

12)

**DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

**A1**

22) Date de dépôt : 23.12.04.

30) Priorité :

43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 30.06.06 Bulletin 06/26.

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

60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71) Demandeur(s) : *THALES Société anonyme* — FR.

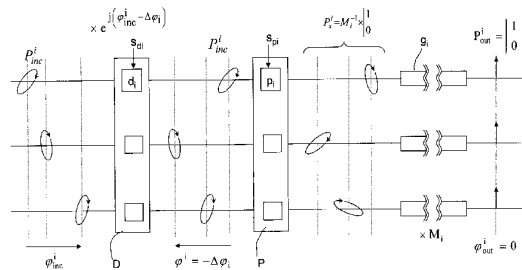
72) Inventeur(s) : BOURDERIONNET JEROME, BRIGNON ARNAUD, DOLFI DANIEL et DEMOUSTIER SEBASTIEN.

73) Titulaire(s) :

74) Mandataire(s) : MARKS & CLERK FRANCE.

54) **SOURCE LASER A RECOMBINAISON COHERENTE DE FAISCEAUX.**

57) Une source laser comprend N faisceaux lasers incidents, N au moins égal à deux, N milieux de propagation monomode spatiale d'un faisceau, formant chacun une voie ( $g_i$ ) de propagation d'un faisceau laser, un système de recombinaison cohérente en sortie des N voies, pour fournir un faisceau laser recombinaison ( $f_R$ ) en sortie, et un dispositif de contrôle de phase (D) comprenant N éléments déphaseurs programmables ( $d_i$ ) asservis en boucle fermée, un en entrée de chaque voie ( $g_i$ ). La source comprend en outre un dispositif de contrôle de polarisation (P) comprenant N contrôleurs de polarisation programmables ( $p_i$ ) asservis en boucle fermée, un par voie, chaque contrôleur étant disposé entre l'élément déphaseur et la voie associés.



**FR 2 880 204 - A1**



## SOURCE LASER A RECOMBINAISON COHERENTE DE FAISCEAUX

La présente invention concerne une source laser à recombinaison cohérente de faisceaux lasers.

La recombinaison cohérente de N faisceaux lasers élémentaires consiste à sommer N faisceaux cohérents (ou  $N \times Q$ , dans une organisation en  
5 deux dimensions) qui ont chacun été propagé à travers un milieu de propagation monomode spatiale.

Cette recombinaison cohérente permet de répondre à des applications qui nécessitent un faisceau laser de grande luminance, mais aussi de grande cohérence, et de grande qualité optique (limité par  
10 diffraction). En particulier, on réalise ainsi des sources lasers de puissance fibrées.

L'invention concerne les sources lasers utilisant des milieux de propagation monomode spatiale, par exemple des fibres monomodes. La qualité optique de faisceau est conservée lors de la recombinaison.

15 Le domaine d'application de telles sources lasers est vaste. On peut citer la télémétrie, la désignation, l'imagerie active, le pointage, les communications en espace libre, notamment les communications spatiales, avec possibilité de déflexion du faisceau laser ou de correction des perturbations atmosphériques.

20 Une source laser à recombinaison de faisceaux comprend de manière connue plusieurs milieux de propagation monomode spatiale disposés en parallèle. Dans le cas d'une source laser de puissance, les milieux de propagation sont des milieux à gains. De cette façon, l'amplification nécessaire à la fourniture d'un faisceau de grande puissance,  
25 est répartie sur N milieux à gain, ce qui permet de dépasser les limites de non-linéarité et de tenue au flux d'un unique milieu à gain.

La recombinaison cohérente des faisceaux amplifiés en sortie des milieux à gain, permet d'obtenir un faisceau dont la luminance est augmentée dans le rapport du carré du nombre de faisceaux amplifiés, par  
30 rapport à la luminance d'un seul faisceau amplifié. En outre, le faisceau obtenu conserve comme propriété (qualité optique), d'être limité par diffraction.

La recombinaison cohérente de faisceaux en sortie de N amplificateurs fibrés, ou plus généralement en sortie de N milieux de propagation, impose des conditions de mise en phase et de polarisation sur les N faisceaux en sortie. Les conditions de mise en phase sont déterminées  
5 pour permettre une interférence constructive des N faisceaux, pour obtenir une luminance maximum en sortie, ou une déflexion du lobe principal du faisceau en sortie (antenne à balayage de phase optique), ou une correction de différentes perturbations : effets de vibration, de température, de contraintes mécaniques ou autres.

10 La recombinaison cohérente de faisceaux supposant l'ajustement de la phase, pour chaque faisceau, un dispositif de correction de phase est prévu sur chaque voie.

En pratique, et comme rappelé dans le brevet US 6400871, on utilise des techniques de correction de phase adaptative, via des dispositifs  
15 de correction tels que des éléments électro-optiques (LiNbO<sub>3</sub> ou des modulateurs spatiaux de lumière à cristaux liquides), ou piézo-électriques (fibre enroulée autour d'un élément piézo-électrique). On peut aussi utiliser des modulateurs accousto-optiques, comme décrit par exemple, dans la publication "*Coherent beam combining and phase noise measurements of*  
20 *ytterbium fiber amplifiers*", de MM. Augst, Fan and Sanchez, Optics Letters, Vol.29, N°5, 1er mars 2004. Une source laser à fibres est notamment décrite qui comprend deux fibres amplificatrices, qui sont des fibres dopées Yb (Ytterbium). La source laser comprend un modulateur accousto-optique (cellule de Bragg) pour chaque voie amplificatrice. Le modulateur permet de  
25 contrôler la phase, afin de permettre la recombinaison cohérente des faisceaux en sortie des deux voies.

Ces différents composants actifs utilisés pour mettre en phase les différents faisceaux, pour assurer la combinaison cohérente, sont très sensibles à la polarisation, notamment lorsque les milieux de propagation  
30 sont des fibres. Dans ce cas, on utilise des fibres à maintien de polarisation.

L'utilisation de ces fibres à maintien de polarisation a cependant différents inconvénients. Elles sont coûteuses. Ces fibres sont en outre très sensibles à la torsion.

Il est important que la polarisation de chacun des faisceaux soit  
35 contrôlée en sortie de chacun des milieux, pour rendre plus efficace la

combinaison cohérente, c'est à dire pour rendre les interférences parfaitement constructives.

Un objet de l'invention est une source laser à recombinaison cohérente de faisceaux qui n'a pas les différents inconvénients précités.

5 Un objet de l'invention, est une source laser à recombinaison de faisceaux sans limitation de puissance.

Selon l'invention, une source laser à recombinaison cohérente de faisceaux comprend un élément de contrôle de phase et un élément de polarisation en entrée de chaque milieu de propagation, et une boucle  
10 d'asservissement desdits éléments en fonction des caractéristiques de sortie.

L'invention concerne donc une source laser comprenant N faisceaux lasers, N au moins égal à deux, N milieux de propagation monomode spatiale d'un faisceau, formant chacun une voie pour un faisceau laser, un système de recombinaison cohérente en sortie des N voies, pour  
15 fournir un faisceau laser de sortie, et un dispositif de contrôle de phase comprenant N éléments déphaseurs programmables asservis en boucle fermée, un en entrée de chaque voie, caractérisée en ce que la source comprend en outre un dispositif de contrôle de polarisation comprenant N contrôleurs de polarisation programmables asservis en boucle fermée, un  
20 par voie, chaque contrôleur étant disposé entre l'élément déphaseur et la voie associée.

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite à titre indicatif et  
25 non limitatif de l'invention et en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 est un schéma général d'une source laser de puissance selon l'invention;
- la figure 2 est un schéma général d'une source laser de puissance selon un autre mode réalisation de l'invention;
- 30 - la figure 3 représente de façon schématique l'effet d'un milieu non-dépolarisant sur l'état de polarisation d'un faisceau laser;
- la figure 4 représente de façon schématique les effets d'un déphaseur et d'un contrôleur de polarisation selon l'invention;

- les figures 5a à 5c représentent un élément de contrôle de polarisation qu peut être utilisé dans une source laser selon l'invention;
- 5 - les figures 6a à 6c représentent un élément de déphasage programmable qui peut être utilisé dans une source laser selon l'invention;
- les figures 7a et 7b représentent une variante de réalisation de l'élément de déphasage programmable des figures 6a à 6c;
- 10 - et les figures 8a et 8b illustrent un composant programmable de correction de phase et de contrôle de polarisation, qui peut être utilisé dans une source laser selon l'invention.

La figure 1 est un schéma général d'une source de laser, selon l'invention. Cette source comprend N voies g de propagation monomode spatiale, un système 1 de recombinaison cohérente, assurant une recombinaison cohérente des N faisceaux lasers  $I_a$  en sortie des N voies g, pour fournir un faisceau laser recombinaison  $I_R$  en sortie. Dans un exemple, le système de recombinaison cohérente comprend un dispositif 2 de remise en forme des faisceaux (par exemple, un réseau de microlentilles, dans un exemple de recombinaison cohérente des faisceaux en espace libre).

Chaque voie g reçoit un faisceau laser incident  $I_i$ . Dans le cas le plus général, les N faisceaux incidents  $I_i$  sont dans un état de polarisation quelconque, et présentent entre eux un déphasage quelconque.

Selon l'invention, la source laser comprend un déphaseur d et un contrôleur de polarisation p, disposés en cascade, en entrée de chaque voie g de propagation.

De préférence, les N déphaseurs d sont réalisés dans un même composant D sous une forme matricielle à 1 ou 2 dimensions.

De préférence, les N contrôleurs de polarisation p sont réalisés dans un même composant P sous une forme matricielle à 1 ou 2 dimensions.

Chacun des déphaseurs d et chacun des contrôleurs de polarisation p est asservi en boucle fermée, par un signal de contre-réaction qui traduit l'efficacité de la mise en phase et en polarisation des N faisceaux en sortie des voies g.

Dans le cas d'une source laser de puissance, les voies de propagation sont de préférence des fibres amplificatrices. Ces fibres ne sont pas nécessairement à maintien de la polarisation, ce qui réduit le coût de la source.

5 Le contrôle de phase et le contrôle de polarisation selon l'invention sont des fonctions séparables. Ceci permet d'envisager plusieurs mode de réalisation de l'asservissement en boucle fermée dans une source laser selon l'invention.

10 Selon un mode de réalisation représenté de façon schématique sur la figure 1, l'asservissement en phase et en polarisation est réalisée de façon commune. Un tel mode de réalisation peut avantageusement être mis en œuvre lorsque l'état de polarisation du faisceau recombinaison en sortie peut être quelconque. Dans ce cas, la condition de recombinaison optimale est atteinte lorsque tous les faisceaux sont dans le même état de polarisation en  
15 sortie. On peut alors mettre en œuvre un asservissement basé sur la détection de la condition de recombinaison optimale, typiquement, l'obtention d'une intensité optimum sur le lobe central du faisceau recombinaison. Dans ce cas, et comme illustré sur la figure 1, le dispositif 1 de sortie intègre un module 3 d'asservissement, qui peut par exemple comprendre un dispositif  
20 de mesure de l'intensité du lobe central du faisceau laser recombinaison FR, et des moyens de traitement numériques mettant en œuvre un algorithme d'asservissement en phase et en polarisation, paramétré pour obtenir une intensité maximale. Chaque élément déphaseur et contrôleur de polarisation reçoit un signal de contre-réaction propre qui découle de cet asservissement.

25 Selon un autre mode de réalisation représenté schématiquement sur la figure 2, la contre-réaction de phase et la contre-réaction de polarisation sont réalisées par des boucles d'asservissement séparées. Chaque fonction, contrôle de phase et contrôle de polarisation possède alors son propre dispositif de contre-réaction, mettant chacun en œuvre un propre  
30 algorithme d'asservissement approprié.

Dans ce mode de réalisation, la boucle d'asservissement de polarisation est réalisée sur chaque voie g, au moyen d'un dispositif d'asservissement 5, disposé en sortie. Ce dispositif 5 comprend un dispositif de mesure de polarisation (polarimètre, ou polariseur et photodiode par  
35 exemple) d'une fraction du signal de sortie, pour élaborer un signal de

contre-réaction  $S_p$  pour le contrôleur de polarisation  $p$  associé, par référence à un état de polarisation attendu en sortie.

La boucle d'asservissement de la phase est typiquement réalisée dans le dispositif de sortie, au moyen d'un analyseur de front d'onde 6 sur le faisceau recombinaison  $fR$ . Dans une variante non représentée, la boucle d'asservissement de phase peut être réalisée sur chaque voie  $g$ . Ceci peut être notamment le cas, lorsque l'on cherche à obtenir une "rampe de phase" sur les  $N$  faisceaux en sortie.

Le dispositif d'asservissement de la phase (dispositif 3 sur la figure 1 ou 6 sur la figure 2) peut utiliser une phase de référence  $R$ . Celle-ci peut par exemple être la phase d'un des  $N$  faisceaux, ou bien une phase de référence externe.

L'asservissement en phase et en polarisation selon l'invention, permet notamment de réaliser une source laser de puissance. Dans ce cas, l'asservissement est réalisé pour qu'en sortie des voies  $g$ , les  $N$  faisceaux lasers amplifiés soient en phase (retard nul modulo  $2\pi$ ) et aient le même état de polarisation.

Selon l'application visée, les paramètres de l'asservissement peuvent être différents. Par exemple, pour des applications de pointage, l'asservissement est réalisé pour imposer une rampe de déphasage entre les faisceaux en sortie.

Le principe de fonctionnement d'un système selon l'invention va être expliqué en relation avec les figures 3 et 4.

La figure 3 représente d'une manière générale l'effet d'un milieu  $g_i$  sur l'état de polarisation d'un faisceau laser.

On considère un faisceau laser incident avec une polarisation incidente  $P_{inc}^i = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ .

Le milieu de propagation  $g_i$  a une matrice de Jones qui peut s'écrire :

avec  $M_i = e^{j\Delta\varphi_i} \begin{pmatrix} m_{11}^i & m_{12}^i \\ m_{21}^i & m_{22}^i \end{pmatrix}$ .

Cette matrice de Jones du milieu  $g_i$  traduit la modification de l'état de polarisation de la lumière, avec des coefficients complexes  $m_{11}^i, \dots, m_{22}^i$  et du déphasage, par le terme  $\Delta\varphi_i$ .

Dans une source laser selon l'invention, on souhaite que le faisceau en sortie du milieu  $g_i$  soit dans un état de polarisation  $P^{i_{out}}$  donné.

Il faut pour atteindre ce but que l'état de polarisation en entrée du milieu  $g_i$  soit :  $P^{i_{inc}} = M_i^{-1} \times P^{i_{out}}$ .

5 En d'autres termes, en contrôlant l'état de polarisation en entrée du milieu  $g_i$ , on contrôle l'état de polarisation en sortie.

Par ailleurs, pour que le faisceau en sortie du milieu  $g_i$  soit dans un état de phase donné, on doit aussi contrôler le déphasage  $\Delta\phi_i$  induit par le milieu.

10 C'est ce principe qui est utilisé dans l'invention.

Selon l'invention, et comme représenté sur la figure 4, on cascade deux éléments optiques : un déphaseur  $d_i$  et un contrôleur de polarisation  $p_i$ , en entrée de chaque voie  $g_i$ .

Le principe de fonctionnement de l'invention est alors décrit par la figure 4 : le déphaseur  $d_i$  associé à une voie  $g_i$  (le milieu de propagation), génère un retard sur cette voie  $g_i$ , pour compenser

- le retard  $\Delta\phi_i$  occasionné par cette voie  $g_i$ ,
- le retard relatif incident avec les autres voies,  $g_{i+1}$ ,  $g_{i+2}$ ,...et
- le retard occasionné par le contrôleur de polarisation  $p_i$ .

20 Le contrôleur de polarisation  $p_i$  associée à la voie  $g_i$  transforme l'état de polarisation incident  $P^{i_{in}}$  dans un état de polarisation  $P^i_s$  qui donnera, après propagation dans le milieu  $g_i$ , l'état de polarisation voulu  $P^{i_{out}}$  (polarisation verticale sur la figure 4).

Les 2 éléments  $d_i$  et  $p_i$  sont utilisés dans un système en boucle fermée avec un asservissement du pilotage des N éléments déphaseurs  $d_i$  et des N contrôleurs de polarisation  $p_i$  par un signal de contre-réaction associé  $sd_i$  ou  $sp_i$ , au moyen d'un dispositif de mesure et un algorithme approprié. On montre que le faisceau recombinaison obtenu en sortie a des caractéristiques qui traduisent l'efficacité de la mise en phase et en polarisation selon l'invention.

30

Les éléments déphaseurs  $d_i$  et/ou contrôleurs de phase  $p_i$  peuvent être réalisés par tout dispositif programmable de l'état de l'art, et notamment par des dispositifs électro-optiques ( $\text{LiNbO}_3$ , dispositif à cristaux liquides), ou autres. Les éléments déphaseurs peuvent aussi être des éléments acousto-optiques (cellules de Bragg).

35



De préférence, on prévoit d'utiliser comme contrôleur de polarisation, un contrôleur électro-optique tel que décrit notamment dans le brevet FR 0215994, ayant pour titre " Dispositif de contrôle dynamique de la polarisation d'une onde optique et procédé de fabrication d'un tel dispositif".

- 5 Un tel contrôleur a notamment comme avantage d'être très efficace, de limiter les pertes d'insertion, d'avoir un temps de réponse très court et une bonne compacité.

Il comprend typiquement, et comme représenté sur les figures 5a (perspective) et 5b (profil) deux lames à biréfringences variables et axes neutres orientables 10 et 12, disposées en cascade.

Dans l'exemple représenté, les électrodes sont des trous métallisés débouchants, traversant toute l'épaisseur de lame. Dans ce cas, il faut prévoir une lame électriquement isolante 11 entre les deux lames 10 et 12. Cette lame est typiquement une lame de silice (ou d'un matériau de faible constante diélectrique).

Dans le cas où les trous ne débouchent pas, il n'y pas de problème d'isolation électrique, et on peut cascader l'une sur l'autre les deux lames 10 et 12.

Chaque lame à biréfringence variable et axe neutre orientable est réalisée dans un matériau électro-optique à biréfringence variable et axe neutre orientable sous l'effet d'un champ électrique dont on modifie l'amplitude et/ou l'orientation au moyen d'un jeu d'au moins trois électrodes. La lame 10 comprend ainsi dans l'exemple quatre électrodes  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  et  $V_4$ . La lame 12 comprend quatre électrodes  $V'_1$ ,  $V'_2$ ,  $V'_3$  et  $V'_4$ . Les lames sont disposées comme illustré sur la figure.

Si on prend par exemple comme matériau électro-optique une céramique PLZT, on peut montrer que la tension  $V_\pi$  nécessaire pour obtenir un déphasage de  $\pi$  dans chacune des lames, condition nécessaire pour permettre un contrôle de polarisation sans butée, s'écrit :

$$30 \quad V_\pi = \sqrt{\frac{\lambda d^2}{n_0^3 R e}},$$

Où  $d$  est la distance inter-électrodes (typiquement de l'ordre de  $100\mu\text{m}$ ),  $e$  l'épaisseur de la lame (typiquement de l'ordre de  $500\mu\text{m}$ ),  $n_0$  l'indice du PLZT (2.4), et  $R$  son coefficient électro-optique ( $3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 \text{V}^{-2}$ ).

Pour ces valeurs typiques, on obtient des tensions de commandes (à appliquer sur les électrodes) qui sont inférieures à 100 Volts.

Par ailleurs, le temps de réponse d'un tel composant est de l'ordre de la microseconde, ce qui permet de compenser des fluctuations de polarisation de plusieurs centaines de kiloHertz (en accord avec les besoins de l'application).

Selon le matériau utilisé, on peut avoir des tensions de commande plus faibles, inférieures à 30 volts. On peut citer le KTN (Potassium, Tantalate Niobate), ou le PZN ( $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})$ ).°

Si on reprend la figure 4, un contrôleur de polarisation tel que représenté sur les figures 5a et 5b entraîne un déphasage fonction des biréfringences respectives  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  des lames 10 et 12 du composant.

En effet, la matrice de transfert d'un tel contrôleur de polarisation est donnée par :

$$M = e^{j\frac{\varphi_1+\varphi_2}{2}} \times \begin{pmatrix} \cos\frac{\varphi_1-\varphi_2}{2} + j \cos 2\theta \sin\frac{\varphi_1-\varphi_2}{2} & j \sin 2\theta \sin\frac{\varphi_1-\varphi_2}{2} \\ j \sin 2\theta \sin\frac{\varphi_1-\varphi_2}{2} & \cos\frac{\varphi_1-\varphi_2}{2} - j \cos 2\theta \sin\frac{\varphi_1-\varphi_2}{2} \end{pmatrix}$$

avec  $\theta$  l'orientation commune des axes neutres des 2 lames.

Un tel contrôleur de polarisation introduit donc un déphasage lié au terme en  $e^{j\frac{\varphi_1+\varphi_2}{2}}$  de la matrice de transfert; déphasage qui est pris en compte dans la fonction de contrôle de phase selon l'invention.

Les détails de fabrication d'un tel contrôleur peuvent être trouvés dans le brevet cité précédemment, et ne seront donc pas rappelé ici.

Il permet une réalisation matricielle des éléments de contrôle de polarisation  $p_i$ , formant alors un composant matriciel P, qui peut être selon une dimension, comme illustré sur la figure 5c, ou deux dimensions.

Selon un aspect avantageux de l'invention, on utilise un composant similaire pour réaliser les éléments déphaseurs.

Dans un premier mode de réalisation représenté sur les figures 6a à 6c, un élément déphaseur  $d_i$  est réalisé au moyen de deux lames à biréfringences variables et axes neutres fixes, 20 et 22, comprenant chacune un jeu de deux électrodes,  $V_5, V_6$ , respectivement  $V'_5, V'_6$ , et dont les axes

optiques sont croisés. En d'autres termes, les deux lames sont disposées pour que leurs jeux d'électrodes soient à 90 degrés l'un par rapport à l'autre.

Les électrodes sont réalisées par des trous oblongs métallisés, dans l'épaisseur de la lame. Dans l'exemple, les trous sont débouchants.

- 5 Pour cette raison, une lame 21 d'un matériau à faible constante diélectrique, typiquement une lame de silice, est prévue entre deux lames cascades, pour isoler leurs électrodes respectives.

Un tel déphaseur permet d'assurer la fonction de contrôle voulue dans une source laser selon l'invention, quel que soit l'état de polarisation incident des N faisceaux. En d'autres termes, le déphaseur  $d_i$  réalise la fonction de déphasage de manière isotrope : le déphasage appliqué est identique quel que soit l'état de polarisation incident.

En prenant comme hypothèse que les biréfringences des 2 lames sont égales (à  $\varphi$ ), la matrice de Jones du déphaseur s'écrit comme suit :

15 
$$M = \begin{pmatrix} e^{j\varphi} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\varphi} \end{pmatrix} = e^{j\varphi} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Dans l'invention, on montre que l'on peut dériver la structure d'un tel déphaseur, du contrôleur de polarisation décrit en relation avec les figures 5a à 5c et détaillé dans le brevet français précité.

- 20 Notamment le matériau considéré (céramique PLZT) se prête bien à un tel usage par son faible hystérésis, son temps de réponse de l'ordre de la  $\mu\text{s}$ , et son fort coefficient électro-optique ( $R \sim$  quelques  $10^{-16} \text{ m}^2\text{V}^{-2}$ ) qui permet la mise en jeu de faibles distances d'interaction, ce qui ne limite pas la conception des composants aux structures en optique guidée.

- 25 Le déphaseur  $d_i$  illustré sur les figures 6a à 6c peut être réalisé de la façon similaire au contrôleur de polarisation tel que décrit dans le brevet français précité. Plus particulièrement on peut prévoir les étapes suivantes :

Dans une première étape, on réalise les deux lames 20 et 22 de déphasage à une dimension, en usinant sur 2 substrats 2 trous oblongs  
30 parallèles (par usinage laser femtoseconde ou ultrasonore).

Dans une deuxième étape, les trous sont métallisés (substrats entièrement métallisés, puis polis).

Dans une troisième étape on applique un traitement anti-reflet air/PLZT sur une face de chaque substrat, et anti-reflet PLZT/verre sur l'autre face. Le traitement air/PLZT assure la double fonction d'isolation des pistes de contact électrique et de la céramique (effet capacitifs parasites), et de minimisation des pertes par réflexion et effet étalon. Le traitement PLZT/verre assure un bon interfaçage de chacune des lames de PLZT 20 et 22, avec la lame de verre (ou autre isolant) 21 qui sera insérée entre les deux.

Dans une quatrième étape, on réalise le dépôt des pistes de contact qui assureront le transport des tensions de commande jusqu'aux électrodes usinées.

Enfin, dans une dernière étape, on réalise l'assemblage : les 2 lames de céramiques sont placées de manière à ce que leurs jeux de trous oblongs soient centrés et disposés l'un par rapport à l'autre de façon perpendiculaire et la lame de verre 21 est insérée entre ces 2 lames 20 et 22.

Un tel procédé permet facilement une réalisation matricielle de déphaseurs  $d_i$  dans un composant D telle que représentée sur la figure 6c.

On a vu en relation avec les figures 5a et 5b que la tension nécessaire pour obtenir un déphasage de  $\pi$  pour chacune des 2 lames 20 et 22 est donnée par

$$V_{\pi} = \sqrt{\frac{\lambda d^2}{n_0^3 R e}}$$

où  $d$  est la distance entre les électrodes (typiquement  $100\mu\text{m}$ ),  $e$  l'épaisseur de chaque lame (typiquement  $500\mu\text{m}$ ),  $n_0$  l'indice du PLZT (2.4), et  $R$  le coefficient électro-optique de la céramique ( $3.10^{-16} \text{ m}^2\text{V}^{-2}$ ). Pour ces valeurs typiques, on obtient des tensions de commandes inférieures à 100Volts, comme indiqué précédemment. De même que précédemment, on peut utiliser d'autres matériaux, dont le coefficient  $R$  est particulièrement adapté, notamment du KTN ou du PZT.

Les figures 7a et 7b illustrent une variante de réalisation d'un déphaseur selon l'invention, plus simple à réaliser, et qui convient dans le cas où les faisceaux laser incidents ont tous la même polarisation linéaire. C'est notamment le cas lorsque les faisceaux sont issus d'une même et  
5 unique source laser, fournissant un faisceau laser polarisé linéairement .

Dans ce cas, la fonction à réaliser est plus simple, puisqu'il suffit alors de réaliser une lame à biréfringence variable de 0 à  $2\pi$  et à axe fixe parallèle à l'axe de polarisation des faisceaux incidents.

On peut alors procéder de la même manière que ci-dessus, à ceci  
10 près qu'une seule lame 30 est à présent nécessaire. Cette lame sera choisie d'épaisseur  $e$  plus importante que dans le cas des figures 6a à 6c, afin d'assurer le déphasage de  $2\pi$ , typiquement, le double. Elle sera traitée anti-reflet air/PLZT sur les 2 faces, comme indiqué précédemment. Elle comprend un jeu de deux électrodes  $V_7$ ,  $V_8$ , réalisées comme  
15 précédemment, par deux trous oblongs, métallisés dans l'épaisseur de la lame.

On peut prévoir une autre variante de réalisation du jeu des deux électrodes d'une lame de déphasage.

Cette variante est illustrée sur la figure 7b. Elle s'applique notamment  
20 de façon avantageuse dans le cas où l'élément déphaseur comprend une seule lame. Elle conduit avantageusement directement à une version matricielle du composant comme illustré sur la figure 7b, dans le cas d'une matrice à une dimension.

Dans cette variante, on creuse dans l'épaisseur de la lame deux  
25 tranchées parallèles 31 et 32 dans l'épaisseur du substrat, en utilisant une scie circulaire. On métallise ensuite l'intérieur de ces tranchées de façon sélective par masquage, pour réaliser les électrodes  $V_7$  et  $V_8$ , la première électrode  $V_7$  dans une tranchée, la tranchée 32 dans l'exemple, la deuxième électrode  $V_8$  dans l'autre tranchée, la tranchée 31 dans l'exemple. Les  
30 éléments déphaseurs  $d_j$ ,  $d_{j+1}$  sont ainsi réalisés le long de l'axe des tranchées, alors que la direction de propagation des faisceaux incidents sur

chaque élément suit un axe  $c_j, c_{j+1}$  perpendiculaire à la tranchée. On remarquera que les électrodes ne débouchent pas sur les deux faces de la lame.

Pour obtenir une matrice à deux dimensions, il faut multiplier les paires de tranchées 31, 32, dans la hauteur du substrat.

En pratique, la tension nécessaire pour obtenir un déphasage de  $2\pi$  est donnée par :

$$V_{2\pi} = \sqrt{\frac{2\lambda d^2}{n_0^3 R e}}$$

où  $d$  est la distance entre les électrodes (typiquement  $100\mu\text{m}$ ),  $e$  l'épaisseur de la lame,  $n_0$  l'indice du PLZT (2.4), et  $R$  le coefficient électro-optique de la céramique ( $3.10^{-16} \text{ m}^2\text{V}^{-2}$ ). Pour une épaisseur double de celle du cas précédent, on obtient la même tension de commande maximale, inférieure à 100 Volts.

Les figures 8a et 8b illustrent un composant "monolithique" intégré de contrôle de phase et de polarisation qui peut alors être avantageusement utilisé dans l'invention.

Dans le cas illustré sur la figure 8a, on cascade les deux lames 20 et 22 du déphaseur, avec les deux lames 10 et 12 du polariseur, en prévoyant le cas échéant des lames de silice 11, 13 et 21 entre (cas des trous débouchants).

Dans le cas illustré sur la figure 8b, on cascade la lame 30 du déphaseur, avec les deux lames 10 et 12 du polariseur, en prévoyant le cas échéant (trous débouchants) une lame de silice 11 entre les deux lames 10 et 12 du contrôleur de polarisation.

Comme illustré sur ces figures pour 2 voies  $g_1$  et  $g_2$ , ce composant peut être avantageusement réalisé sous forme matricielle. Pour chaque voie, par exemple  $g_1$ , on couple en entrée un élément déphaseur, dans l'exemple  $d_1$  cascader sur un élément de contrôle de polarisation, dans l'exemple  $p_1$ .

L'invention qui vient d'être décrite ne se limite cependant pas à l'utilisation des composants décrits en relation avec les figures 5a à 5c, 6a à 6c, 7a et 7b et 8a et 8b. Notamment on peut également réaliser un déphaseur uniaxe en utilisant d'autres technologies tels que du LiNbO<sub>3</sub>, des  
5 cristaux liquides à alignement parallèles...ou autres.

Un déphaseur isotrope est alors obtenu en cascasant 2 déphaseurs uniaxes croisés.

Un déphaseur isotrope peut également être directement réalisé en utilisant la technologie des nanogouttes de cristaux liquides.

## REVENDEICATIONS

1. Source laser comprenant N faisceaux lasers incidents, N au moins égal à deux, N milieux de propagation monomode spatiale d'un faisceau, formant chacun une voie ( $g_i$ ) de propagation d'un faisceau laser, un système de recombinaison cohérente en sortie des N voies, pour fournir  
5 un faisceau laser recombinaison ( $f_R$ ) en sortie, et un dispositif de contrôle de phase (D) comprenant N éléments déphaseurs programmables ( $d_i$ ) asservis en boucle fermée, un en entrée de chaque voie ( $g_i$ ), caractérisée en ce que la source comprend en outre un dispositif de contrôle de polarisation (P) comprenant N contrôleurs de polarisation programmables  
10 ( $p_i$ ) asservis en boucle fermée, un par voie, chaque contrôleur étant disposé entre l'élément déphaseur et la voie associés.
2. Source laser selon la revendication 1, caractérisée en ce que chacun des N milieux de propagation est une fibre amplificatrice.
3. Source laser selon la revendication 2, caractérisée en ce que la fibre n'est  
15 pas à maintien de polarisation.
4. Source laser selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que les N faisceaux lasers sont issus d'une même source d'émission.
5. Source laser selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en  
20 ce qu'elle comprend pour chacune des N voies ( $g$ ), des moyens de contrôle (5) de la polarisation du faisceau disposés en sortie de la voie ( $g$ ), pour commander le contrôleur de polarisation associé ( $p$ ) à la dite voie ( $g$ ), et des moyens d'asservissement (6) de la phase de chacun des faisceaux, en fonction des caractéristiques du faisceau recombinaison ( $f_R$ ).
- 25 6. Source laser selon l'une des revendications 1 à 4 précédentes, caractérisée en ce qu'elle comprend un système d'analyse (3) du faisceau recombinaison ( $f_R$ ), ledit système délivrant en sortie les signaux de



commande ( $sd_i$ ,  $sp_i$ ) des éléments déphaseurs et de contrôle de polarisation.

7. Source laser selon la revendication 6, caractérisée en ce que ledit système d'analyse mesure l'intensité du lobe central du faisceau laser recombinaison ( $fR$ ), et détermine la correction à appliquer sur chacun des contrôleurs de polarisation et des éléments déphaseurs pour que cette intensité soit maximale.  
5
8. Source laser selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que les N voies sont organisées selon un arrangement matriciel, en ce que le contrôleur de phase (D) et le contrôleur de polarisation (P) sont chacun du type matriciel.  
10
9. Source laser selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisée en ce que les éléments déphaseurs programmables et/ou les éléments de contrôle de polarisation sont des éléments électro-optiques.  
15
10. Source laser selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que les éléments déphaseurs programmables sont des éléments accousto-optiques.
11. Source laser selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisée en ce que chaque élément déphaseur comprend au moins une lame de matériau électro-optique à biréfringence variable sous l'effet d'un champ électrique programmable, ladite lame comprenant un jeu de deux électrodes formées dans l'épaisseur de la lame.  
20
12. Source laser selon la revendication 11, caractérisée en ce que lesdites électrodes ( $V_5$ ,  $V_5$ ) comprennent chacune un trou oblong métallisé réalisé dans l'épaisseur de la lame.  
25
13. Source laser selon la revendication 11, caractérisée en ce que lesdites électrodes ( $V_7$ ,  $V_8$ ) comprennent chacune une métallisation réalisée dans une tranchée réalisée dans l'épaisseur de la lame.

14. Source laser selon l'une des revendications 11 à 13, caractérisée en ce que chaque élément déphaseur comprend un empilement (20, 22) de deux telles lames de matériau électro-optique, disposées pour que leurs jeux d'électrodes respectifs ( $V_5$ ,  $V_6$ , respectivement  $V'_5$ ,  $V'_6$ ) soit  
5 perpendiculaire l'un par rapport à l'autre.
15. Source laser selon l'une quelconque des revendications 9 à 14, caractérisée en ce que chaque élément de contrôle de polarisation comprend un empilement de deux lames (10, 12) d'un matériau électro-optique à biréfringence variable et axe neutre orientable sous l'effet d'un  
10 champ électrique programmable, chaque lame comprenant un jeu d'au moins trois électrodes de commande ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$ ).
16. Source laser selon la revendication 15 en combinaison avec l'une des revendications 11 à 14, caractérisée en ce que les lames des éléments déphaseur et de contrôle de polarisation sont cascadiées.
- 15 17. Source laser selon l'une quelconque des revendications 11 à 16, caractérisée en ce que ledit matériau électro-optique est un matériau choisi parmi PLZT, PZT ou KTN.

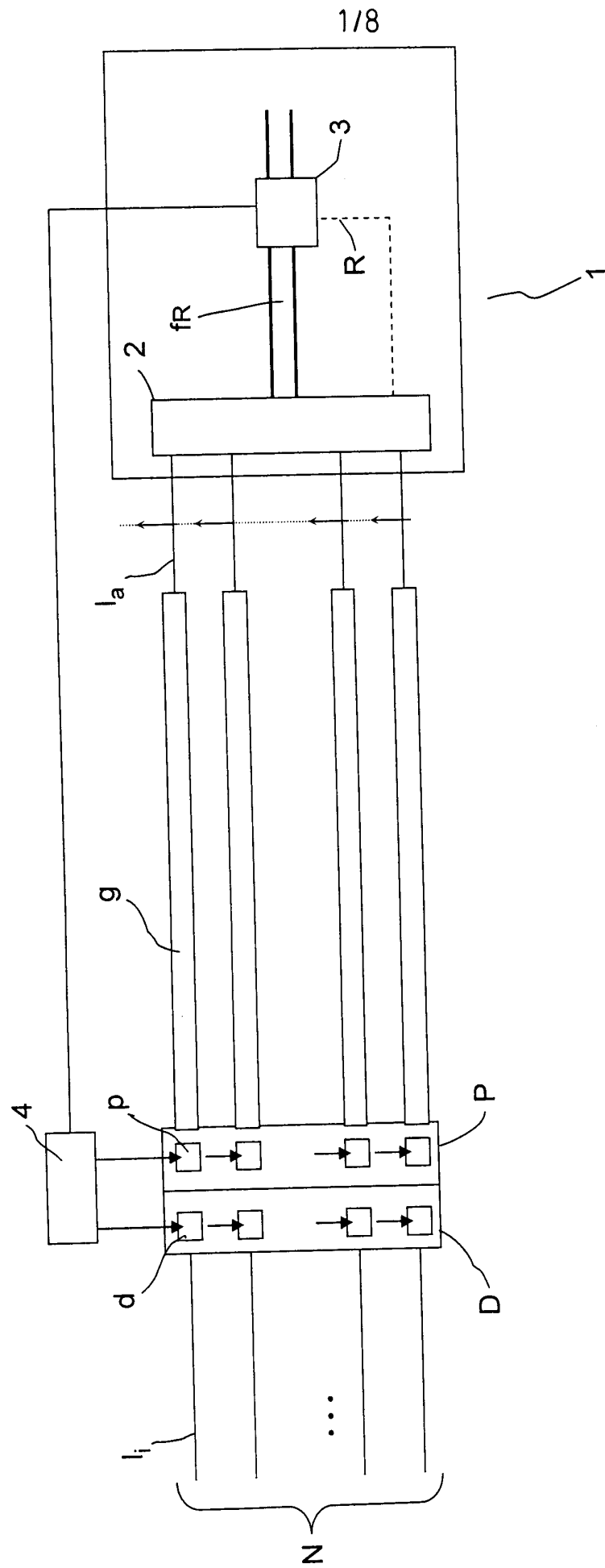


FIG.1

2/8

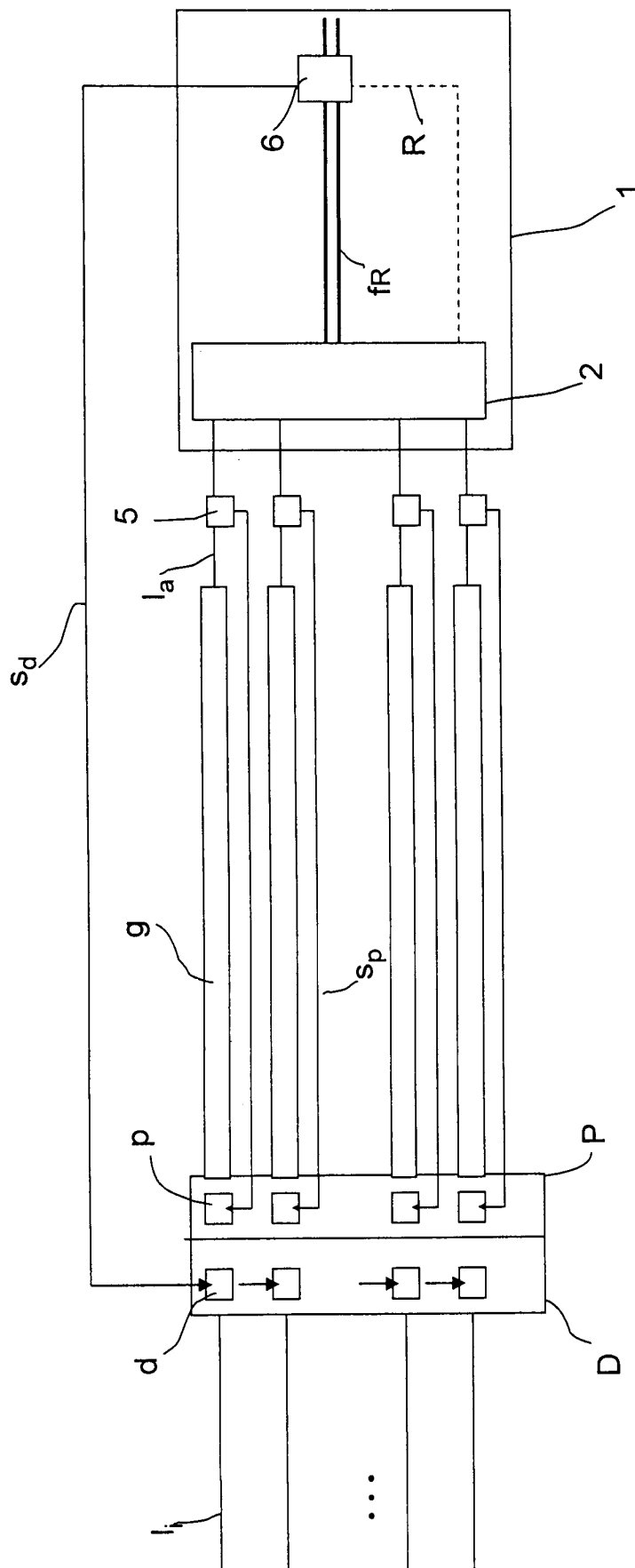


FIG.2

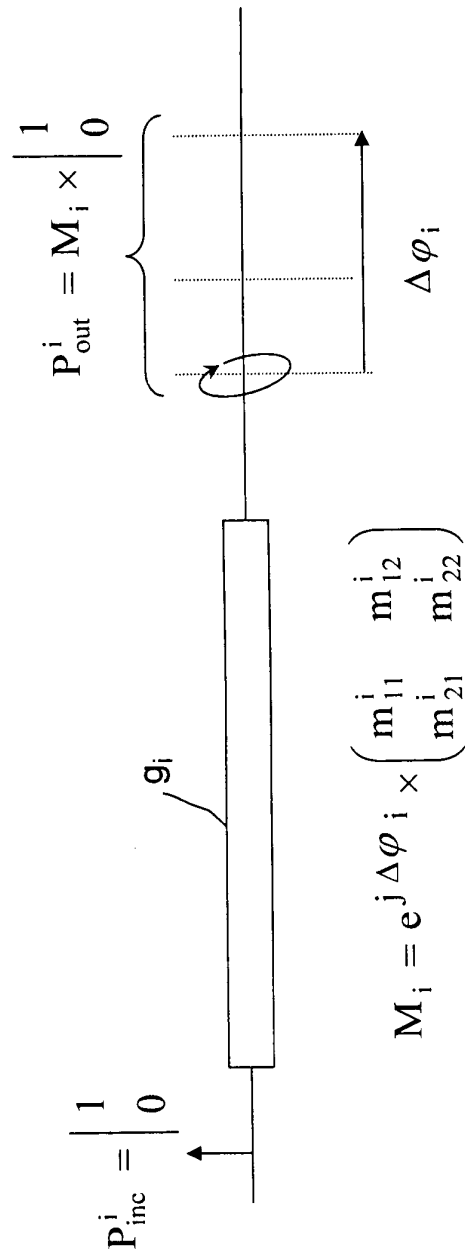


FIG.3

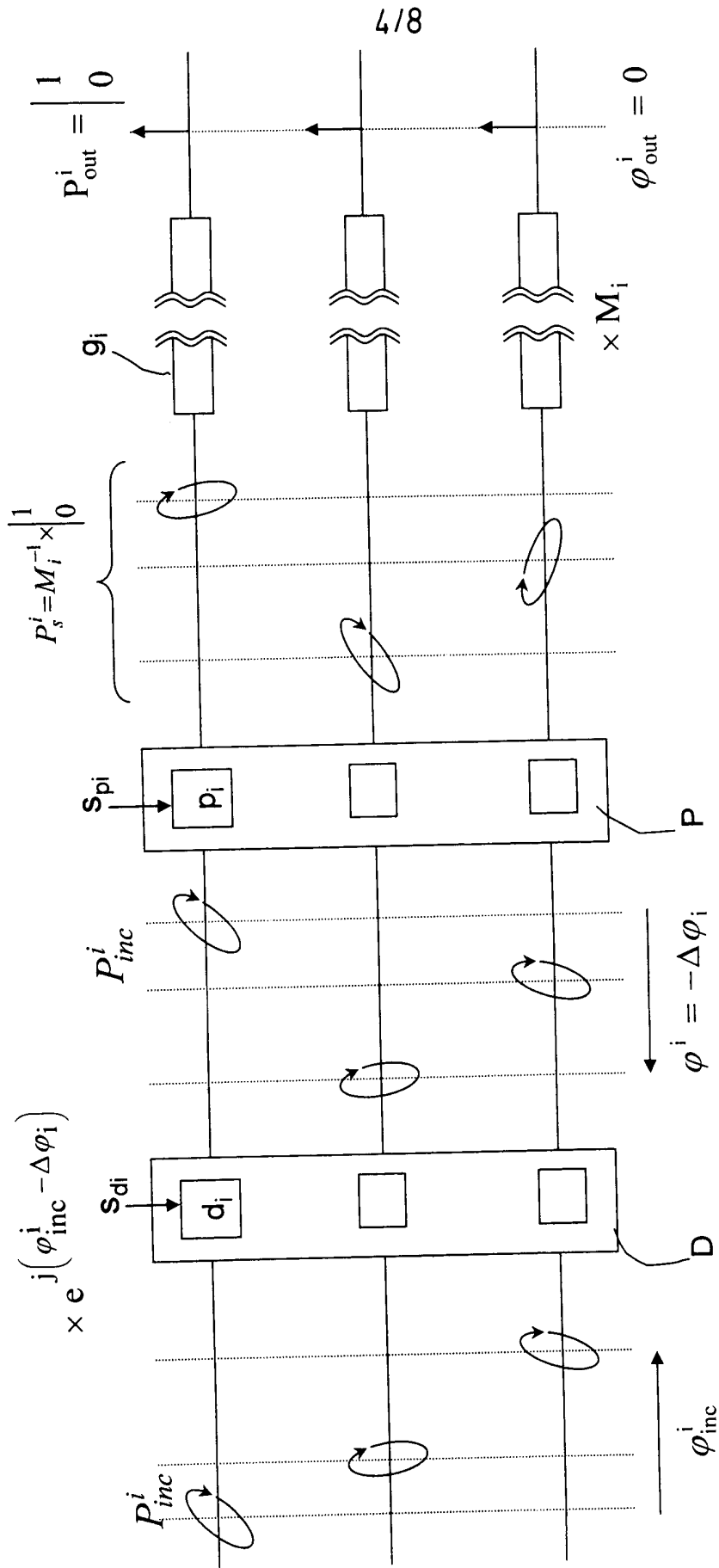


FIG.4

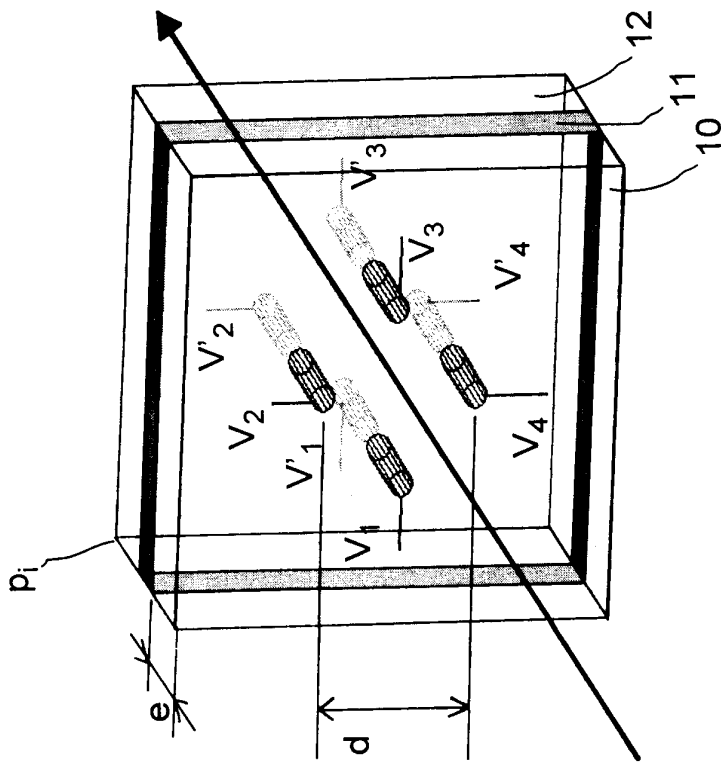


FIG. 5a

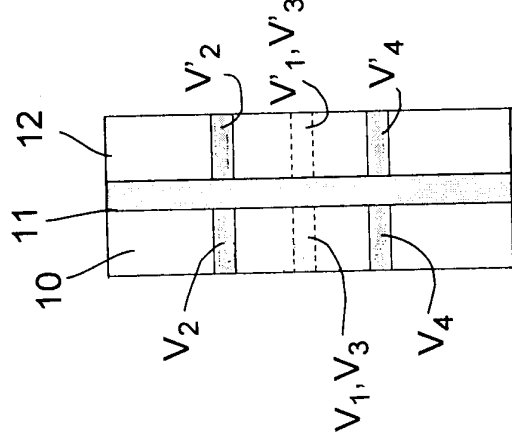


FIG. 5b

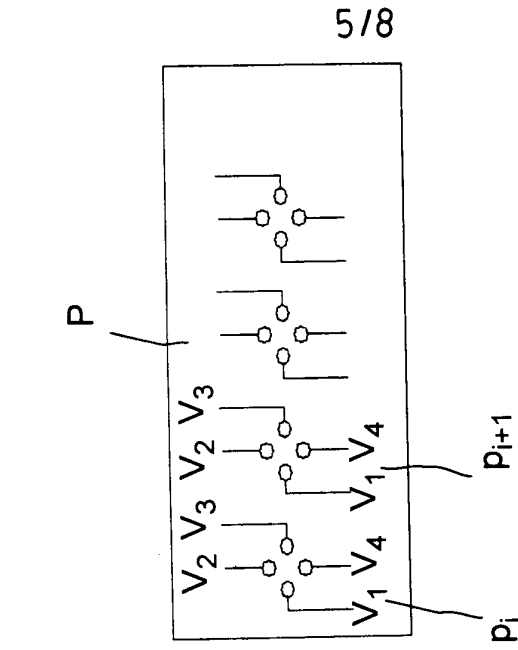


FIG. 5c

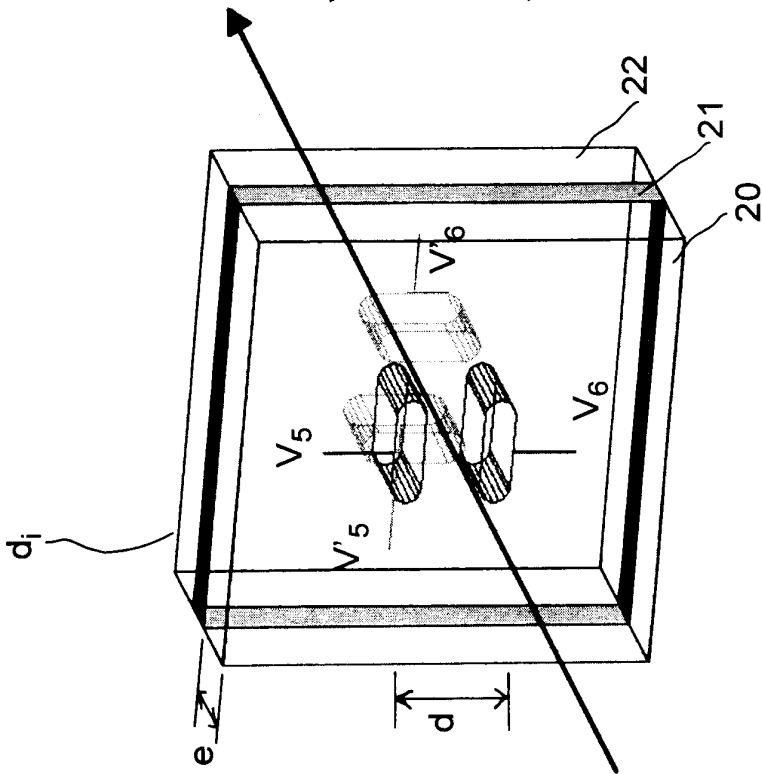


FIG. 6a

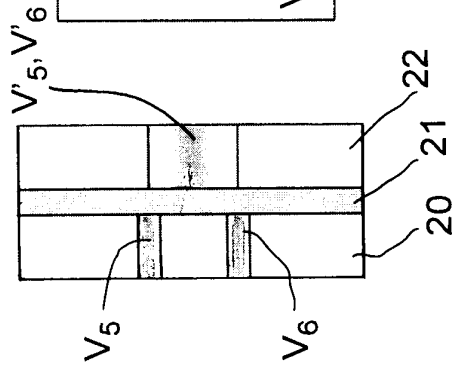


FIG. 6b

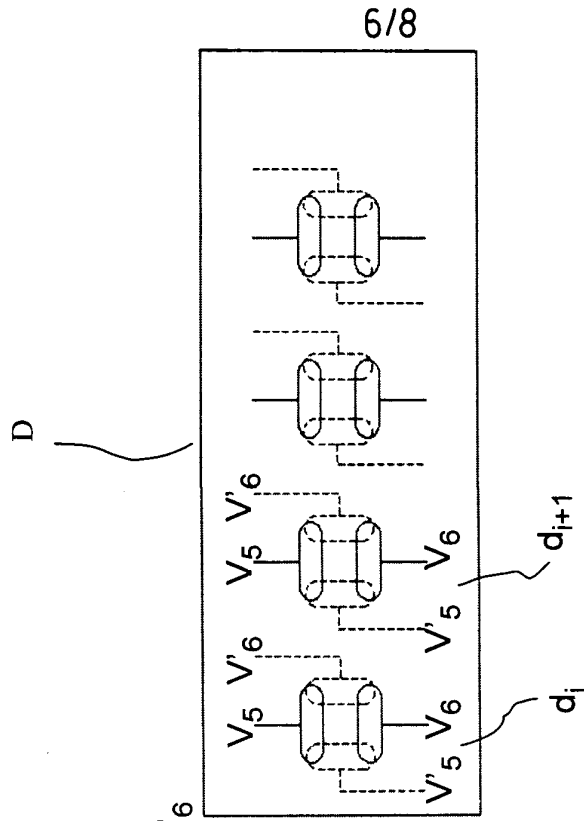


FIG. 6c



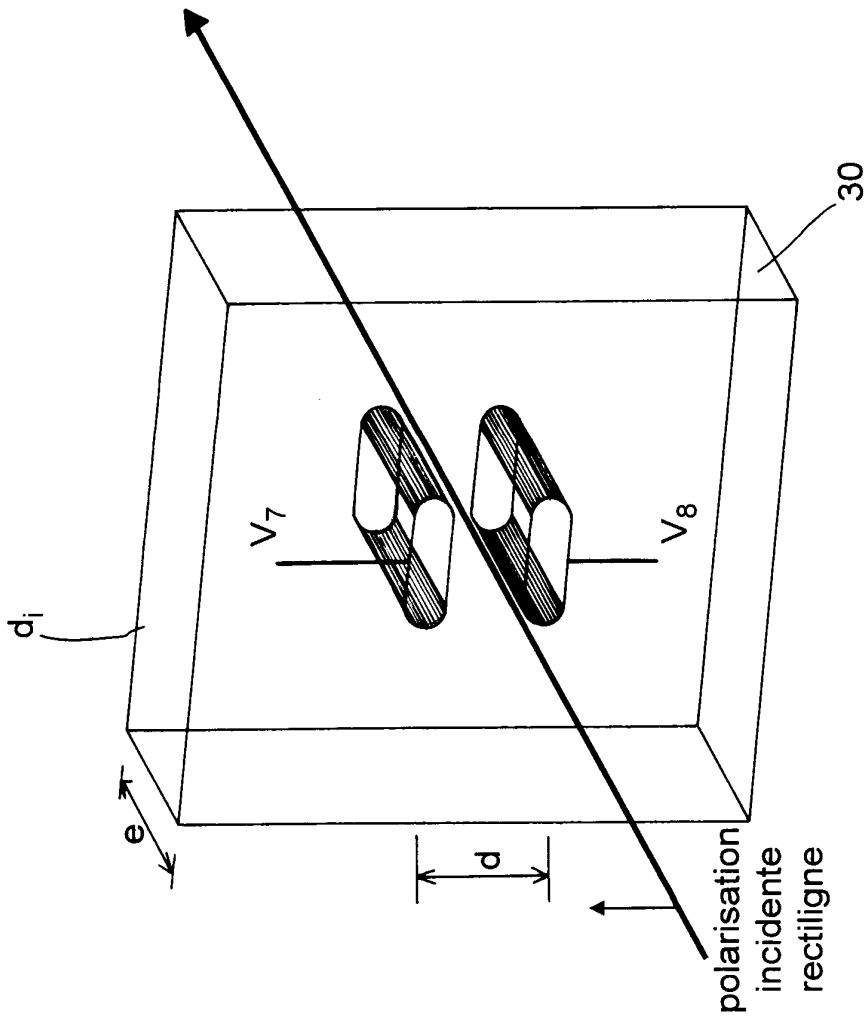


FIG. 7a

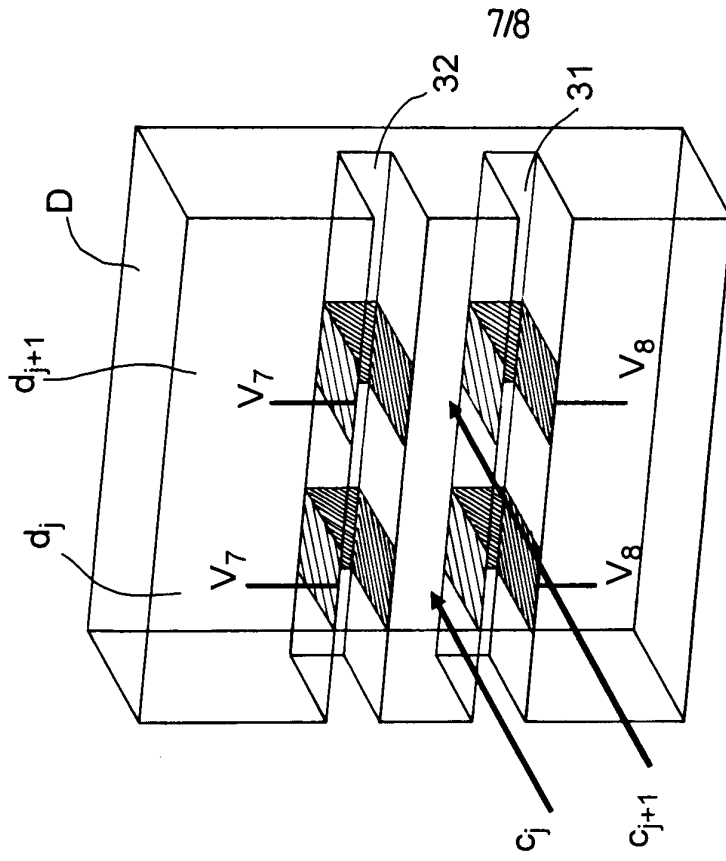


FIG. 7b

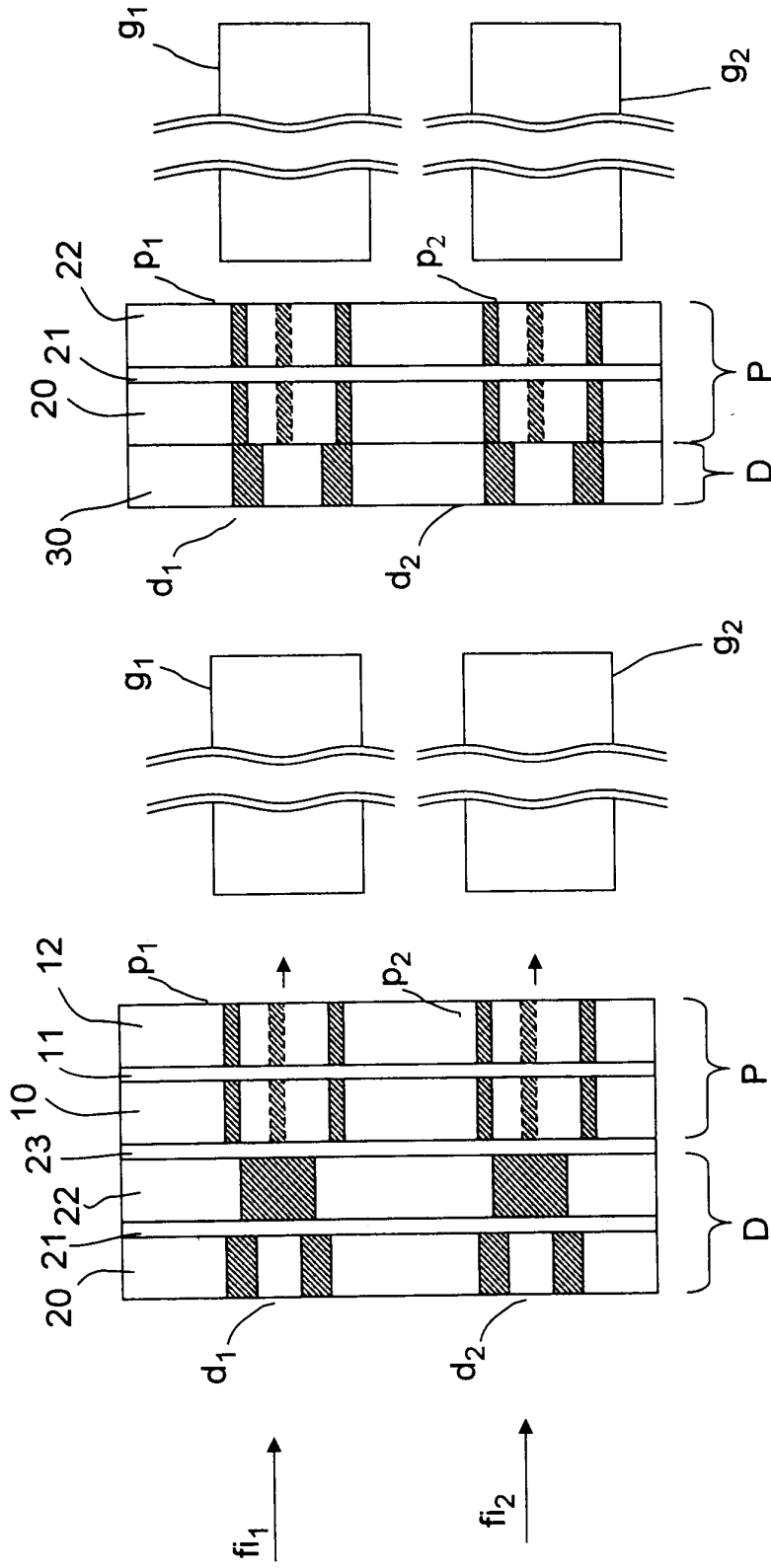


FIG. 8b

FIG. 8a



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**  
établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 661555  
FR 0413838

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	US 5 694 408 A (BOTT ET AL) 2 décembre 1997 (1997-12-02) * colonne 7, ligne 8 - colonne 18, ligne 6; figures 1-13 *	1-9	H01S3/10
A	US 2003/099439 A1 (LONOV STANISLAV L ET AL) 29 mai 2003 (2003-05-29) * alinéas [0020] - [0032]; figure 2 *	1-7	
A	EP 0 980 123 A (TRW INC) 16 février 2000 (2000-02-16) * alinéas [0010] - [0016]; figure 1 *	1-6	
D,A	FR 2 848 684 A (THALES [FR]) 18 juin 2004 (2004-06-18) * abrégé; figure 1 *	9,11-17	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
			H01S G02B G02F
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		19 juillet 2005	Marani, R
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ..... & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0413838 FA 661555**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 19-07-2005

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5694408 A	02-12-1997	AU 5988696 A	30-12-1996
		EP 0830720 A1	25-03-1998
		JP 11506871 T	15-06-1999
		WO 9641404 A1	19-12-1996
-----			
US 2003099439 A1	29-05-2003	AU 2002359318 A1	10-06-2003
		WO 03044912 A2	30-05-2003
		TW 588166 B	21-05-2004
-----			
EP 0980123 A	16-02-2000	CA 2278071 A1	11-02-2000
		EP 0980123 A2	16-02-2000
		IL 130904 A	25-07-2004
		JP 2000056280 A	25-02-2000
-----			
FR 2848684 A	18-06-2004	FR 2848684 A1	18-06-2004
		AU 2003299228 A1	09-07-2004
		WO 2004055575 A1	01-07-2004
-----			