédéterminé, et à enregistrer (22) une image de balayage de l'objet en fonction des différences de phase détectées entre les deux signaux de fréquences multipliées pour produire des images de franges pouvant être reconstituées par des techniques holographiques comme une image visuelle des caractéristiques de structure de l'objet.
- 2 - Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'objet est métallique et que le rayonnement est électromagnétique.
- 3 - Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le signal de sortie est produit à partir de courants de Foucault développés dans l'objet sous l'effet de sa pénétration par le rayonnement ondulatoire.
- 4 - Appareil de contrôle non destructif pour identifier des caractéristiques de structure d'un objet, appareil caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de balayage (16) qui produit un signal de sortie de fréquence constante dont la phase varie en fonction des caractéristiques de structure de l'objet, un multipliateur de phase (17) destiné à multiplier la fréquence et la phase du signal de sortie par un nombre prédé-

miné, un dispositif (20, 21) destiné à détecter les différences de phase entre le signal de sortie multiplié et un signal d'excitation de référence dont la fréquence a été multipliée par ledit nombre prédéterminé et un dispositif (22) réagissant à la détection de ces différences de phase en enregistrant une image balayée de l'objet comme des images de franges pouvant être reconstituées par des techniques holographiques comme une image visuelle des caractéristiques de structure de l'objet.

5 - Appareil selon la revendication 4, caractérisé en ce que ledit multiplicateur de phase est une boucle à verrouillage de phase (37) dont une entrée est connectée audit dispositif de balayage et dont une sortie est connectée audit dispositif de détection de différences de phase.

6 - Appareil selon la revendication 4, caractérisé en ce que ledit dispositif de balayage (16) est une bobine réagissant aux courants de Foucault développés dans l'objet sous l'effet de sa pénétration par la rayonnement électromagnétique.

7 - Appareil de contrôle non destructif pour contrôler des caractéristiques de structure d'un objet, appareil caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif (15) par lequel un rayonnement d'une fréquence connue pénètre dans l'objet, un transducteur à balayage (16) dans un plan fixe par rapport à l'objet destiné à produire un signal de sortie à ladite fréquence connue sous l'effet de ladite pénétration, la phase du signal de sortie étant fonction des caractéristiques de structure de l'objet que rencontre le rayonnement, un multiplicateur de phase (17) connecté audit transducteur et destiné à multiplier à la fois la fréquence et la phase du signal de sortie par un nombre prédéterminé, un dispositif destiné à multiplier la fréquence connue du rayonnement qui pénètre dans l'objet pour produire un signal de référence, un détecteur de phase (20, 21) qui produit

un signal d'écriture variable en fonction des variations détectées de la phase du signal de sortie multiplié par rapport au signal de référence, et un dispositif de visualisation à mémoire (22) connecté audit transducteur à balayage et audit détecteur de phase et destiné à produire un affichage mécanique à balayage bidimensionnel en fonction du signal d'écriture variable, afin que l'affichage prenne la forme d'images de franges pouvant être reconstituées par des techniques holographiques comme une image visuelle des caractéristiques de structure de l'objet.

8 - Appareil selon la revendication 7, caractérisé en ce que ledit transducteur à balayage (16) est d'un type qui détecte des signaux de sortie à partir d'une source ponctuelle.

1,9

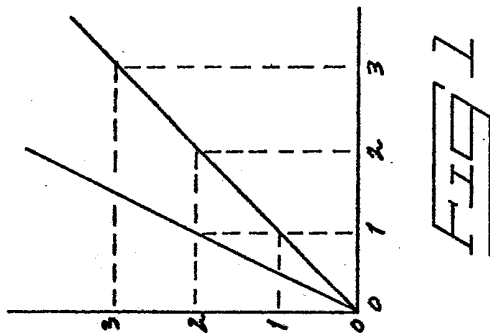


FIG 1

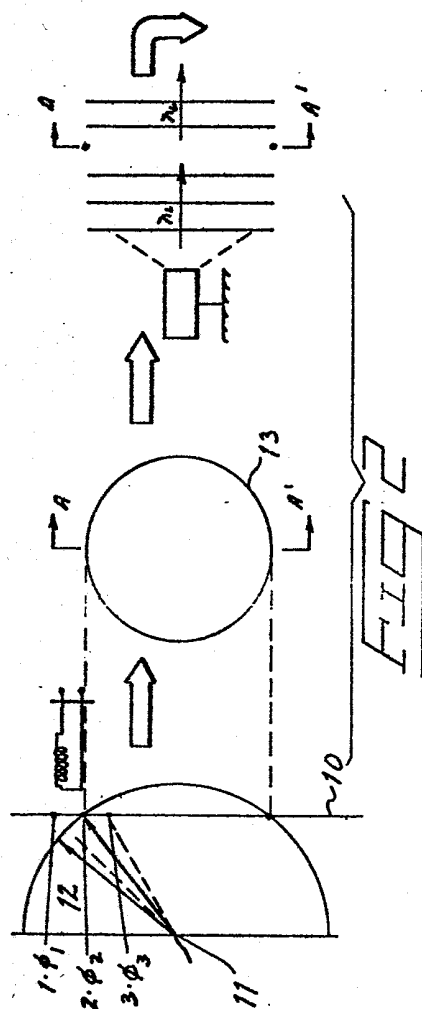


FIG 2

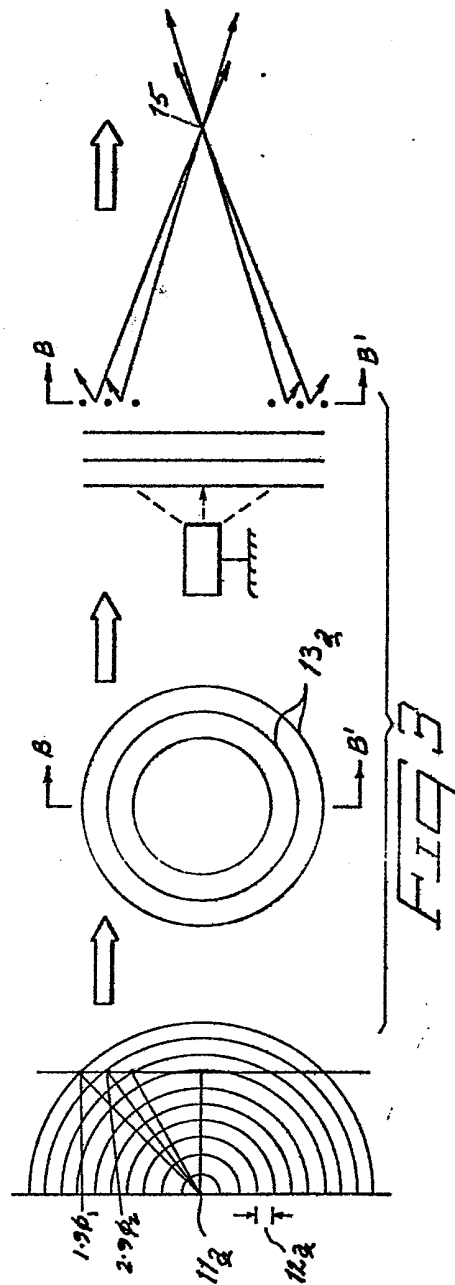
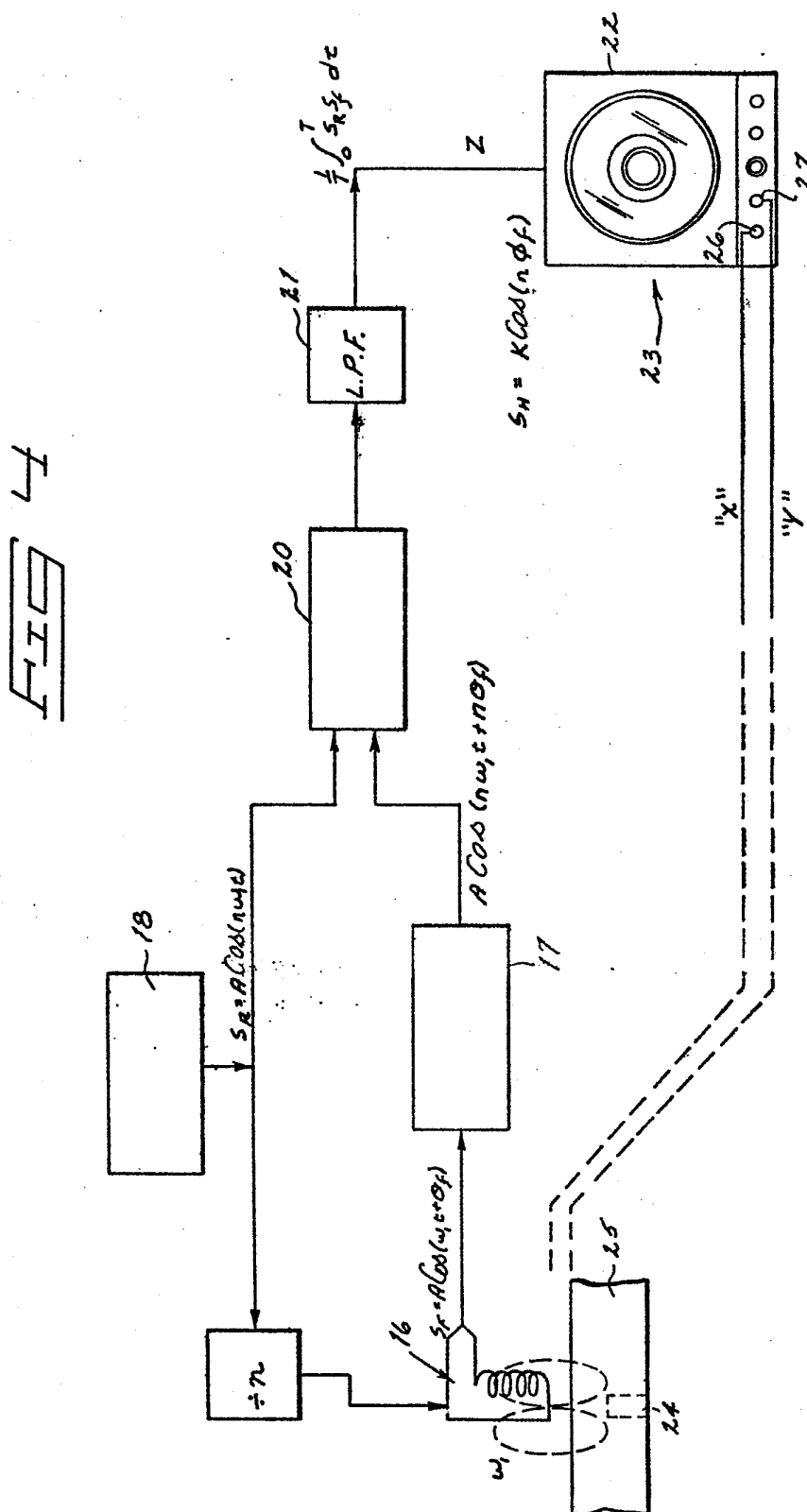
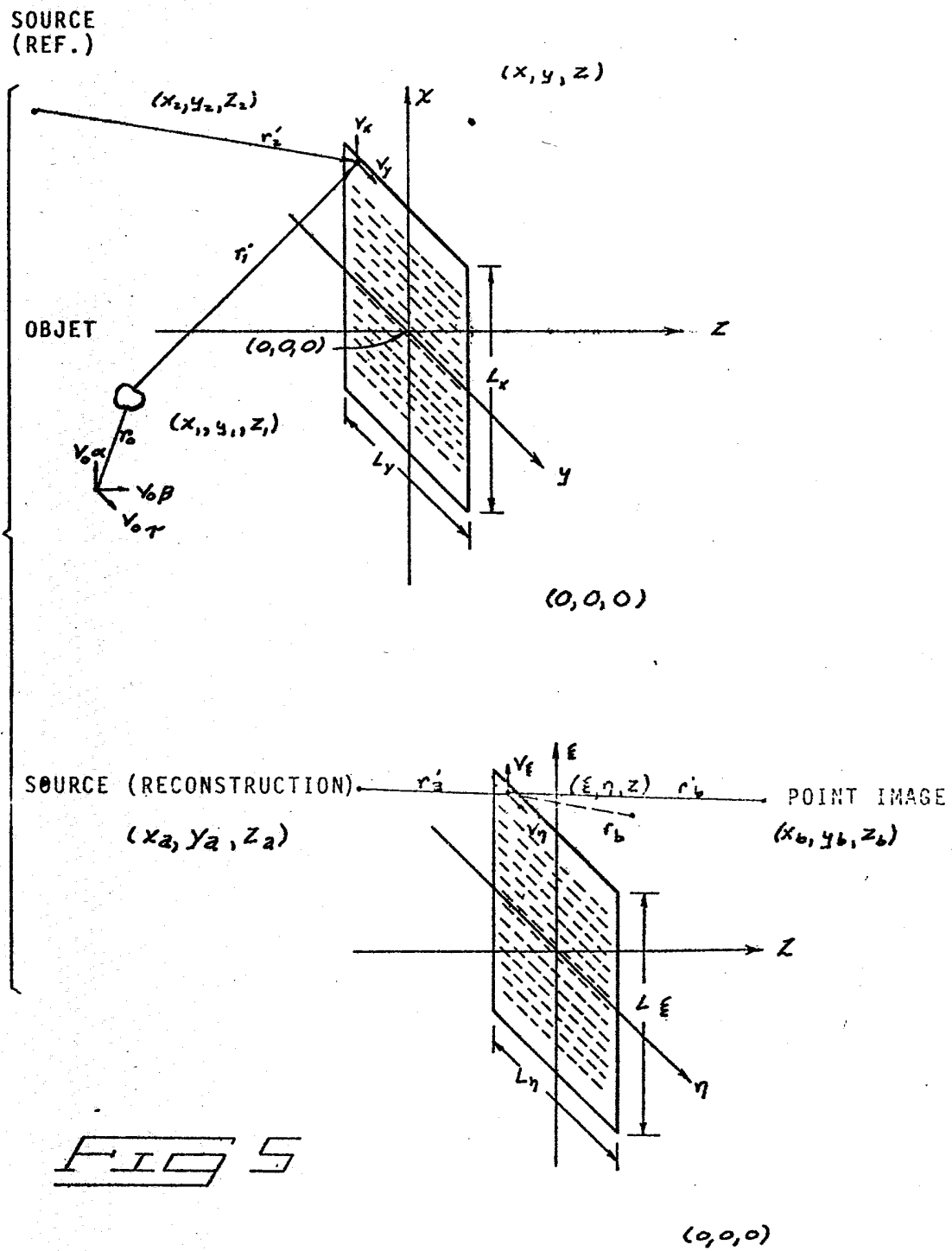


FIG 3

2.9



3.9



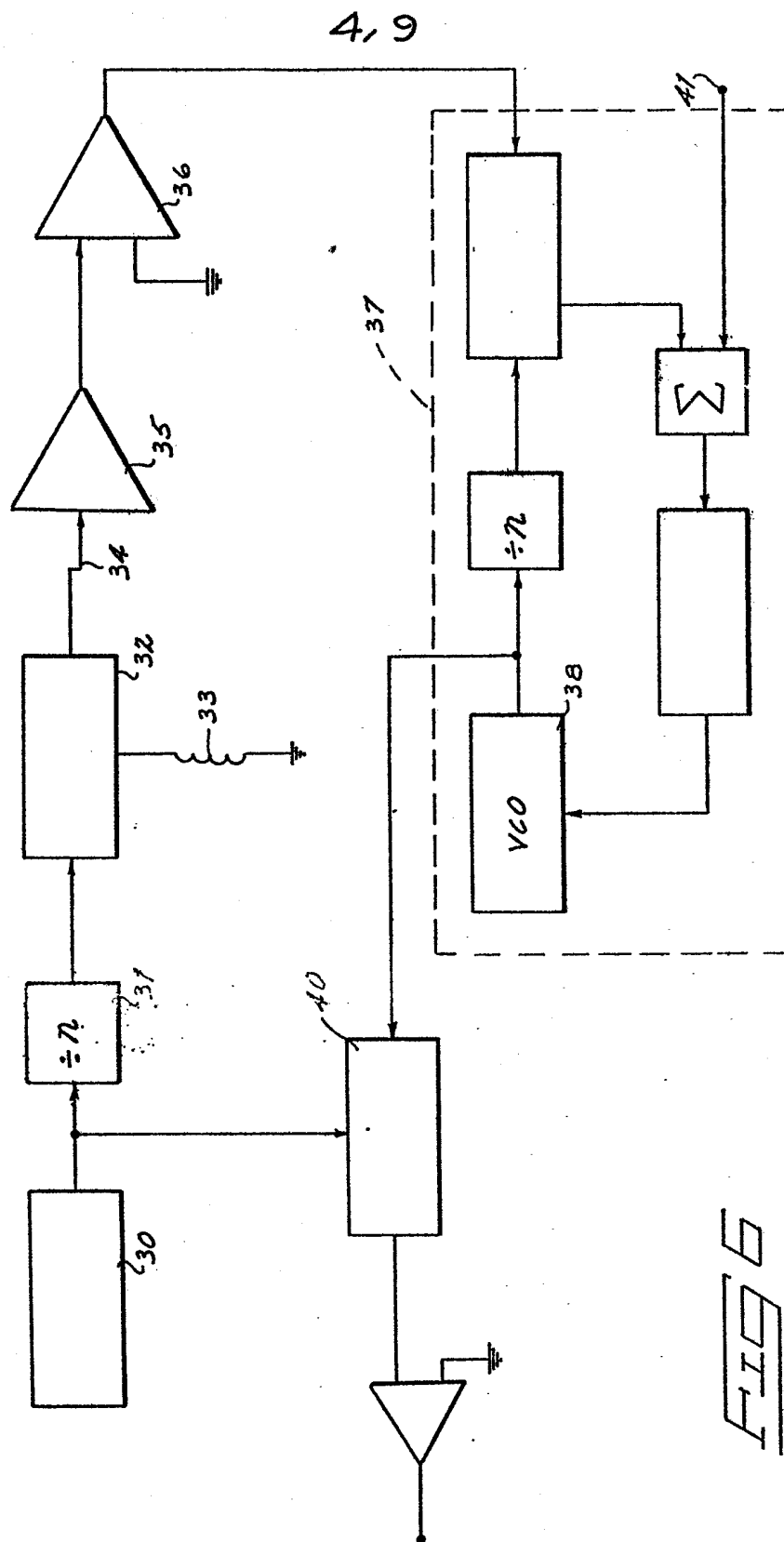


FIG 6

5.9

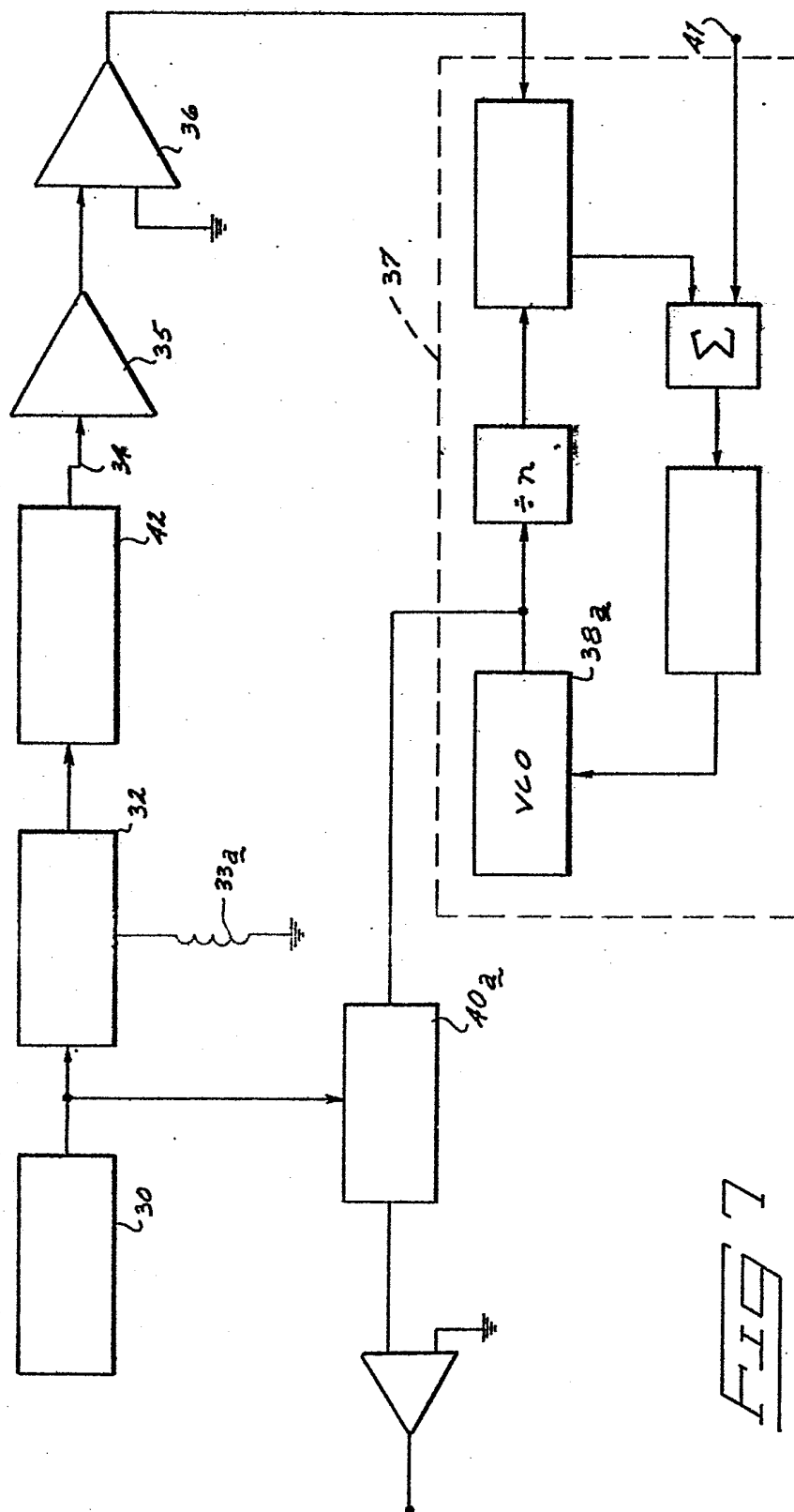


FIG 7

6,9

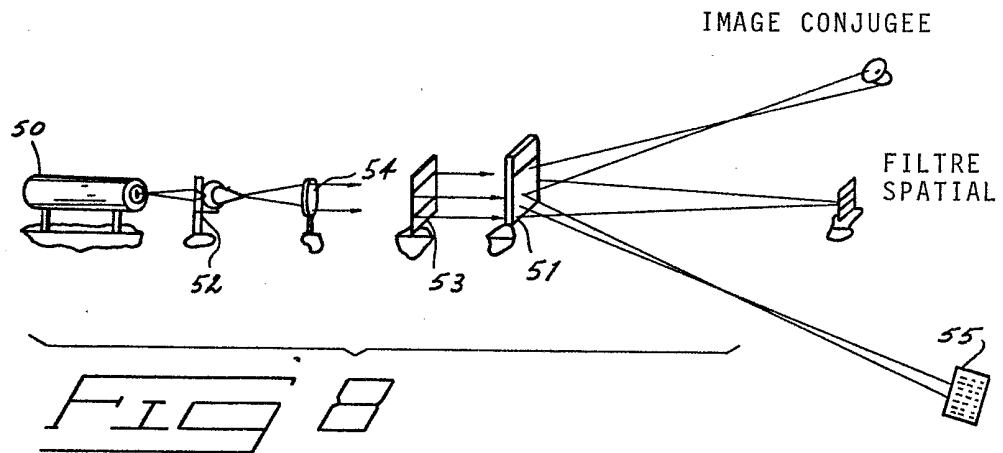


FIG 9



FIG 11

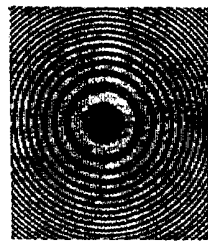


FIG 13

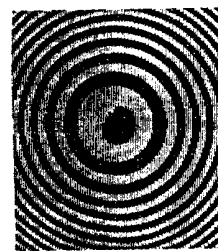


FIG 10



FIG 12

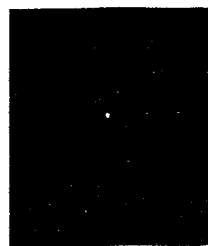
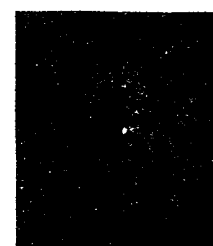
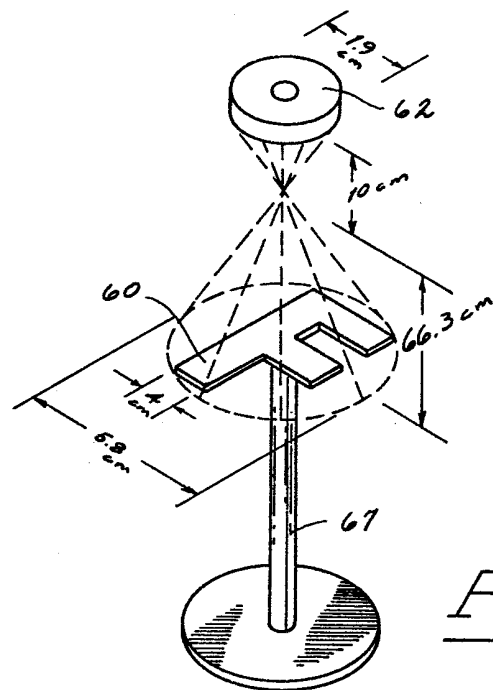
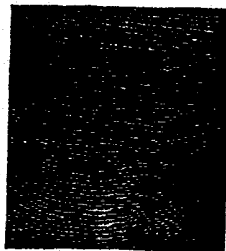
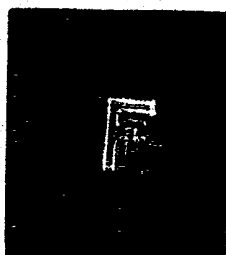
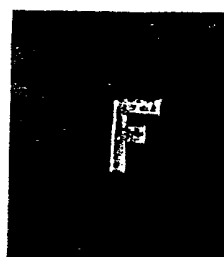
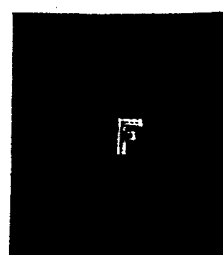


FIG 14



7,9

FIG 15FIG 16FIG 18FIG 20FIG 17FIG 19FIG 21

8,9

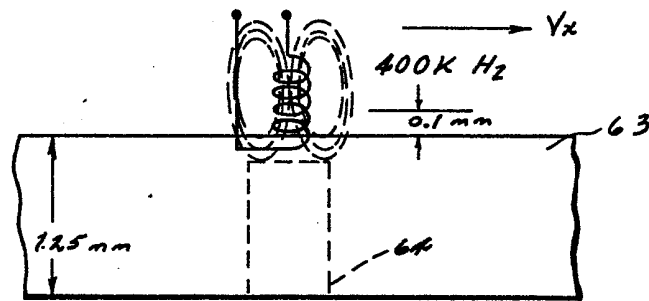


FIG 22

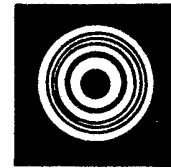


FIG 24

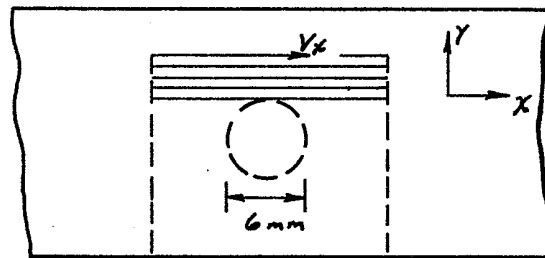


FIG 23

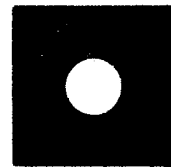


FIG 25

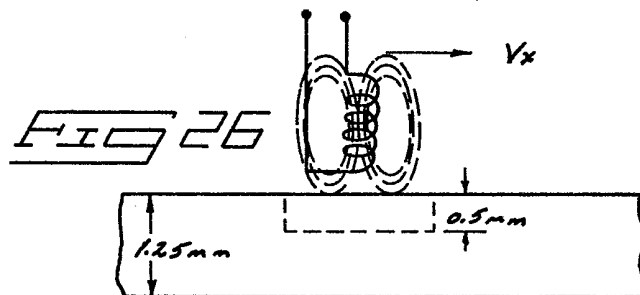


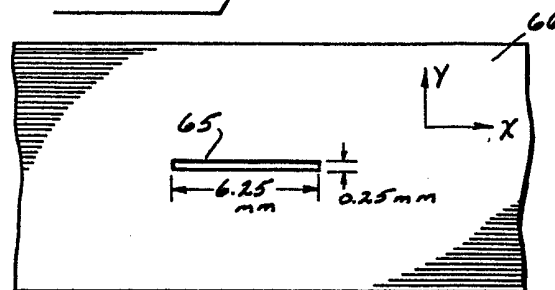
FIG 26

FIG 28



FIG 27

FIG 29



9,9

