

(12) DEMANDE DE BREVET CANADIEN
CANADIAN PATENT APPLICATION

(13) **A1**

(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2005/06/10

(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2006/01/19

(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2006/12/08

(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2005/001446

(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2006/005836

(30) Priorité/Priority: 2004/06/17 (FR0406592)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *G03H 3/00* (2006.01),
G01N 21/49 (2006.01), *G01N 29/06* (2006.01)

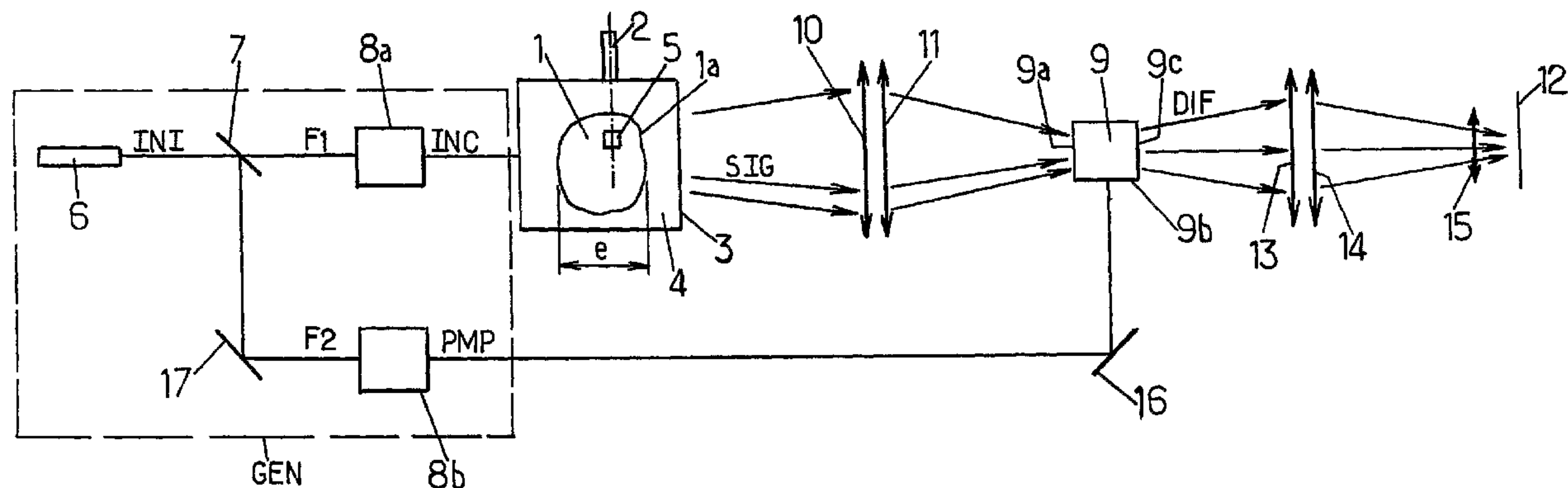
(71) **Demandeurs/Applicants:**
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE CNRS, FR;
UNIVERSITE PIERRE & MARIE CURIE, FR

(72) Inventeurs/Inventors:
GROSS, MICHEL, FR;
RAMAZ, FRANCOIS GEORGES GERARD, FR;
FORGET, BENOIT CLAUDE, FR;
ROOSEN, GERALD, FR;
DELAYE, PHILIPPE, FR;
BOCCARA, ALBERT-CLAUDE, FR

(74) Agent: BERESKIN & PARR

(54) Titre : PROCEDE ET INSTALLATION D'IMAGERIE ACOUSTO-OPTIQUE

(54) Title: METHOD AND INSTALLATION FOR ACOUSTO-OPTIC IMAGING



(57) **Abrégé/Abstract:**

Le procédé d'imagerie acousto-optique comprend une étape au cours de laquelle on grave dans un matériau holographique dynamique (9) un réseau d'indice complexe résultant de l'interférence de la composante acousto-optique de l'onde signal (SIG) et d'une onde pompe (PMP) de fréquence égale à la fréquence de la composante acousto-optique.

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international(43) Date de la publication internationale
19 janvier 2006 (19.01.2006)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2006/005836 A1(51) Classification internationale des brevets⁷ : G03H 3/00,
G01N 29/06, 21/49(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2005/001446

(22) Date de dépôt international : 10 juin 2005 (10.06.2005)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0406592 17 juin 2004 (17.06.2004) FR(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) :
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE - CNRS [FR/FR]; 3, rue Michel Ange, F-75794 Paris Cedex 16 (FR). **UNIVERSITE PIERRE & MARIE CURIE** [FR/FR]; 4, place Jussieu, F-75005 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **GROSS, Michel** [FR/FR]; 6, rue Hoche, F-93420 Villepinte (FR). **RAMAZ, Francois, Georges, GÉRARD** [FR/FR]; 88 bis, avenue de Fontainebleau, F-94270 Le Kremlin-Bicetre (FR). **FORGET, Benoît, Claude** [CA/FR]; 26, rue du Fer à Moulin, F-75005 Paris (FR). **ROOSEN, Gérald** [FR/FR]; 3, rue de la Guiloire, F-78720 La Celle Les Bordes (FR). **DELAYE, Philippe** [FR/FR]; 3, rue Chaudron, F-75010 Paris (FR). **BOCCARA, Albert-Claude** [FR/FR]; 54, rue de la Verrerie, F-75004 Paris (FR).(74) Mandataires : **BURBAUD, Eric** etc.; Cabinet Plasseraud, 65/67, rue de la Victoire, F-75440 Paris Cedex 9 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)) pour US seulement

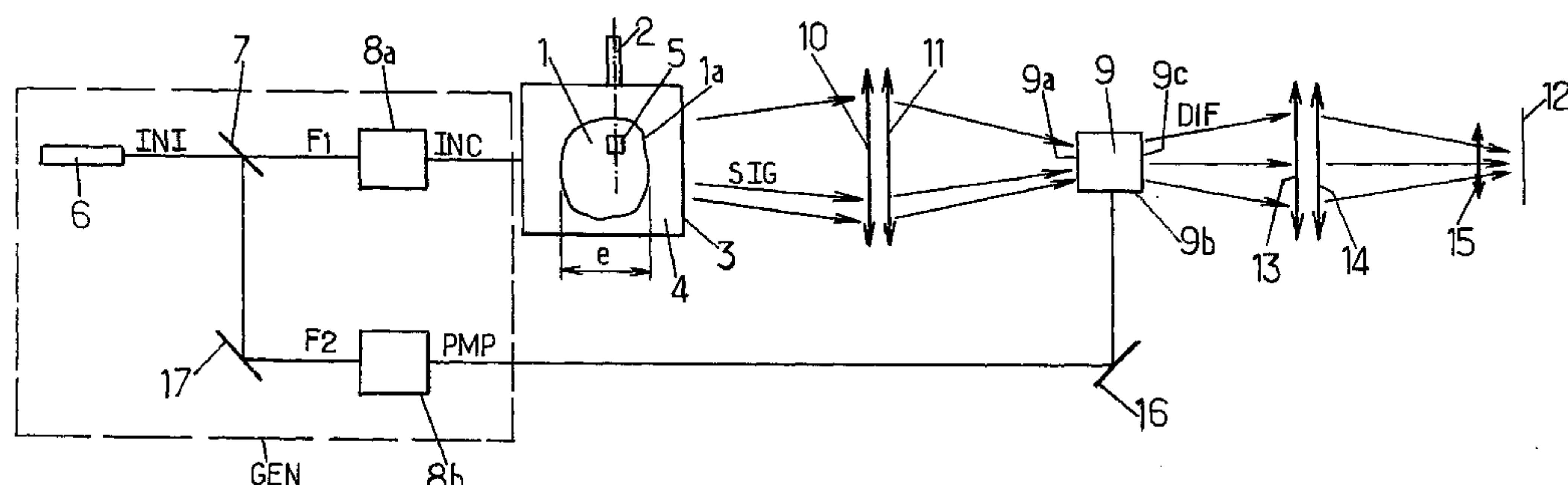
Publiée :

— avec rapport de recherche internationale

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(54) Title: METHOD AND INSTALLATION FOR ACOUSTO-OPTIC IMAGING

(54) Titre : PROCEDE ET INSTALLATION D'IMAGERIE ACOUSTO-OPTIQUE



(57) Abstract: The invention concerns an acousto-optic imaging method comprising a step which consists in engraving in a dynamic holographic material (9) a complex index array resulting from the interference of the acousto-optic component of the signal wave (SIG) and a pump wave (PMP) of frequency equal to the frequency of the acousto-optic component.

(57) Abrégé : Le procédé d'imagerie acousto-optique comprend une étape au cours de laquelle on grave dans un matériau holographique dynamique (9) un réseau d'indice complexe résultant de l'interférence de la composante acousto-optique de l'onde signal (SIG) et d'une onde pompe (PMP) de fréquence égale à la fréquence de la composante acousto-optique.

WO 2006/005836 A1

Procédé et installation d'imagerie acousto-optique

La présente invention est relative aux procédés et installations d'imagerie acousto-optique.

5 Plus particulièrement, l'invention concerne un procédé d'imagerie acousto-optique.

Dans ce genre de procédé, on illumine un objet à imager avec une source lumineuse de type laser. Par ailleurs, on fait propager des ondes acoustiques dans
10 l'objet avec une source ultra-sonore. On obtient une information pour une zone de l'objet à imager en détectant un signal lié aux propriétés de couplage entre l'onde lumineuse et l'onde ultra-sonore qui fait spécifiquement vibrer la zone en question. En effet, lorsqu'une onde
15 ultra-sonore, de fréquence acoustique f_a traverse un milieu diffusant (tel que par exemple un tissu biologique, ou autre), elle provoque un ébranlement périodique des diffuseurs et une modulation périodique de l'indice de réfraction du milieu. Si une onde laser, de fréquence
20 incidente f_i est diffusée par le milieu, le mouvement des diffuseurs et la modulation de l'indice du milieu génèrent une onde signal comprenant d'une part une composante porteuse (à la fréquence f_i) et d'autre part une composante acousto-optique diffusée sur l'une ou l'autre des bandes
25 latérales acoustiques (de fréquence $f_{AO} = f_a \pm f_i$). L'imagerie acousto-optique consiste à déterminer le poids de cette composante à la fréquence f_{AO} en fonction de la position de focalisation de l'onde acoustique dans le milieu diffusant.

30 Historiquement, la détection a été initialement effectuée en utilisant un détecteur mono-pixel. Néanmoins, cette technique présente une faible sensibilité.

En effet, la détection est effectuée en mesurant les interférences entre deux composantes de l'onde signal :
35 la composante porteuse, à la fréquence f_i , et la composante

acousto-optique, à la fréquence f_{AO} . Ces deux fréquences étant sensiblement différentes entre elles de la valeur de la fréquence acoustique f_a de l'onde ultra-sonore, la détection est hétérodyne. Une telle détection n'est
5 efficace que pour une étendue géométrique très réduite, de sorte que la majeure partie du signal est perdue.

D'autre part, du fait de la présence de diffuseurs dans le milieu, les composantes porteuse et acousto-optique de l'onde signal sont deux champs de speckle aléatoires, de
10 sorte que l'information pertinente n'est obtenue qu'en moyennant spatialement et/ou temporellement le signal détecté.

Une amélioration importante a été apportée par l'ESPCI (voir en particulier "*Ultrasonic tagging of photon
15 paths in scattering media: parallel speckle modulation*", Levêque et al., publié dans *Optic Letters* 24: 181, 1999). Dans ce dispositif, le détecteur mono pixel est remplacé par un détecteur multi pixels tel qu'une caméra CCD. Un problème se pose néanmoins en ce qu'une telle caméra est
20 trop lente pour détecter un signal d'interférence entre les composantes porteuse et acousto-optique de l'onde signal, qui présente une fréquence élevée de l'ordre de celle de l'onde acoustique (quelques MHz, typiquement). Pour détecter un signal, l'ESPCI ne détecte plus les
25 interférences de la composante acousto-optique avec la composante porteuse, mais avec une composante de référence traversant le milieu et obtenue par modulation d'amplitude de l'onde incidente à une fréquence proche de celle de la composante acousto-optique (typiquement à quelques Hz
30 près). On obtient ainsi une interférence entre la composante de référence et la composante acousto-optique qui est suffisamment lente pour être détectée par chaque pixel de la caméra. Pour obtenir l'information relative à la zone vibrante, il faut sommer sur tous les pixels de la
35 caméra le signal détecté.

Cette technique n'est pourtant pas optimale car, d'une part, le signal mesuré comprend une composante importante de bruit dû aux photons simplement diffusés ayant traversé une zone de l'objet à imager ne vibrant pas, et d'autre part, la composante de référence est
5 relativement faible, car elle traverse le milieu diffusant.

En outre, chacun des signaux porte un bruit dit « de décorrélation de speckle ». La lumière, diffusée par le milieu, est émise sous la forme d'une onde de speckle, constituée de grains. D'un grain de speckle à l'autre,
10 l'amplitude et la phase de l'onde signal varient de manière aléatoire. Si, au cours du temps, le milieu diffusant se modifie (c'est en particulier le cas pour les tissus vivants), les diffuseurs changent de position. Cela modifie
15 la position, l'intensité et la phase des grains de speckle (on dit que le speckle se décorrèle).

En imagerie acousto-optique, on cherche à mesurer l'intensité totale de la composante acousto-optique de l'onde signal. Celle-ci est beaucoup plus faible que celle
20 correspondant à la composante non marquée acoustiquement (la composante porteuse ou la composante de référence, selon la technique utilisée), qui est également vue par le détecteur. Si une partie continue associée à la composante non marquée acoustiquement est facilement éliminable au
25 cours de la détection, les variations d'amplitude et de phase de l'onde signal, qui se traduisent par la décorrélation du speckle, conduisent souvent à un faux signal appelé « bruit de décorrélation de speckle ».

Les tissus biologiques vivants, pour lesquels la
30 technique d'imagerie acousto-optique est amenée à être utilisée, par exemple pour le dépistage du cancer du sein, ou autre, conduisent à un bruit important de décorrélation de speckle. Il est donc préférable de pouvoir effectuer des mesures rapides, ce pour quoi l'utilisation de détecteurs
35 multi-pixels, plutôt lents, n'est pas bien adaptée. Il

manque donc un procédé qui puisse garantir une bonne sensibilité de mesure pour les tissus biologiques.

A cet effet, selon l'invention, on prévoit un procédé d'imagerie acousto-optique d'un objet comprenant
5 les étapes au cours desquelles :

(a) on génère la vibration d'une zone de l'objet en appliquant à l'objet une onde acoustique présentant une certaine fréquence acoustique,

(b) on applique audit objet une onde lumineuse
10 incidente et on génère une onde lumineuse signal comportant au moins une composante acousto-optique décalée en fréquence par ladite onde acoustique,

(c) on génère une onde pompe lumineuse cohérente avec ladite onde incidente à une fréquence pompe égale à la
15 fréquence de ladite composante acousto-optique,

(d) on grave un réseau d'indice complexe dans un matériau holographique dynamique en appliquant audit matériau ladite onde signal et ladite onde pompe, et

(e) on obtient un paramètre numérique relatif à
20 l'intensité lumineuse en cette zone à partir dudit réseau d'indice complexe.

Grâce à ces dispositions, on peut s'affranchir du bruit causé par la composante non marquée de l'onde signal, car le réseau d'indice ne se grave que pour un
25 interférogramme de fréquence nulle entre la composante acousto-optique du signal et l'onde pompe. En outre, il est possible d'utiliser un détecteur rapide tel une photodiode lors de la lecture du matériau holographique dynamique.

Dans des modes de réalisation préférés de
30 l'invention, on peut éventuellement avoir recours en outre à l'une et/ou à l'autre des dispositions suivantes :

- au cours de l'étape (e),

. (e1) on génère une onde diffractée par application de ladite onde pompe sur ledit réseau d'indice
35 complexe, et

. (e2) on détecte l'interférence entre ladite onde diffractée et ladite onde signal à l'aide d'un photo détecteur ;

- on applique une modulation de phase, à une onde choisie parmi l'onde acoustique, l'onde pompe, et l'onde incidente ;

- ladite modulation de phase est appliquée à l'onde acoustique ;

- on applique une modulation d'amplitude à une onde choisie parmi l'onde acoustique, l'onde pompe et l'onde incidente ;

- ladite modulation d'amplitude est appliquée à l'onde acoustique ;

- on génère l'onde incidente et l'onde pompe en générant une onde lumineuse initiale à l'aide d'un laser,

. séparant ladite onde initiale en un premier faisceau (F1) et un deuxième faisceau,

. décalant la fréquence dudit premier faisceau d'un premier décalage en fréquence pour générer l'onde incidente,

. décalant la fréquence dudit deuxième faisceau d'un deuxième décalage en fréquence pour générer l'onde pompe, ledit deuxième décalage en fréquence étant sensiblement égal à la somme du premier décalage en fréquence et de la fréquence acoustique ;

- l'un desdits premier et deuxième décalages en fréquence est nul ;

- au cours de l'étape (d), on applique ladite onde signal sur une première face dudit matériau holographique dynamique et ladite onde pompe sur une deuxième face dudit matériau, distincte de la première face ;

- au cours de l'étape (d), on applique ladite onde signal et ladite onde pompe sur une même face du matériau holographique dynamique ;

- ledit matériau holographique dynamique est un cristal photo réfractif adapté pour fonctionner en mode « transfert d'énergie » ;

5 - ledit matériau holographique dynamique est un cristal photo réfractif adapté pour fonctionner en mode « diffraction anisotrope » ;

- on obtient en outre une information numérique relative à une deuxième zone de l'objet en appliquant les étapes suivantes :

10 . on génère la vibration de ladite deuxième zone en appliquant à l'objet au niveau de ladite deuxième zone une onde acoustique à une fréquence acoustique, et

. on répète les étapes (b) à (e) pour ladite deuxième zone.

15 Selon un autre aspect, l'invention concerne une installation d'imagerie acousto-optique d'un objet comprenant

- (A) un transducteur adapté pour générer la vibration d'une zone de l'objet en appliquant à l'objet une
20 onde acoustique présentant une fréquence acoustique ;

- (B) un dispositif de génération d'ondes lumineuses adapté pour appliquer audit objet une onde lumineuse incidente et, générant ainsi une onde lumineuse signal comportant au moins une composante acousto-optique
25 décalée en fréquence par ladite onde acoustique, et adapté en outre pour générer une onde pompe lumineuse, cohérente avec ladite onde incidente à une fréquence similaire à la fréquence de ladite composante acousto-optique ;

- (C) un matériau holographique dynamique adapté
30 pour qu'y soit gravé un réseau d'indice complexe par application audit matériau de ladite onde signal et de ladite onde pompe, et

- (D) un dispositif de détection adapté pour obtenir un paramètre numérique relatif à l'intensité
35 lumineuse en cette zone à partir dudit réseau d'indice

complexe.

Selon des modes de réalisation alternatifs de l'invention, on peut en outre avoir recours à l'une et/ou à l'autre des dispositions suivantes :

- 5 - le dispositif de détection comprend un détecteur adapté pour détecter l'interférence entre une onde diffractée générée par ladite onde pompe traversant ledit réseau d'indice complexe et ladite onde signal ;
- ledit détecteur est une photo diode monopixel,
- 10 - l'installation comprend :
 - . un premier dispositif optique adapté pour appliquer l'onde signal sur une première face du matériau holographique dynamique,
 - . un deuxième dispositif optique adapté pour
 - 15 appliquer l'onde pompe sur une deuxième face du matériau holographique dynamique, et
 - . un troisième dispositif optique adapté pour former sur ledit détecteur une image d'une troisième face du matériau holographique dynamique opposée à ladite
 - 20 première face ;
 - lesdites première et deuxième faces de matériau holographique dynamique sont confondues ;
 - ladite deuxième face de matériau holographique dynamique est orthogonale à ladite première face ;
 - 25 - le dispositif de génération comprend :
 - . un laser adapté pour émettre une onde lumineuse initiale,
 - . un dispositif de séparation adapté pour générer à partir de ladite onde initiale un premier faisceau et un
 - 30 deuxième faisceau,
 - . un premier dispositif de décalage adapté pour décaler en fréquence ledit premier faisceau pour générer ladite onde incidente, et
 - . un deuxième dispositif de décalage adapté pour
 - 35 décaler en fréquence ledit deuxième faisceau pour générer

ladite onde pompe,

lesdits premier et deuxième dispositifs de décalage étant adaptés pour que ladite onde pompe présente une fréquence sensiblement égale à la somme de la fréquence de l'onde incidente et de la fréquence de l'onde acoustique ;

- ledit premier dispositif de décalage comprend un, zéro, ou deux modulateurs acousto-optiques, et ledit deuxième dispositif de décalage comprend, respectivement, un, deux ou zéro modulateurs acousto-optiques.

10 - ledit matériau holographique dynamique est un cristal photo réfractif ;

- ledit matériau holographique dynamique est un matériau à inversion de population apte à être gravé par un réseau d'indice complexe sous forme d'un réseau de gain, ladite installation comprenant en outre une source d'énergie adaptée pour maintenir ladite inversion de population dans ledit matériau ;

15 - l'installation comprend en outre un dispositif de commande adapté pour faire déplacer ledit transducteur et/ou changer la focale dudit transducteur.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront au cours de la description suivante d'une de ses formes de réalisation, donnée à titre d'exemple non limitatif, en regard des dessins joints.

25 Sur les dessins :

- la figure 1 est une vue schématique d'une installation d'imagerie acousto-optique selon l'invention,

- la figure 2 est un diagramme temporel représentant une modulation de phase de l'onde acoustique,

30 - les figures 3a et 3b sont un diagramme de phase représentant les amplitudes des différentes composantes dans un cristal photo réfractif respectivement lors de l'écriture et de la lecture du cristal,

- la figure 4 représente un signal obtenu sur un écran d'oscilloscope pour deux objets à imager, et

- les figures 5a et 5b sont des vues schématiques de deux variantes de réalisation d'un dispositif de génération d'ondes lumineuses.

La figure 1 représente schématiquement une installation d'imagerie acousto-optique susceptible d'être
5 utilisée dans le cadre de l'invention.

On dispose d'un objet 1 à imager à l'aide de ladite installation. Cet objet est un milieu diffusant, typiquement de quelques centimètres d'épaisseur e et peut
10 être par exemple un tissu biologique, tel qu'une partie de corps humain ou animal, ou autre.

Un transducteur piézo-électrique 2 est en contact acoustique avec l'objet 1, soit directement en contact, soit par exemple couplé acoustiquement à l'objet 1 par
15 l'immersion de celui-ci dans une cuve 3 remplie d'eau 4. On utilise par exemple un transducteur piézo-électrique Panamétrics de diamètre 37 mm présentant une face de sortie sphérique de rayon 75 mm. Le transducteur fait vibrer la zone de l'objet en regard de laquelle il est, et en
20 particulier la zone 5 à la fréquence acoustique f_a ultrasonore, telle que par exemple 2 MHz. Le transducteur piézo-électrique 2 est placé en regard d'une position donnée de la surface de l'objet. Le transducteur piézo-électrique 2 est en outre adapté pour focaliser sur une zone donnée 5 de
25 l'objet à imager dont on veut obtenir une information optique.

On dispose en outre de moyens de commande (non représentés), de type micro-ordinateur, ou autre, adaptés pour changer la distance focale du transducteur
30 piézoélectrique 2 et pour commander le déplacement de celui-ci en regard de la surface de l'objet à imager 1, de manière à scanner dans une, deux ou trois dimensions l'objet à imager 1.

On dispose en outre d'un dispositif de génération
35 d'onde lumineuses GEN adapté pour générer deux ondes

lumineuses cohérentes décalées en fréquence environ de la valeur de la fréquence acoustique f_a imprimée par le transducteur piézo-électrique 2 à la zone 5 de l'objet à imager 1. D'autres types de dispositifs que celui décrit par la suite peuvent également être utilisés à cette fin.

On dispose d'un laser 6, qui est par exemple un laser YAG monofréquence de longueur d'onde $1,06 \mu\text{m}$ et de puissance 100 mW. Le laser 6 émet une onde optique initiale INI présentant dans l'exemple considéré, une polarisation verticale. L'onde initiale INI est séparée en un premier faisceau F1 et un deuxième faisceau F2 par un prisme séparateur 7, par exemple un prisme séparateur 50 % par lequel la puissance disponible sur chaque faisceau F1, F2 est d'environ 50 mW.

On utilise en outre un premier modulateur acousto-optique 8a et un deuxième modulateur acousto-optique 8b recevant respectivement en entrée les faisceaux F1 et F2. Ces modulateurs acousto-optique 8a et 8b sont par exemple des modulateurs de la Société Cristal Technology constitués d'une cellule acousto-optique de Dioxyde de Tellure (TeO_2) animée par une horloge radio fréquence sinusoïdale de fréquence df , transmettant, à partir de l'onde qui lui est appliquée, à la fois un faisceau non diffracté et un faisceau diffracté décalé en fréquence de la valeur df par rapport à l'onde qui lui est appliquée. A titre d'exemple, le premier modulateur acousto-optique 8a est animé par une horloge de fréquence $df = 73 \text{ MHz}$ et délivre en sortie une onde que nous appellerons par la suite l'onde incidente INC décalée en fréquence de 73 MHz par rapport à l'onde initiale INI. Le deuxième modulateur acousto-optique 8b est de conception similaire et est animé à une fréquence de 75 MHz et délivre en sortie d'onde que nous appellerons par la suite onde pompe PMP décalée en fréquence de 75 MHz par rapport à l'onde initiale INI. En utilisant des modulateurs acousto-optique 8a, 8b d'efficacité environ 50 %, on

dispose ainsi d'une puissance environ 25 mW pour chacune des ondes incidentes INC et pompe PMP dans l'exemple considéré.

On génère ainsi deux ondes lumineuses cohérentes
5 entre elles décalées en fréquence d'une valeur environ égale à la fréquence acoustique appliquée par le transducteur piézo-électrique 2 à l'objet à imager 1.

Selon une première variante du dispositif de
10 génération d'ondes lumineuses GEN, représentée sur la figure 5a, l'onde incidente INC ne passe par aucun modulateur acousto-optique, tandis que l'onde pompe est décalée en fréquence, par rapport à l'onde incidente, d'une première fréquence $df_1 = -73$ Mhz par le premier modulateur
15 acousto-optique 8a, puis décalée d'une deuxième fréquence $df_2 = +75$ Mhz par le deuxième acousto-optique 8b, de sorte que $df_1 + df_2 \approx f_a$.

Selon une deuxième variante du dispositif de
génération d'ondes lumineuses GEN, représentée sur la figure 5b, l'onde incidente INC est décalée en fréquence,
20 par rapport à l'onde initiale, d'une première fréquence $df_1 = +73$ Mhz par le premier modulateur acousto-optique 8a, puis d'une deuxième fréquence $df_2 = -75$ Mhz par le deuxième modulateur acoustique 8b, et l'onde pompe PMP n'est pas décalée en fréquence par rapport à l'onde
25 initiale INI, de sorte que $f_{INI} + df_1 + df_2 + f_a \approx f_{PMP}$, où f_{INI} est la fréquence de l'onde initiale et f_{PMP} la fréquence de l'onde pompe.

Ainsi, selon les variantes des figures 1, 5a et 5b de réalisation d'un dispositif de génération GEN, un
30 premier dispositif de décalage, interposé entre le laser 6 et l'objet à imager 1, comprend un, zéro ou deux modulateurs acousto-optiques, et un deuxième dispositif de décalage, interposé entre le laser 6 et le matériau holographique 9, comprend, respectivement, un, deux, ou
35 zéro modulateurs acousto-optiques. Ainsi, un « dispositif

de décalage », au sens de la présente description peut, le cas échéant, ne comporter aucun élément.

La suite de la description est donnée pour l'exemple de réalisation du dispositif de génération de la
5 figure 1.

L'onde incidente INC issue du premier modulateur acousto-optique 8a est appliquée sur l'objet à imager 1 en un point quelconque, pas nécessairement lié à la position dans l'objet à imager 1 de la zone 5. La lumière est
10 diffusée par l'objet 1 et génère une onde signal SIG s'étendant dans un large angle solide à l'arrière de l'objet imagé 1 par rapport à la direction d'application de l'onde incidente INC. Certains photons de l'onde incidente sont diffusés par l'objet à imager 1 sans traverser la zone
15 vibrante alors que d'autres photons traversant la zone vibrante sont soumis à l'effet acousto-optique. Par conséquent, l'onde signal SIG comporte principalement deux composantes : d'une part, la composante « porteuse », à la fréquence f_i de l'onde incidente INC, qui correspond aux
20 photons ne traversant pas la zone vibrante, et d'autre part, une composante acousto-optique de fréquence $f_{AO} = f_i \pm f_a$ correspondant aux photons traversant la zone 5 de l'objet à imager 1. C'est cette composante acousto-optique qui porte l'information relative à la zone 5 de
25 l'objet à imager 1 que l'on cherche à mesurer.

A cet effet, on dispose, selon l'invention, d'un matériau holographique dynamique 9 tel qu'un cristal photo réfractif par exemple en arsenure de gallium (AsGa) de dimensions 1 cm x 1 cm x 1 cm. De tels cristaux photo
30 réfractifs, par exemple décrits dans le brevet US 5,131,748, sont des matériaux holographiques dans lesquels l'interférence d'une onde signal et d'une onde pompe forme un réseau d'indice de réfraction. Ce réseau d'indice de réfraction peut présenter une composante
35 statique en fonction des caractéristiques des ondes pompe

et signal, et un tel réseau statique d'indice de réfraction diffracte l'onde pompe appliquée au cristal photo réfractif pour former une onde diffractée DIF. En tant que cristal photo réfractif 9, on pourrait également utiliser un
5 matériau du type sillénite tel que du BSO, BGO ou BTO, un phosphore d'indium (InP) dopé au fer, un tellurure de cadmium (CdTe) dopé au vanadium, un cristal d'hypothio diphosphate d'étain (SPS), ou tout autre matériau adapté.

A la place du cristal photo réfractif, on pourrait
10 également utiliser à titre de matériau holographique dynamique, un milieu laser inversé tel que YAG ou titane-saphir. Dans un tel matériau, soumis au pompage par un laser adapté, se produit une inversion de population permettant d'y graver un réseau d'indice complexe sous
15 forme d'un réseau de gain. Ces matériaux sont en particulier intéressants car sensibles à des longueurs d'onde comprises entre 770 nm et 1 μ m, qui sont des longueurs d'onde utiles en biologie.

Dans l'exemple présenté, l'onde signal SIG est
20 appliquée à une première face 9a du cristal photo réfractif 9. Par exemple, à l'aide d'un premier dispositif optique formé de deux lentilles 10, 11, de grande ouverture, on forme sur la face 9a du cristal photo réfractif 9 une image de la face « arrière » 1a de l'objet à imager 1. On place
25 les lentilles 10 et 11 de manière à récupérer la plus grande partie possible de l'onde SIG, diffusée dans un large angle solide, sur la face 9a du cristal photo réfractif.

L'onde pompe PMP générée par le dispositif
30 générateur GEN (par exemple, l'onde issue du deuxième modulateur acousto-optique 8b) est appliquée au cristal photo réfractif 9, par exemple, sur une face 9b du cristal orthogonale à la face 9a à l'aide d'un deuxième dispositif optique tel qu'une lame réfléchissante 16.

35 L'interférence entre l'onde signal SIG et l'onde

pompe PMP produit un interférogamme en volume à l'intérieur du cristal photo réfractif 9. Cet interférogamme comporte, d'une part, une composante liée à la composante porteuse de l'onde signal et, d'autre part, une composante liée à la composante acousto-optique de l'onde signal. Pour un décalage en fréquence entre l'onde incidente INC et l'onde pompe PMP égal à la fréquence f_a de l'onde acoustique, la composante de l'interférogamme associée à la composante acousto-optique de l'onde signal SIG (de fréquence $f_i \pm f_a$) est statique puisque la fréquence de l'onde pompe PMP est égale à la fréquence de cette composante acousto-optique de l'onde signal. Par contre, la composante de l'interférogamme formé entre l'onde incidente et l'onde pompe donne une modulation temporelle à la fréquence acoustique. Cette variation est trop rapide pour que soit inscrit un réseau d'indice dans le milieu holographique dynamique. Ainsi, par effet photo réfractif, l'interférogamme statique associé à la composante acousto-optique crée, dans le cristal, un réseau d'indice qui reproduit la figure de speckle associé à ladite composante acousto-optique qui est générée par la vibration de l'échantillon à la fréquence acoustique f_a , principalement dans la zone 5, et qui caractérise donc les propriétés optiques de l'échantillon dans cette zone.

Simultanément ou ultérieurement, l'onde pompe appliquée au cristal photo réfractif 9 est diffractée par le réseau d'indice formé dans le cristal, dans la même direction que l'onde signal SIG. Comme le réseau d'indice enregistre la structure spatiale de la composante acousto-optique de l'onde signal SIG, l'onde diffractée DIF par le cristal a la même structure spatiale que celle-ci. L'interférence entre l'onde signal SIG et l'onde diffractée DIF reste donc cohérente spatialement avec elle-même sur toute la surface du cristal 9. Il est ainsi possible d'observer cette interférence avec un détecteur mono pixel

15

12, telle qu'une photo diode en silicium. On peut utiliser un troisième dispositif optique formé des lentilles 13, 14 de grande ouverture pour former une image de la face 9c sur une photo diode 12 distante. Si la photo diode est beaucoup
5 plus petite que la superficie de la face 9c du cristal 9, on peut utiliser une lentille 15 concentrant la lumière sur la photo diode 12.

En appliquant l'onde signal et l'onde pompe sur deux faces orthogonales du matériau holographique
10 dynamique, on limite l'influence, au niveau du signal détecté, des imperfections de montage de l'installation et du cristal, qui ne sont pas diffusées vers le détecteur, mais dans la direction de l'onde pompe.

On peut également choisir d'augmenter la vitesse
15 d'établissement de l'effet photo réfractif dans le cristal en diminuant l'angle entre l'onde signal et l'onde pompe, tout en gardant un angle non nul. On peut ainsi appliquer les deux ondes sur la même face de cristal. Néanmoins, l'influence des imperfections du montage et du cristal sera
20 plus sensible au niveau du détecteur. On pourra également choisir un angle intermédiaire permettant un bon compromis entre ces deux options.

L'intensité lumineuse ainsi détectée au niveau de la photo diode 12 permet d'obtenir une information
25 concernant la zone 5 de l'objet à imager 1, et en déplaçant la focale du transducteur piézo-électrique 2, ou le transducteur lui-même à la surface de l'objet 1, on peut former une image mono, bi, ou tridimensionnelle de l'objet. Cette image peut en outre être couplée à une image par
30 ultrasons (échographie) formée simultanément de l'objet 1, car le transducteur piézo-électrique 2 utilisé peut tout à fait être du type de ceux utilisés pour générer une telle image ultrasonore.

Dans le cadre de l'invention, il est encore
35 possible d'améliorer la qualité de détection au niveau du

détecteur 12, comme décrit par la suite.

L'utilisation d'un cristal photo réfractif 9 permet d'éliminer le bruit dû à la composante non marquée de l'onde signal parce que l'effet photo réfractif qui a lieu dans le cristal est sélectif, et ne se produit que pour la composante acousto-optique de l'onde signal SIG. En effet, l'onde pompe PMP est à la même fréquence que la composante acousto-optique. Dans ces conditions, seule l'interférence entre l'onde pompe PMP et la composante acousto-optique de l'onde signal SIG reste stable au cours du temps, et se trouve donc susceptible de générer un réseau d'indice dans le cristal 9. Ce signal d'interférence statique est difficile à distinguer du fond continu parasite dû par exemple au courant d'obscurité de la photo diode, aux impuretés du cristal photo réfractif, ou autre. Pour rendre l'interférence visible par rapport à ce fond continu parasite, il est préférable d'avoir un interférogramme variant dans le temps qui conduise à une modulation temporelle du signal obtenu sur la photo diode 12. A cet effet, on peut moduler en amplitude ou en phase l'une des ondes qui sont impliquées dans la génération de l'interférogramme.

Par exemple, on peut moduler en phase l'onde incidente INC sur l'objet à imager 1, l'onde pompe PMP générée sur la face 9b du cristal photo réfractif 9, ou l'onde acoustique générée par le transducteur piézo-électrique 2. Ces trois options sont possibles, et on décrit par la suite, à titre d'exemple, la modulation en phase de l'onde acoustique.

Pour obtenir une modulation temporelle du signal sur la photo diode, la modulation de l'onde acoustique doit obéir aux trois conditions suivantes :

- la modulation doit être plus rapide que le temps nécessaire à graver le réseau d'indice dans le cristal photo réfractif 9 (afin que le réseau d'indices, qui

effectue une moyenne, ne soit pas affecté par la modulation),

- la modulation doit être de bonne amplitude (ce qui permet une bonne sensibilité de détection), et

5 - l'onde modulée ne doit pas présenter, pendant le temps nécessaire à graver le réseau d'indice, une valeur moyenne nulle (afin que le réseau d'indices, qui dépend de la valeur moyenne de l'onde signal SIG, puisse exister).

De nombreuses modulations sont susceptibles de
10 remplir ces conditions. A titre d'exemple, on représente sur la figure 2 une modulation remplissant ces critères. La phase φ acoustique est modulée en créneaux rectangulaires de $\varphi = 0$ à $\varphi = \pi$. Le rapport cyclique des créneaux rectangulaires est pris différent de 1/2, et est par
15 exemple pris égal à un 1/8 pour une fréquence de créneaux de 302 Hz.

La composante acousto-optique de l'onde signal SIG est liée à l'onde acoustique appliquée par le transducteur 2. Par conséquent, la phase de la composante acousto-
20 optique de l'onde signal présente la même modulation de phase que l'onde acoustique. La composante acousto-optique de l'onde signal présente alors une valeur moyenne non nulle égale aux 6/8 de la valeur de la composante acousto-optique de l'onde signal lors d'un déphasage $\varphi = 0$. Le
25 réseau d'indices gravé dans le cristal photo réfractif 9 est non nul, et correspond à la valeur moyenne $\langle E_{AO} \rangle$ de la composante acousto-optique de l'onde signal SIG.

Dans l'exemple considéré, le cristal photo réfractif 9 présente des faces 9a, 9b, 9c orientées de
30 manière à ce que le cristal 9 présente une configuration dite de « transfert d'énergie ». Dans cette configuration, l'onde diffractée DIF a la même polarisation que la composante acousto-optique de l'onde signal. De plus, l'onde diffractée DIF est en phase avec $\langle E_{AO} \rangle$, c'est-à-dire
35 en phase avec E_{AO} ($\varphi = 0$).

La modulation de phase ϕ de l'onde acoustique se traduit par une modulation du signal $|E|^2$ vu par la photodiode 12, qui est illustrée sur les figures 3a et 3b.

Sur la figure 3a, lorsque la modulation de phase ϕ est égale à 0 (étape d'« écriture »), l'onde diffractée DIF est en phase avec la composante acousto-optique de l'onde signal. L'amplitude E dans le cristal 9 est maximale et correspond à la somme des amplitudes E_{dif} et E_{AO} respectivement de l'onde diffractée et de la composante acousto-optique de l'onde signal. Le signal vu par la photodiode, qui est proportionnel à l'intensité $I = |E|^2$ est également maximal.

Sur la figure 3b, lorsque la modulation de phase ϕ est égale à π (étape de « relecture »), l'onde diffractée DIF est en opposition de phase avec la composante acousto-optique de l'onde signal. L'amplitude totale E , correspondant maintenant à la soustraction de l'amplitude de la composante acousto-optique de l'onde signal E_{AO} et de l'amplitude de l'onde diffractée E_{dif} est minimale, ainsi que le signal vu par la photodiode.

La figure 4 présente un écran d'oscilloscope sur lequel le signal (C) représente la modulation de phase de l'onde acoustique appliquée à l'objet à imager, présentant un rapport cyclique de 1/8 et une fréquence de 305 Hz; le signal (A) représente le signal détecté pour un objet à imager qui est un morceau de blanc de poulet de 2 cm d'épaisseur, et le signal (B) représente le signal détecté moyenné, grossi 50 fois, pour un morceau de blanc de poulet de 4 cm d'épaisseur.

Pour d'autres configurations, comme par exemple dans le cas d'un milieu laser pompé, les rôles peuvent être inversés. On a alors opposition de phase pour $\phi=0$ et signaux en phase pour $\phi=\pi$.

L'information relative à la zone 5 de l'objet à imager 1 peut être extraite par détection synchrone du

signal détecté par la photo diode 12.

Le cristal photo réfractif 9 n'est pas nécessairement utilisé en configuration de « transfert d'énergie ». Il pourrait également être utilisé en configuration de « configuration anisotrope », en utilisant un cristal présentant des orientations différentes des faces 9a, 9b. La composante acousto-optique de l'onde signal et l'onde diffractée par le réseau d'indices sont alors de polarisations orthogonales. Pour faire interférer des deux ondes, on peut par exemple utiliser une lame quart d'onde et un cube polariseur, de manière connue. Un exemple de modulation de phase utilisable dans cette configuration est d'utiliser une modulation de phase en créneaux de 0 à $\pi/2$ avec un rapport cyclique de 50 %. On peut ainsi obtenir une détection linéaire.

L'installation ici décrite permet d'obtenir des images de bonne qualité, en particulier parce qu'elle permet de réaliser la détection sur une grande étendue optique avec une photo diode, ce qui n'était pas réalisé par les dispositifs de l'art antérieur.

La sélectivité en fréquence de l'effet photo réfractif est caractérisée par le temps T_p nécessaire pour graver le réseau d'indice, et par l'écart de fréquence $f_a = 2$ MHz entre la composante porteuse de l'onde signal et l'onde pompe PMP. Les photons associés à la composante de l'onde signal ne créent pas de réseau d'indice lorsque $T_p \times f_a \gg 1$.

Cette condition de sélectivité est très largement réalisée. Dans l'exemple ci décrit, on a par exemple $T_p = 1$ à 10 ms, ce qui correspond à $T_p \times f_a = 10^3$ à 10^4 .

Une telle installation permet d'augmenter la vitesse de mesure par rapport aux installations connues de l'art antérieur. Pour augmenter la vitesse de mesure, on est amené à diminuer le temps de mesure, et donc le temps de gravage T_p . Ce temps de gravage peut être facilement

réduit en augmentant la puissance de l'onde pompe PMP par rapport à l'exemple proposé. Par exemple, en augmentant la puissance de l'onde initiale INI, on augmente à la fois la puissance de l'onde incidente INC et la puissance de l'onde pompe PMP. D'une part, une augmentation de la puissance de l'onde pompe PMP réduit le temps de gravage. D'autre part, une augmentation de la puissance de l'onde incidente INC augmente le signal. Par rapport à l'exemple proposé, on peut notablement augmenter la puissance de l'onde initiale, et donc la puissance de l'onde incidente, tout en restant dans les limites de sécurité imposées pour le traitement de tissus humains, la puissance de l'onde pompe ne pose pas de problèmes de sécurité, puisque l'onde pompe ne passe pas par l'échantillon.

Par rapport à l'exemple présenté, on pourra, lors de variantes de réalisation, mettre en œuvre l'une et/ou l'autre des dispositions suivantes :

- utiliser un laser plus puissant,
- utiliser des lentilles 10, 11, 13, 14 de plus grande ouverture permettant de conserver la même ouverture angulaire avec une surface de diode plus grande,
- utiliser une photo diode 12 de bruit inférieur, telle qu'une photo diode refroidie par effet Peltier,
- utiliser une photo diode de plus grande surface.

Toutes ces dispositions permettraient d'augmenter le rapport signal/bruit de la détection.

REVENDICATIONS

1. Procédé d'imagerie acousto-optique d'un objet comprenant les étapes au cours desquelles :

5 (a) on génère la vibration d'une zone (5) de l'objet (1) en appliquant à l'objet une onde acoustique présentant une certaine fréquence acoustique,

(b) on applique audit objet une onde lumineuse incidente (INC) et on génère une onde lumineuse signal
10 (SIG) comportant au moins une composante acousto-optique décalée en fréquence par ladite onde acoustique,

(c) on génère une onde pompe (PMP) lumineuse, cohérente avec ladite onde incidente (INC) à une fréquence similaire à la fréquence de ladite composante acousto-
15 optique,

(d) on grave un réseau d'indice complexe dans un matériau holographique dynamique (9) en appliquant audit matériau ladite onde signal et ladite onde pompe, et

(e) on obtient un paramètre numérique relatif à
20 l'intensité lumineuse en cette zone à partir dudit réseau d'indice complexe.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel, au cours de l'étape (e),

(e1) on génère une onde diffractée par application
25 de ladite onde pompe (PMP) sur ledit réseau d'indice complexe, et

(e2) on détecte l'interférence entre ladite onde diffractée et ladite onde signal à l'aide d'un photo détecteur (12).

30 3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel on applique une modulation de phase, à une onde choisie parmi l'onde acoustique, l'onde pompe (PMP), et l'onde incidente (INC).

4. Procédé selon la revendication 3, dans lequel
35 ladite modulation de phase est appliquée à l'onde

acoustique.

5. Procédé selon la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel on applique une modulation d'amplitude à une onde choisie parmi l'onde acoustique, l'onde pompe (PMP) et l'onde incidente (INC).

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel ladite modulation d'amplitude est appliquée à l'onde acoustique.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel, on génère l'onde incidente et l'onde pompe en

- générant une onde lumineuse initiale (INI) à l'aide d'un laser,
- séparant ladite onde initiale en un premier faisceau (F1) et un deuxième faisceau (F2),
- décalant la fréquence dudit premier faisceau d'un premier décalage en fréquence pour générer l'onde incidente (INC),
- décalant la fréquence dudit deuxième faisceau d'un deuxième décalage en fréquence pour générer l'onde pompe (PMP),

ledit deuxième décalage en fréquence étant sensiblement égal à la somme du premier décalage en fréquence et de la fréquence acoustique.

8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel l'un desdits premier et deuxième décalages en fréquence est nul.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel, au cours de l'étape (d), on applique ladite onde signal sur une première face (9a) dudit matériau holographique dynamique et ladite onde pompe sur une deuxième face (9b) dudit matériau, distincte de la première face.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel, au cours de l'étape (d),

on applique ladite onde signal et ladite onde pompe sur une même face du matériau holographique dynamique.

11. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ledit matériau holographique dynamique est un cristal photo réfractif adapté pour
5 fonctionner en mode « transfert d'énergie ».

12. Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, dans lequel ledit matériau holographique dynamique est un cristal photo réfractif adapté pour fonctionner en mode
10 « diffraction anisotrope ».

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, au cours duquel on obtient en outre une information numérique relative à une deuxième zone de l'objet en appliquant les étapes suivantes :

15 (a') on génère la vibration de ladite deuxième zone en appliquant à l'objet au niveau de ladite deuxième zone une onde acoustique à une fréquence acoustique, et on répète les étapes (b) à (e) pour ladite deuxième zone.

20 14. Installation d'imagerie acousto-optique d'un objet comprenant

(A) un transducteur (2) adapté pour générer la vibration d'une zone (5) de l'objet (1) en appliquant à l'objet une onde acoustique présentant une fréquence
25 acoustique,

(B) un dispositif de génération d'ondes lumineuses adapté pour appliquer audit objet une onde lumineuse incidente (INC) et, générant ainsi une onde lumineuse signal (SIG) comportant au moins une composante acousto-optique décalée en fréquence par ladite onde acoustique, et
30 adapté en outre pour générer une onde pompe (PMP) lumineuse, cohérente avec ladite onde incidente à une fréquence similaire à la fréquence de ladite composante acousto-optique,

35 (C) un matériau holographique dynamique (9) adapté

pour qu'y soit gravé un réseau d'indice complexe par application audit matériau de ladite onde signal et de ladite onde pompe, et

(D) un dispositif de détection adapté pour obtenir
5 un paramètre numérique relatif à l'intensité lumineuse en cette zone à partir dudit réseau d'indice complexe.

15. Installation selon la revendication 14, dans laquelle ledit dispositif de détection (E) comprend un détecteur (12) adapté pour détecter l'interférence entre
10 une onde diffractée générée par ladite onde pompe traversant ledit réseau d'indice complexe, et ladite onde signal.

16. Installation selon la revendication 15, dans laquelle ledit détecteur est une photo diode monopixel.

15 17. Installation selon la revendication 15 ou la revendication 16, comprenant

un premier dispositif optique (10, 11) adapté pour appliquer l'onde signal sur une première face du matériau holographique dynamique,

20 un deuxième dispositif optique (16) adapté pour appliquer l'onde pompe sur une deuxième face du matériau photo réfractif, et

un troisième dispositif optique (13, 14, 15) adapté pour former sur ledit détecteur (12) une image d'une
25 troisième face (9c) du matériau holographique dynamique opposée à ladite première face.

18. Installation selon la revendication 17, dans laquelle lesdites première et deuxième faces (9a) de matériau holographique dynamique sont confondues.

30 19. Installation selon la revendication 17, dans laquelle ladite deuxième face (9b) de matériau holographique dynamique est orthogonale à ladite première face (9a).

20. Installation selon l'une quelconque des
35 revendications 14 à 19, dans laquelle le dispositif de

génération comprend

un laser (6) adapté pour émettre une onde lumineuse initiale,

un dispositif de séparation (7) adapté pour générer
5 à partir de ladite onde initiale un premier faisceau et un deuxième faisceau,

un premier dispositif de décalage adapté pour décaler en fréquence ledit premier faisceau pour générer ladite onde incidente, et

10 un deuxième dispositif de décalage adapté pour décaler en fréquence ledit deuxième faisceau pour générer ladite onde pompe,

lesdits premier et deuxième dispositifs de décalage étant adaptés pour que ladite onde pompe présente une
15 fréquence sensiblement égale à la somme de la fréquence de l'onde incidente et de la fréquence de l'onde acoustique.

21. Installation selon la revendication 20, dans lequel ledit premier dispositif de décalage comprend un, zéro, ou deux modulateurs acousto-optiques, et dans lequel
20 ledit deuxième dispositif de décalage comprend, respectivement, un, deux, ou zéro modulateurs acousto-optiques.

22. Installation selon l'une quelconque des revendications 14 à 21, dans laquelle ledit matériau
25 holographique dynamique est un cristal photo réfractif.

23. Installation selon l'une quelconque des revendications 14 à 21, dans laquelle ledit matériau holographique dynamique est un matériau à inversion de population apte à être gravé par un réseau d'indice
30 complexe sous forme d'un réseau de gain, ladite installation comprenant en outre une source d'énergie adaptée pour maintenir ladite inversion de population dans ledit matériau.

24. Installation selon l'une quelconque des revendications 14 à 23 comprenant en outre un dispositif de
35

26

commande adapté pour faire déplacer ledit transducteur (2)
et/ou changer la focale dudit transducteur.

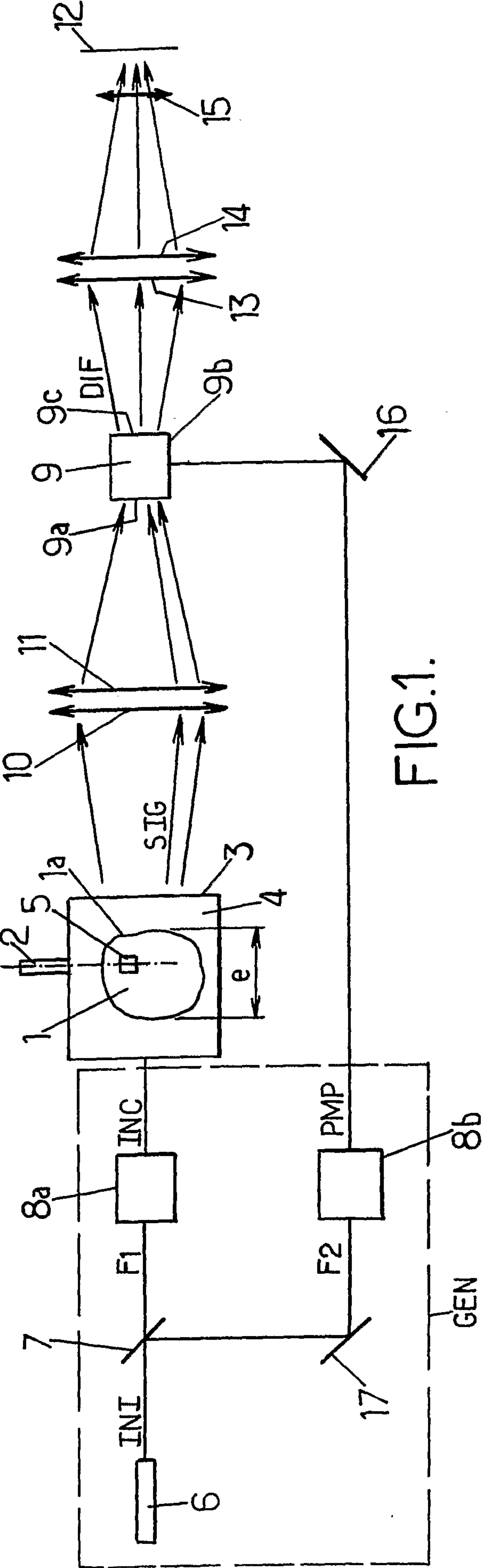


FIG.1.

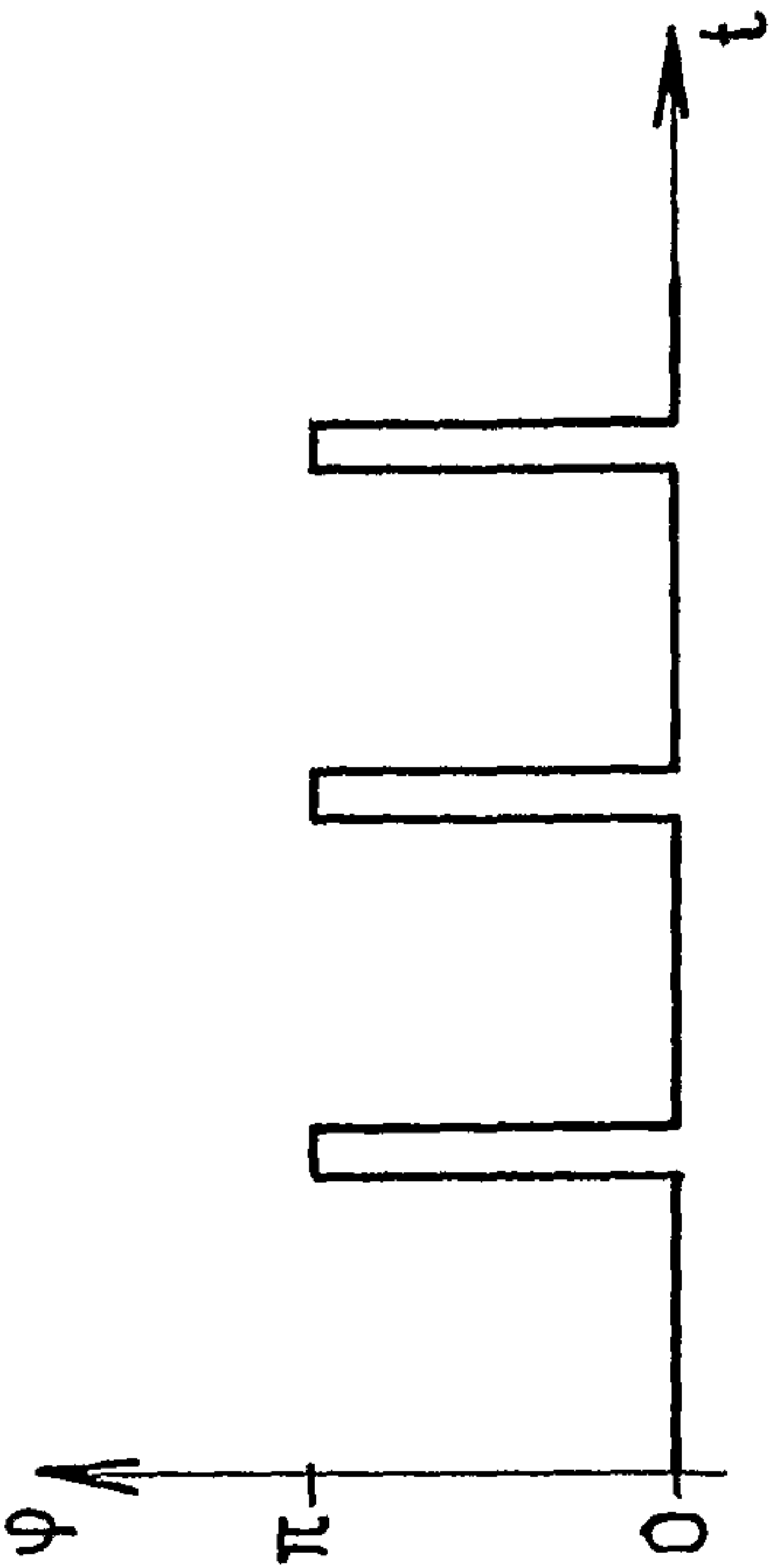


FIG.2.

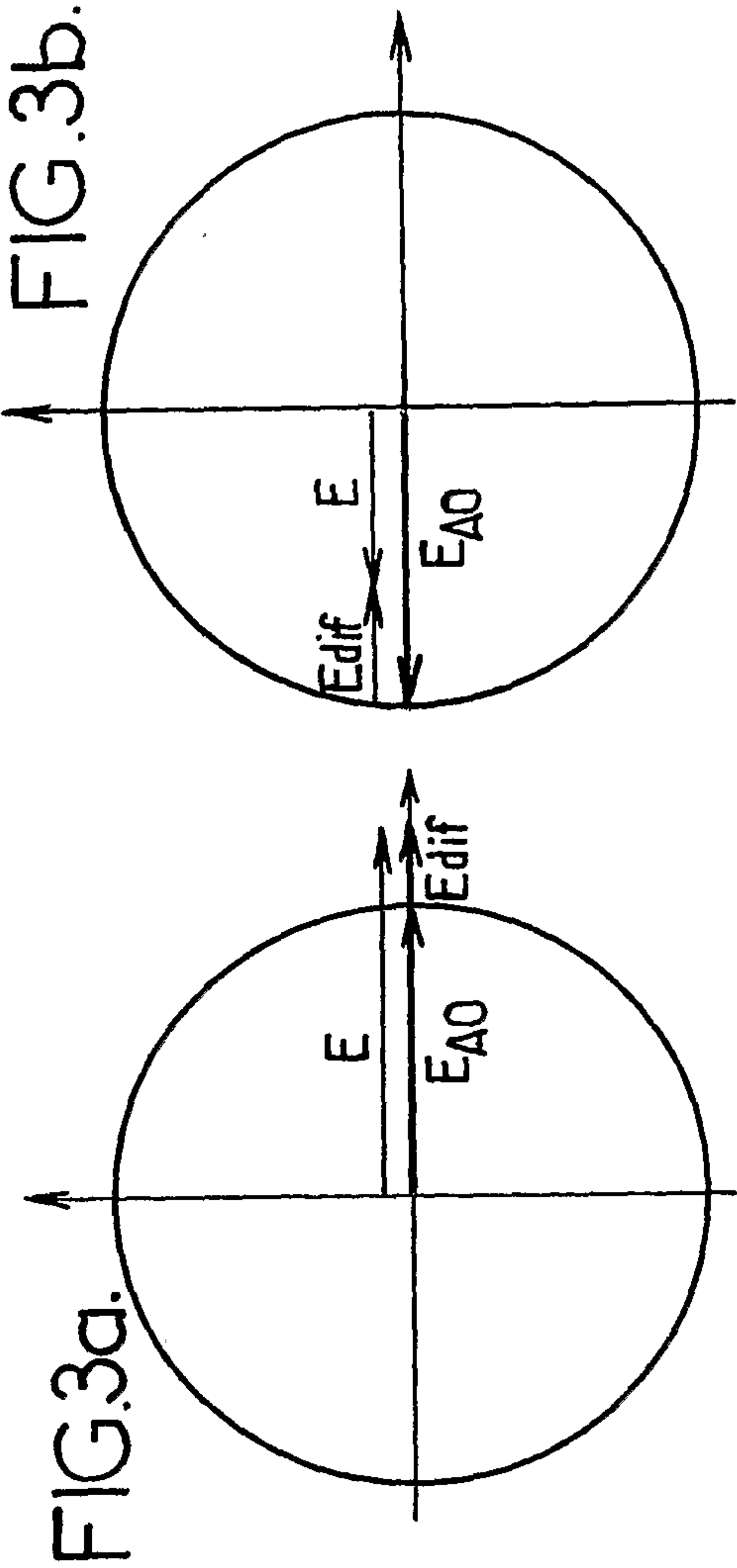


FIG.3a.

FIG.3b.

2/2

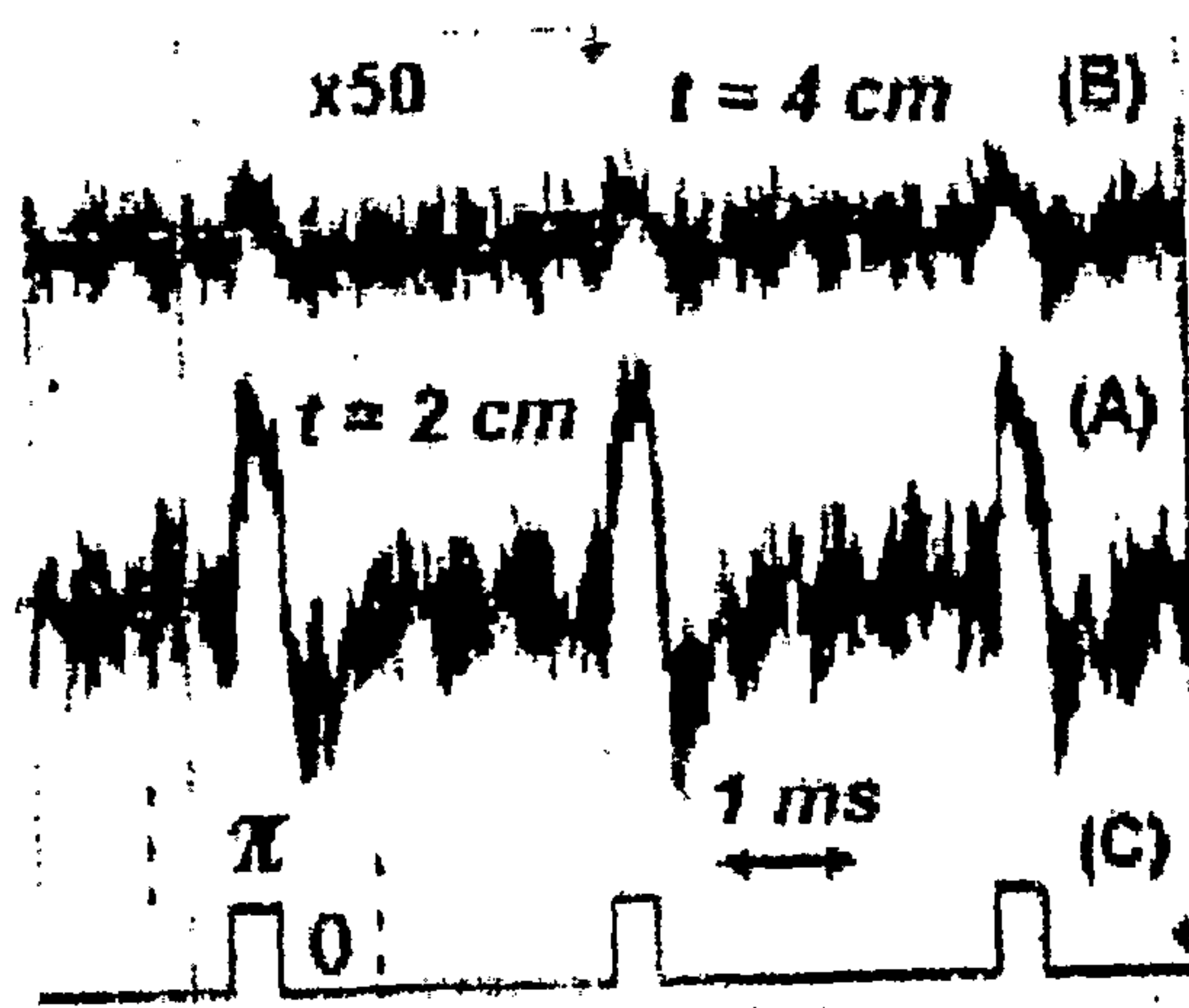


FIG.4.

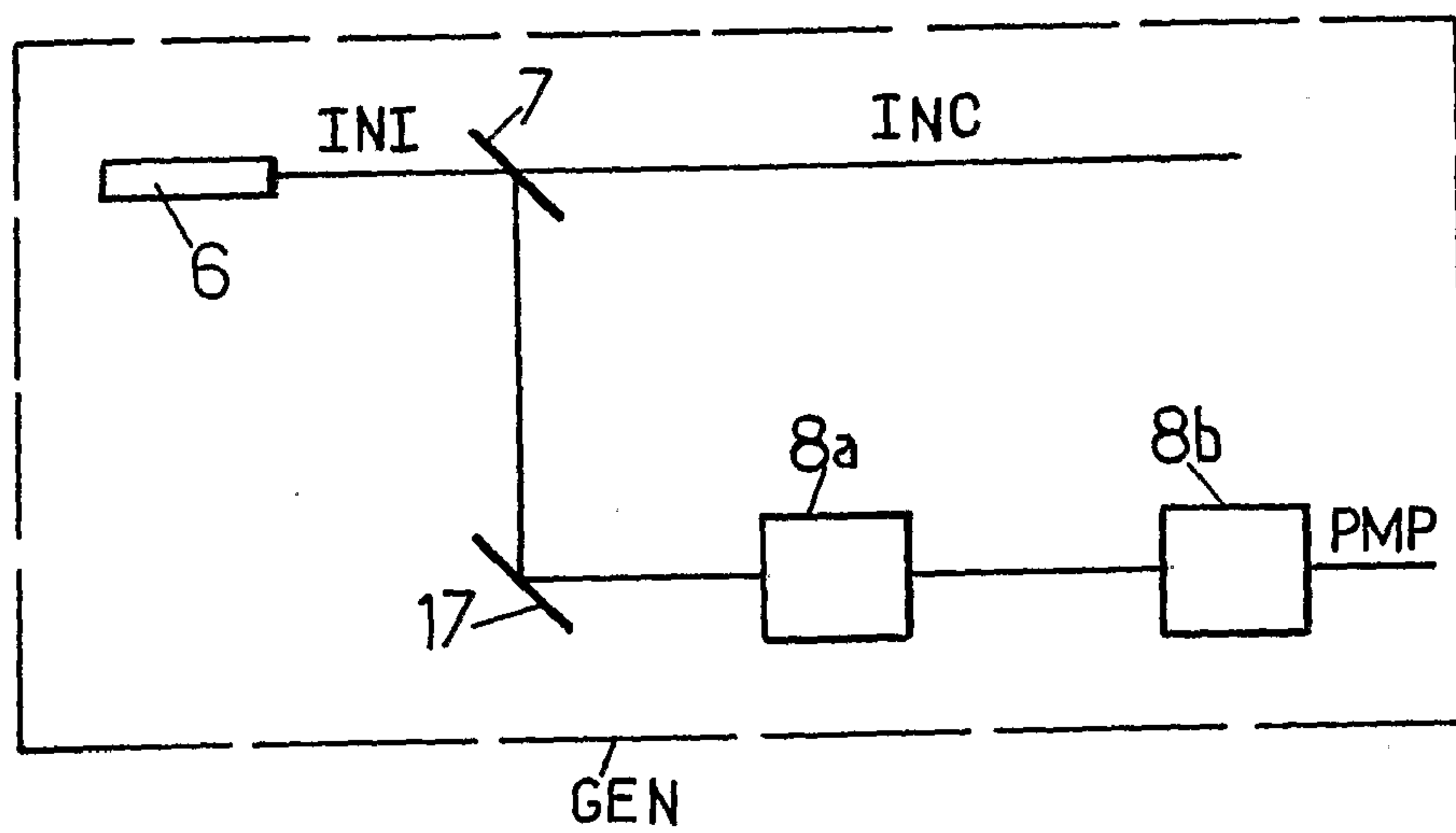


FIG.5a.

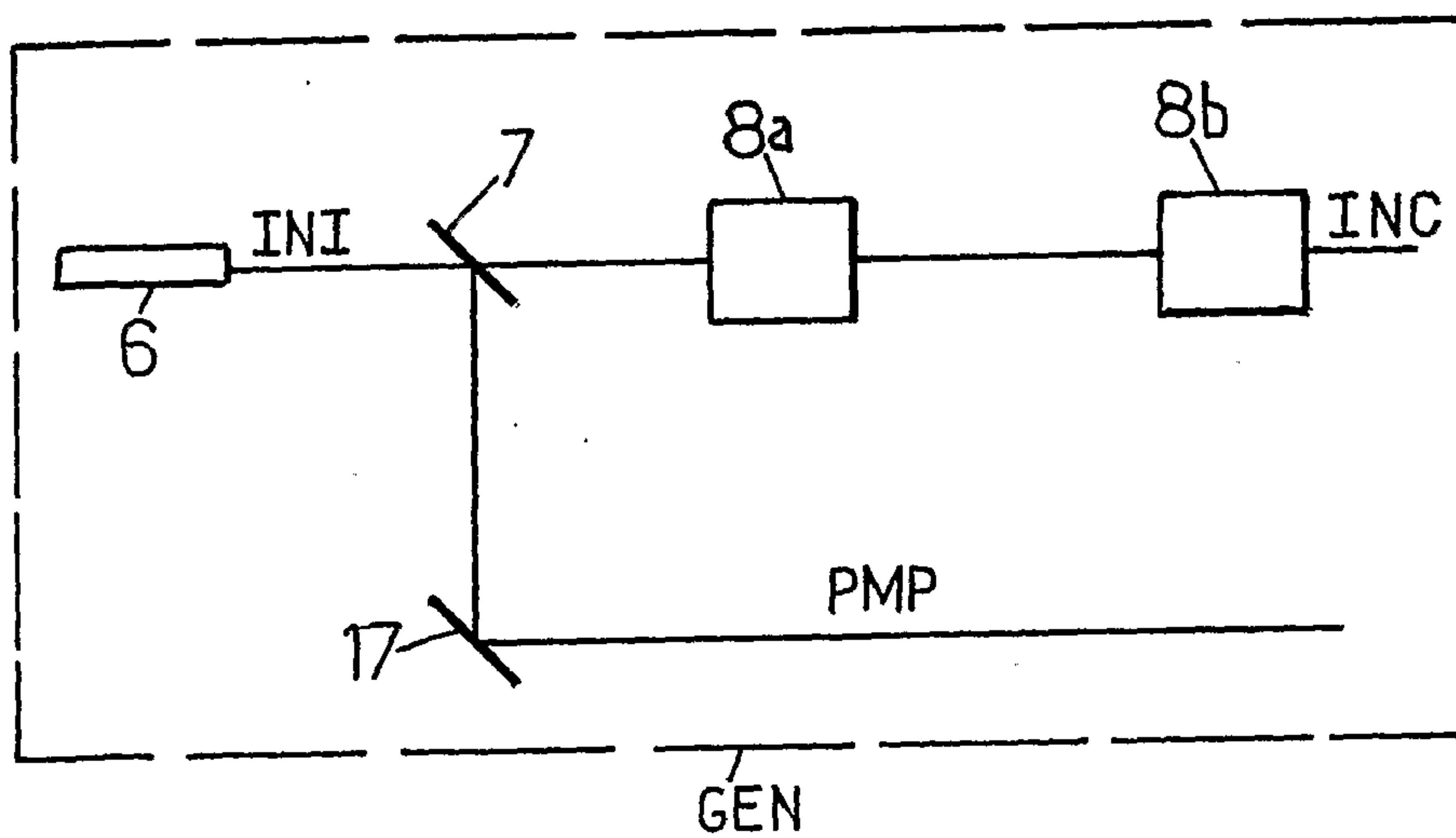


FIG.5b.

