



(22) Date de dépôt/Filing Date: 2002/07/01

(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2003/01/09

(45) Date de délivrance/Issue Date: 2014/11/25

(62) Demande originale/Original Application: 2 451 166

(30) Priorités/Priorities: 2001/06/29 (EP01870147.4);
2001/12/18 (EP01070281.1)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *G02B 21/22* (2006.01)

(72) Inventeurs/Inventors:

DUBOIS, FRANK, BE;
YOURASSOWSKY, CATHERINE, BE

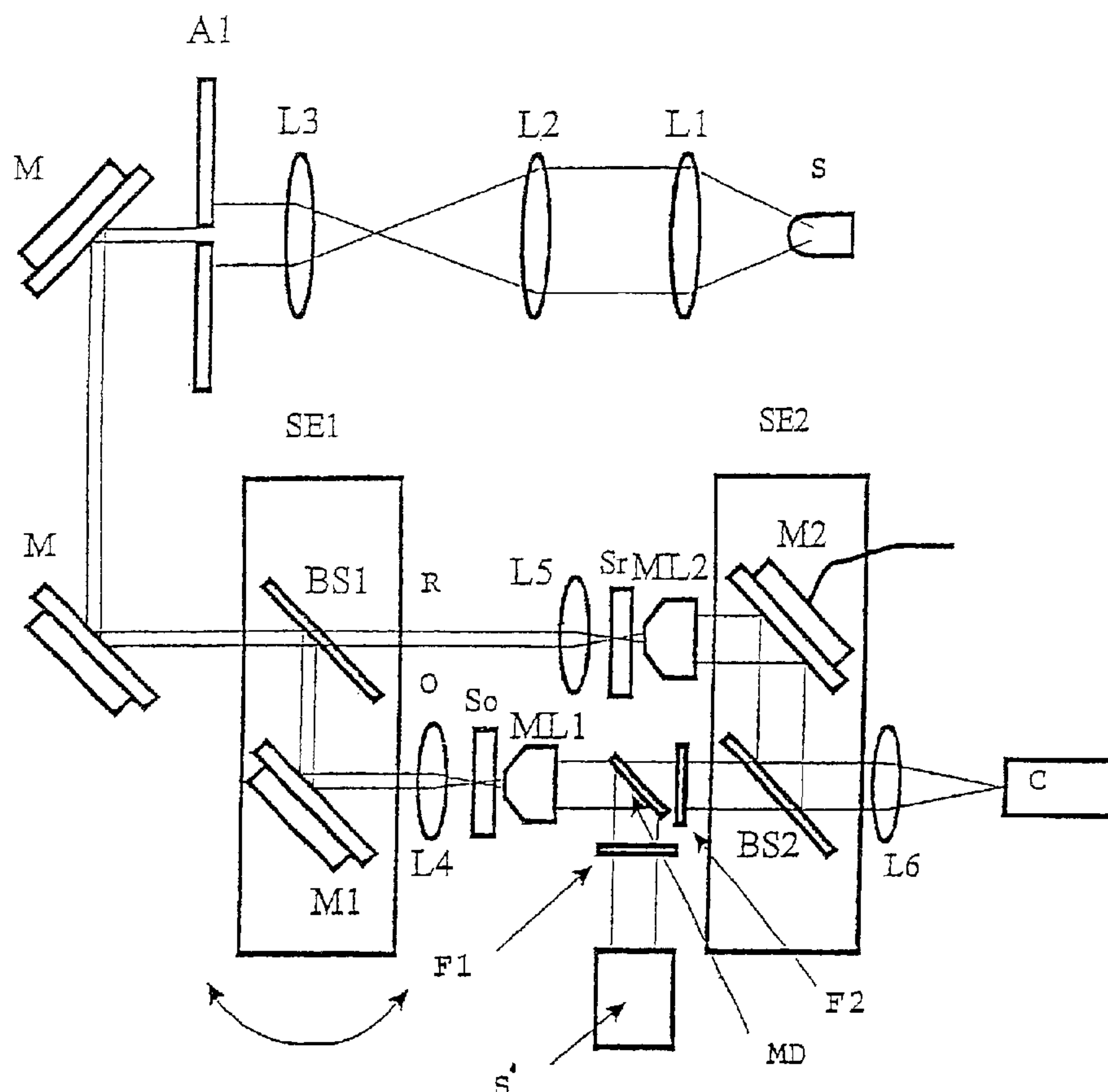
(73) Propriétaire/Owner:

UNIVERSITE LIBRE DE BRUXELLES, BE

(74) Agent: GOUDREAU GAGE DUBUC

(54) Titre : PROCEDE ET DISPOSITIF DESTINES A L'OBTENTION PAR MICROSCOPIE D'IMAGES EN TROIS
DIMENSIONS D'UN ECHANTILLON

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR OBTAINING A SAMPLE WITH THREE-DIMENSIONAL MICROSCOPY



(57) Abrégé/Abstract:

L'invention concerne un microscope capable de fonctionner en holographie digitale. Le microscope comporte une source de lumière partiellement cohérente, capable de générer un faisceau lumineux source; un premier sous-ensemble mobile, comprenant

(57) Abrégé(suite)/Abstract(continued):

un séparateur de faisceau et un miroir, pour former deux faisceaux parallèles, un faisceau objet et un faisceau de référence à partir du faisceau lumineux source; un deuxième sous-ensemble, comprenant également un séparateur de faisceau et un miroir, pour combiner ledit faisceau objet et ledit faisceau de référence en un faisceau lumineux recombinaison; une cellule objet comprenant un échantillon à étudier, disposée sur le trajet optique du faisceau objet entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble; un premier objectif de microscope, sur le trajet optique du faisceau objet entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble, en aval de la cellule objet; et un deuxième objectif de microscope, disposé sur le trajet optique du faisceau de référence entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble.

PRÉCIS DE DIVULGATION

L'invention concerne un microscope capable de
5 fonctionner en holographie digitale. Le microscope comporte une
source de lumière partiellement cohérente, capable de générer un
faisceau lumineux source; un premier sous-ensemble mobile,
comprenant un séparateur de faisceau et un miroir, pour former
deux faisceaux parallèles, un faisceau objet et un faisceau de
10 référence à partir du faisceau lumineux source; un deuxième
sous-ensemble, comprenant également un séparateur de faisceau et
un miroir, pour combiner ledit faisceau objet et ledit faisceau
de référence en un faisceau lumineux recombinaison; une cellule
objet comprenant un échantillon à étudier, disposée sur le
15 trajet optique du faisceau objet entre le premier sous-ensemble
et le deuxième sous-ensemble; un premier objectif de microscope,
sur le trajet optique du faisceau objet entre le premier sous-
ensemble et le deuxième sous-ensemble, en aval de la cellule
objet; et un deuxième objectif de microscope, disposé sur le
20 trajet optique du faisceau de référence entre le premier sous-
ensemble et le deuxième sous-ensemble.

5

Procédé et dispositif destinés à l'obtention par
microscopie d'images en trois dimensions d'un échantillon

10

Objet de l'invention

[0001] La présente invention concerne un procédé et
15 un dispositif qui permettent d'obtenir par microscopie des
images en trois dimensions d'un échantillon et d'obtenir en
trois dimensions le champ de fluorescence émis par cet
échantillon, ledit échantillon étant soit fluorescent soit
préalablement marqué à l'aide d'un ou plusieurs
20 fluorochromes.

[0002] Une des applications dudit procédé et dudit
dispositif concerne plus particulièrement l'obtention
d'images en trois dimensions de la fluorescence émise par
des échantillons biologiques qui peuvent être épais, en vue
25 d'observer leur comportement dynamique et leur évolution
dans le temps.

Etat de la technique

[0003] La microscopie classique en fluorescence a
30 apporté des progrès décisifs dans le domaine de la
biologie. En particulier, la technique de
l'immunofluorescence a permis de réaliser le marquage
spécifique de molécules et leur localisation dans les

tissus. Par ailleurs, la découverte des GFP, les « green fluorescent proteins », a révolutionné l'étude de la localisation, de la dynamique et des interactions des protéines dans les cellules vivantes.

5 [0004] Toutefois, un des problèmes rencontrés en microscopie de fluorescence classique réside dans la fluorescence émise par les éléments situés hors du plan de netteté. Cette lumière parasite empêche une bonne lecture de l'image en ajoutant un bruit de fond important. Les
10 images deviennent très difficiles à interpréter lorsque l'on observe des échantillons biologiques épais tels que des embryons.

[0005] La microscopie confocale permet quant à elle d'éviter ce problème en réalisant une excitation de la
15 fluorescence de l'échantillon en une zone de très petite dimension qui balaye l'échantillon, et le blocage par une petite ouverture de la fluorescence émise hors de la zone illuminée.

[0006] Néanmoins, la microscopie confocale présente
20 elle aussi ses propres inconvénients.

[0007] Un premier inconvénient de la microscopie confocale est que cette technique requiert le balayage complet de l'échantillon par un dispositif opto-mécanique. Cette opération requiert un temps relativement important
25 pour analyser un volume (typiquement de l'ordre de quelques secondes) avant que l'image ne soit disponible pour la visualisation.

[0008] En outre, la source excitatrice utilisée en microscopie confocale est généralement un laser Argon ou
30 Argon-Krypton qui peut endommager les échantillons biologiques.

[0009] Un autre inconvénient est que les sources excitatrices ne permettent pas de couvrir aisément toute la

gamme de longueurs d'onde nécessaire à l'observation en fluorescence.

[0010] Enfin, la microscopie confocale est une technique extrêmement sophistiquée qui requiert une grande
5 précision lors de la manipulation et qui est en outre onéreuse.

Buts de l'invention

[0011] La présente invention vise à fournir un
10 procédé et un dispositif qui permettent d'obtenir, par microscopie, des images en trois dimensions et de mesurer en trois dimensions la fluorescence issue d'un échantillon, en particulier d'un échantillon biologique épais, et qui ne présentent pas les inconvénients des techniques de
15 microscopie classiques, y compris ceux de la microscopie confocale.

[0012] En particulier, la présente invention vise à fournir un procédé et un dispositif qui permettent à la fois d'obtenir des images en trois dimensions de
20 l'échantillon et du champ de fluorescence de cet échantillon, c'est-à-dire d'obtenir des informations sur la répartition de la fluorescence sur l'ensemble du volume de l'échantillon, et éventuellement de suivre leur évolution au cours du temps et cela, avec un décalage de temps
25 minimal entre chaque prise d'images.

[0013] Un autre but de l'invention est de fournir un procédé et un dispositif qui ne nécessitent pas une manipulation trop complexe et dont le coût soit compétitif, notamment par rapport à la microscopie confocale.

30

Résumé de l'invention

[0014] La présente invention se rapporte à un procédé et un dispositif qui permettent d'obtenir des

images en trois dimensions d'un échantillon, de préférence un échantillon biologique épais, et d'obtenir le champ de fluorescence en trois dimensions émis par ledit échantillon par le couplage de signaux interférométriques obtenus par
5 holographie digitale et de signaux de fluorescence.

[0015] On entend par « échantillon épais » un échantillon dont les dimensions sont telles qu'il est impossible d'avoir une image nette simultanément sur toute la profondeur de l'échantillon par un procédé de
10 microscopie optique classique.

[0016] En réalité, un premier objet de la présente invention vise donc à proposer un procédé pour obtenir par microscopie des images en trois dimensions d'un échantillon, en particulier d'un échantillon biologique
15 épais, et du champ de fluorescence émis par cet échantillon, caractérisé en ce qu'il comprend:

- une étape de mesure et enregistrement, au cours de laquelle on mesure et enregistre de façon séquentielle et indépendante d'une part des signaux
20 interférométriques obtenus par holographie digitale et d'autre part des signaux de fluorescence, issus de l'échantillon ;
- une étape de traitement, au cours de laquelle on combine lesdits signaux interférométriques obtenus par
25 holographie digitale et lesdits signaux de fluorescence ainsi enregistrés, de manière à reconstruire des images nettes, en trois dimensions, de l'échantillon lui-même et du champ de fluorescence émis par ledit échantillon à un instant donné.

30 [0017] De préférence, on réitère au cours du temps lesdites étapes de mesure et enregistrement, et de traitement, de manière à suivre l'évolution des images en

trois dimensions de l'échantillon et du champ de fluorescence dudit échantillon.

[0018] De manière avantageuse, la combinaison des signaux interférométriques obtenus par holographie digitale et des signaux de fluorescence pour reconstruire les images nettes en trois dimensions de l'échantillon étudié lui-même et du champ de fluorescence dudit échantillon, se fait par analyse numérique.

[0019] Un second objet de la présente invention vise à proposer un dispositif pour la mise en œuvre du procédé décrit ci-dessus et qui comprend un microscope fonctionnant en holographie digitale, combiné à une source d'excitation de la fluorescence.

[0020] De préférence, la source d'excitation en fluorescence fonctionne en mode de réflexion ou de transmission.

[0021] Avantageusement, le microscope fonctionnant en holographie digitale comprend une source de lumière partiellement cohérente, ou éventuellement cohérente, fonctionnant en transmission et qui est capable de générer un faisceau lumineux source.

[0022] Selon une première forme d'exécution préférée de l'invention, la source de lumière partiellement cohérente dudit microscope comprend les éléments suivants : une source émettrice de lumière de largeur spectrale réduite, une première lentille, une première ouverture, une seconde lentille, une seconde ouverture et une troisième lentille, la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, la lumière émise par la source émettrice de lumière rencontre successivement la première lentille, la première ouverture, la seconde lentille, la seconde ouverture et la troisième

lentille et la lumière à la sortie la troisième lentille est une lumière collimatée.

[0023] Selon une autre forme d'exécution préférée de l'invention, la source de lumière partiellement cohérente dudit microscope comprend les éléments suivants :
une source émettrice de lumière de largeur spectrale réduite, une fibre optique, une première lentille, une seconde lentille, une troisième lentille et une ouverture à ouverture réglable, la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, la lumière émise par la source émettrice de lumière traverse d'abord la fibre optique de manière à avoir un champ lumineux homogène, puis rencontre la première lentille puis la seconde lentille et la troisième
10 lentille pour obtenir une lumière collimatée sur l'ouverture.

[0024] Selon une autre forme d'exécution préférée de l'invention, la source de lumière partiellement cohérente dudit microscope comprend les éléments suivants :
20 une source laser, une première lentille, un diffuseur tournant, une seconde lentille et une ouverture, la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, le faisceau laser émis par la source laser rencontre d'abord la première lentille,
25 puis le diffuseur tournant qui est placé derrière le point focal de ladite première lentille, puis la deuxième lentille placée à sa distance focale par rapport au plan du diffuseur tournant, puis ladite ouverture.

[0025] Selon une autre forme d'exécution préférée de l'invention, la source de lumière partiellement cohérente dudit microscope comprend les éléments suivants : une source laser, une première lentille, un diffuseur tournant tel qu'un verre dépoli, et une seconde lentille, la
30

- disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, le faisceau laser émis par la source laser traverse d'abord la première lentille puis le diffuseur puis la deuxième lentille, le faisceau laser à la sortie de la première lentille étant focalisé en un point de focalisation situé en amont du diffuseur à une distance réglable du diffuseur. Une telle source est utilisée avec le microscope holographique de la présente invention sans la présence des lentilles dudit microscope.
- 10 [0026] De préférence, le microscope fonctionnant en holographie digitale comprend en outre:
- un premier sous-ensemble, mobile, comprenant un séparateur de faisceau et un miroir, pour former deux faisceaux parallèles, un faisceau objet et un faisceau de référence à partir du faisceau lumineux source ;
 - 15 - des moyens, de préférence des miroirs, pour diriger le faisceau lumineux source sur le premier sous-ensemble, au niveau du séparateur de faisceau ;
 - un deuxième sous-ensemble, fixe ou mobile, comprenant également un séparateur de faisceau et un miroir, pour combiner ledit faisceau objet et ledit faisceau de référence en un faisceau lumineux recombiné ;
 - 20 - une cellule objet comprenant un échantillon à étudier, disposée sur le trajet optique du faisceau objet entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble ;
 - 25 - un premier objectif de microscope, sur le trajet optique du faisceau objet entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble, en aval de la cellule objet ;
 - des moyens de compensation de chemin optique, disposés sur le trajet optique du faisceau de référence entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble ;
 - 30 - un deuxième objectif de microscope, disposé sur le trajet optique du faisceau de référence entre le premier

- sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble, en aval desdits moyens de compensation de chemin optique ;
- des premiers moyens de focalisation aptes à focaliser le faisceau objet sur la cellule objet ;
 - 5 - et des seconds moyens de focalisation aptes à focaliser le faisceau de référence sur lesdits moyens de compensation de chemin optique.

[0027] De préférence, lesdits moyens de compensation de chemin optique comprennent une cellule de référence
10 comparable à la cellule objet mais ne comprenant pas l'échantillon à étudier.

[0028] De préférence, lesdits moyens de compensation de chemin optique comprennent un matériau transparent d'épaisseur et de composition adéquates.

15 [0029] Des moyens d'enregistrement et de traitement, tels que de préférence une caméra CCD couplée à des moyens informatiques de traitement et d'analyse d'images, peuvent également être prévus pour enregistrer et traiter lesdits signaux interférométriques et lesdits signaux de
20 fluorescence, ainsi que des moyens de focalisation additionnels pour focaliser ledit faisceau lumineux recombinaison sur lesdits moyens d'enregistrement.

[0030] Selon un troisième objet, la présente invention se rapporte directement au microscope, capable
25 d'être utilisé selon le procédé selon l'invention et, fonctionnant en holographie digitale et comprenant :

- une source de lumière partiellement cohérente, capable de générer un faisceau lumineux source;
- un premier sous-ensemble, mobile, comprenant un
30 séparateur de faisceau et un miroir, pour former deux faisceaux parallèles, un faisceau objet et un faisceau de référence à partir du faisceau lumineux source ;

- des moyens, de préférence des miroirs, pour diriger le faisceau lumineux source sur le premier sous-ensemble, au niveau du séparateur de faisceau ;
- un deuxième sous-ensemble, fixe ou mobile, comprenant également un séparateur de faisceau et un miroir, pour combiner ledit faisceau objet et ledit faisceau de référence en un faisceau lumineux recombinaé;
- une cellule objet comprenant un échantillon à étudier, disposée sur le trajet optique du faisceau objet entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble ;
- un premier objectif de microscope, sur le trajet optique du faisceau objet entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble, en aval de la cellule objet ;
- des moyens de compensation de chemin optique, disposés sur le trajet optique du faisceau de référence entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble ;
- un deuxième objectif de microscope, disposé sur le trajet optique du faisceau de référence entre le premier sous-ensemble et le deuxième sous-ensemble, en aval desdits moyens de compensation de chemin optique;
- des premiers moyens de focalisation aptes à focaliser le faisceau objet sur la cellule objet ;
- et des seconds moyens de focalisation aptes à focaliser le faisceau de référence sur lesdits moyens de compensation de chemin optique.

[0031] Selon une première forme d'exécution préférée, la source de lumière partiellement cohérente comprend les éléments suivants : une source émettrice de lumière de largeur spectrale réduite, une première lentille, une première ouverture, une seconde lentille, une seconde ouverture et une troisième lentille, la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, la lumière émise par la source

émettrice de lumière rencontre successivement la première lentille, la première ouverture, la seconde lentille, la seconde ouverture et la troisième lentille et la lumière à la sortie la troisième lentille est une lumière collimatée.

5 [0032] Selon une autre forme d'exécution préférée de l'invention, la source de lumière partiellement cohérente comprend les éléments suivants : une source émettrice de lumière de largeur spectrale réduite, une fibre optique, une première lentille, une seconde lentille, une troisième
10 lentille et une ouverture à ouverture réglable, la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, la lumière émise par la source émettrice de lumière traverse d'abord la fibre optique de manière à avoir un champ lumineux homogène, puis
15 rencontre la première lentille puis la seconde lentille et la troisième lentille pour obtenir une lumière collimatée sur l'ouverture.

[0033] Selon une autre forme d'exécution préférée de l'invention, la source de lumière partiellement cohérente
20 dudit microscope comprend les éléments suivants : une source laser, une première lentille, un diffuseur tournant, une seconde lentille et une ouverture, la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, le faisceau laser émis
25 par la source laser traverse d'abord la première lentille, puis le diffuseur tournant qui est placé derrière le point focal de ladite première lentille, puis la deuxième lentille placée à sa distance focale par rapport au plan du diffuseur tournant, puis ladite ouverture.

30 [0034] Selon une autre forme d'exécution préférée de l'invention, la source de lumière partiellement cohérente comprend les éléments suivants : une source laser, une première lentille, un diffuseur tournant tel qu'un verre

dépoli, et une seconde lentille, la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, le faisceau laser émis par la source laser traverse d'abord la première lentille puis le diffuseur
5 puis la deuxième lentille, le faisceau laser à la sortie de la première lentille étant focalisé en un point de focalisation situé en amont du diffuseur à une distance réglable du diffuseur. Une telle source est utilisée avec le microscope holographique de la présente invention sans
10 la présence des lentilles et dudit microscope.

[0035] En outre, lesdits moyens de compensation de chemin optique comprennent une cellule de référence comparable à la cellule objet mais ne comprenant pas l'échantillon à étudier, ou un matériau transparent
15 d'épaisseur et de composition adéquates.

Brève description des figures

[0036] La figure 1 représente une première forme
20 d'exécution d'une source partiellement cohérente spatiale selon la présente invention et réalisée à partir d'une source spatialement incohérente.

[0037] La figure 2 représente une deuxième forme
25 d'exécution d'une source partiellement cohérente spatiale selon la présente invention et réalisée à partir d'une source spatialement incohérente.

[0038] La figure 3 représente une troisième forme
d'exécution d'une source partiellement cohérente spatiale selon la présente invention et réalisée à partir d'une
30 source cohérente spatiale.

[0039] La figure 4 représente une quatrième forme
d'exécution d'une source partiellement spatiale cohérente

selon la présente invention et réalisée à partir d'une source cohérente spatiale.

[0040] La figure 5 représente une forme préférée d'exécution du dispositif selon la présente invention, 5 utilisant une source partiellement cohérente spatiale telle que décrite à la figure 2.

Description détaillée de plusieurs formes d'exécution de l'invention

10 *Sources lumineuses utilisées pour l'holographie digitale*

[0041] Un premier type de source lumineuse utilisable dans le dispositif selon la présente invention correspond à une source partiellement cohérente telle que représentée à la figure 1. Une lentille L1 achromatique 15 collimate les faisceaux lumineux émis par une source incohérente spatiale étendue filtrée en longueur d'onde, par exemple une LED (diode émettrice de lumière), vers un premier iris A1 à ouverture réglable. L'ouverture A1 limite le spectre angulaire de la source afin d'augmenter la 20 cohérence spatiale de la lumière. Une seconde lentille L2 achromatique crée une source secondaire en son plan focal où, un second iris A2 limite la taille de la source. Une troisième lentille L3 forme un faisceau collimaté. Les distances focales de L1, L2, L3 sont, par exemple, de 25 100 mm pour l'holographie digitale.

[0042] Un deuxième type de source lumineuse utilisable dans le dispositif selon la présente invention correspond à une source partiellement cohérente telle que représentée à la figure 2. Une lentille L1 collimate les 30 faisceaux lumineux émis par une source incohérente spatiale étendue filtrée en longueur d'onde, par exemple une LED (diode émettrice de lumière). Afin d'obtenir un champ lumineux homogène, les faisceaux lumineux de cette source

peuvent être acheminés par une fibre optique, dont le cœur est liquide, depuis la LED vers la lentille L1. Le jeu de lentilles L2 et L3 forme un faisceau collimaté. Le filtre spatial A1 limite le spectre angulaire de la source afin
5 d'augmenter la cohérence spatiale de la lumière.

[0043] Il est également possible d'utiliser dans le dispositif selon la présente invention une source laser rendue partiellement incohérente. La figure 3 représente le principe de fonctionnement d'une telle source classiquement
10 utilisée en optique. Un faisceau laser à faisceau parallèle est focalisé par une lentille L1. Un diffuseur tournant D est placé derrière le point focal de manière à former une tache lumineuse dont le diamètre est suffisant pour éclairer le champ de vue du microscope. Le diffuseur crée
15 un champ de « speckle » (granulosité laser) qui varie avec la rotation du diffuseur. Une lentille L2 est placée à sa distance focale par rapport au plan du diffuseur tournant.

[0044] Une ouverture A est ensuite placée derrière la lentille de manière à pouvoir élargir la dimension de la
20 taille des grains de « speckle ». En utilisant une rotation du moteur suffisamment rapide par rapport au temps d'exposition du système d'enregistrement d'images, on montre qu'une telle source est équivalente à une source partiellement cohérente spatiale telle que décrite ci-dessus. La largeur de la cohérence spatiale est directement
25 reliée à la dimension des grains de « speckle » qui est ajustée par le diamètre de l'ouverture.

[0045] Un autre type de source collimatée et partiellement cohérente à partir d'une source cohérente
30 utilisable dans le dispositif selon la présente invention est représenté à la figure 4. Un faisceau laser est focalisé au voisinage d'un verre dépoli (D) par une lentille (L1). Le dépoli diffuse la lumière. Une lentille

(L2) placée derrière le verre dépoli collimate la lumière diffusée par le dépoli. En ajustant la distance (d) entre le point de focalisation et le verre dépoli, on règle la dimension des grains de speckle du faisceau collimaté.

5

Microscope fonctionnant en holographie digitale

[0046] La figure 5 schématise le plan du microscope utilisé dans le dispositif selon la présente invention. L'interféromètre du microscope fonctionnant en holographie digitale est du type Mach Zehnder et comprend deux sous-ensembles SE1 et SE2. Chacun de ceux-ci comporte un séparateur de faisceau, respectivement BS1 et BS2, et un miroir, respectivement M1 et M2. La source S pour l'holographie digitale est une source partiellement cohérente telle que l'une de celles décrites ci-dessus. Ladite source S illumine le séparateur de faisceau BS1. Une partie du faisceau est transmis par BS1 et une partie est réfléchie vers le miroir M1.

[0047] Le premier sous-ensemble SE1 permet de former deux faisceaux lumineux parallèles, le faisceau objet O et le faisceau de référence R. Ce premier sous-ensemble SE1 est monté sur une table de rotation, alors que le second sous-ensemble SE2 est fixe ou mobile. Ceci permet de régler l'égalisation du trajet optique des deux faisceaux de l'interféromètre, le faisceau objet O et le faisceau de référence R.

[0048] Au niveau du faisceau objet, une lentille L4 focalise le faisceau lumineux sur l'objet ou l'échantillon contenu dans sa cellule d'observation So. L'objet est observé avec un objectif de microscope ML1 convenant à l'observation en fluorescence (les différents grossissements possibles en microscopie classique sont

utilisables). Le couple de lentilles L4-ML1 forme un système afocal. L'objectif ML1 réalise, en combinaison avec la lentille L6, l'image d'un plan passant au travers de l'échantillon.

5 [0049] Parallèlement, au niveau du faisceau de référence R, la lentille L5 focalise le faisceau lumineux, soit sur une cellule d'observation Sr, identique à celle comportant l'échantillon mais sans la présence de ce dernier, soit sur un matériau transparent de composition et
10 d'épaisseur adéquates, tel que par exemple du verre. Cette disposition permet d'optimiser l'égalisation du trajet optique des deux faisceaux de l'interféromètre.

[0050] Un objectif de microscope ML2, identique à ML1, est disposé sur le faisceau de référence. Le couple de
15 lentilles L5-ML2 constitue également un système afocal. Les chemins optiques ML1-L6 et ML2-L6 sont ajustés pour être identiques.

[0051] Le second sous-système SE2, qui comporte le miroir M2 et le séparateur de faisceau BS2, permet de
20 combiner le faisceau objet O et le faisceau de référence R. Les faisceaux objet O et de référence R combinés interfèrent au niveau du plan sensible de la caméra (référéncée C sur la figure 5).

[0052] Comme indiqué ci-dessous, l'implantation de
25 l'holographie digitale requiert la connaissance de l'amplitude optique mesurée dans un plan de netteté interceptant l'échantillon. L'amplitude optique peut être déterminée à partir des figures d'interférence par deux méthodes :

30 (i) la méthode de la porteuse ou de la transformée de Fourier. Par cette méthode les faisceaux objets et de référence sont incidents sur la caméra CCD avec

un petit angle de manière à obtenir, lorsque aucun échantillon n'est analysé, un réseau de franges d'interférence linéaire. La mesure de changement de phase optique introduit par l'échantillon se traduit alors par une variation de la forme des franges. La détermination de l'amplitude résulte d'une analyse par transformée de Fourier.

(ii) le miroir (M2) du sous-ensemble SE2 est muni d'un système de déplacement piézoélectrique suivant son axe optique qui permet de changer le chemin optique de référence par des fractions précises de longueur d'onde. Ceci permet d'implanter la technique dite de « phase-stepping » qui consiste à enregistrer plusieurs images déphasées d'une fraction constante de longueur d'onde. Par un traitement informatique, la combinaison de ces interférogrammes permet le calcul de l'amplitude lumineuse émergente de l'échantillon.

[0053] Le microscope peut fonctionner en mode microscopie directe ou inverse selon les besoins.

Dispositif pour la fluorescence

[0054] Sur la figure 5, la source d'excitation S' de la fluorescence est placée en mode de réflexion. Comme indiqué ci-dessus, on peut placer cette source pour fonctionner en mode de transmission.

Fluorescence en lumière réfléchie

[0055] [0056] Dans cette configuration qui correspond à celle représentée à la figure 5, la source S' est, soit une lampe à vapeur de mercure, soit une lampe

quartz-halogène, soit encore une source qui émet de la lumière dans une gamme de courtes longueurs d'onde nécessaire à l'excitation de la fluorescence. Cette source peut, le cas échéant être un laser. Les rayons lumineux, collimatés par une lentille, parviennent à un filtre d'excitation F1 sélectionné en fonction du fluorochrome utilisé et sont réfléchis par un miroir dichroïque adéquat MD sur l'échantillon au travers de l'objectif.

[0057] La lumière fluorescente émise par les fluorochromes contenus dans l'échantillon traverse le miroir dichroïque MD, transparent à ces longueurs d'onde plus longues, traverse un filtre d'arrêt F2 placé pour bloquer les éventuelles courtes longueurs d'onde, et est enregistrée par la caméra.

[0058] Des matériaux de composition et d'épaisseur adéquates, par exemple du verre, peuvent aussi être ajoutés dans le faisceau de référence pour optimiser l'égaleisation du trajet optique des deux faisceaux de l'interféromètre.

20 *Fluorescence en lumière transmise*

[0059] Pour cette configuration, il y a deux réalisations possibles:

- (i) une réalisation à une seule source : la seule source utilisée est celle prévue pour le microscope fonctionnant en holographie digitale mais est simultanément utilisée comme source excitatrice de la fluorescence car elle émet dans une gamme de courtes longueurs d'onde. Ceci permet de réaliser à la fois l'hologramme de l'objet et l'excitation des fluorochromes de l'échantillon.

- (ii) une réalisation à deux sources : On combine la source spécifique pour le microscope fonctionnant en holographie digitale à la source émettant la lumière nécessaire à l'excitation des fluorochromes des deux
- 5 manières suivantes : soit la source nécessaire à la fluorescence est placée juste avant le séparateur de faisceau BS1 soit, cette source est placée juste avant la lentille L4 qui focalise les rayons lumineux sur l'échantillon.

10

Couplage des signaux obtenus en holographie digitale et en fluorescence pour la reconstruction 3D des signaux de fluorescence

[0060] Comme décrit ci-dessus, l'instrument comporte

15 deux sous-systèmes optiques couplés qui permettent :

- (i) l'enregistrement des images interférométriques en transmission de l'échantillon
- (ii) l'enregistrement de l'image fluorescente de l'échantillon activée par la source d'excitation de la
- 20 fluorescence

[0061] Ces images sont formées par le système afocal constitué par le couple de lentilles ML1-L6 qui réalise l'image nette d'un plan perpendiculaire à l'axe optique de l'échantillon sur la face sensible de la caméra

25 C. Les images interférométriques et de fluorescence sont enregistrées séquentiellement :

- (i) la source de fluorescence est masquée par un obturateur et on enregistre la ou les images interférométriques.
- 30 (ii) la source permettant l'enregistrement interférométrique est masquée ou éteinte et on enregistre la ou les images de fluorescence.

[0062] Lorsque l'épaisseur de l'échantillon est plus petite que la profondeur de champ du dispositif d'imagerie, l'image de l'échantillon est nette partout. Par contre, et c'est le cas qui concerne le présent développement, lorsque
5 l'épaisseur de l'échantillon excède la profondeur de champ, les parties de l'échantillon au-delà de la zone de profondeur de champ donnent des parties floues dans l'image.

[0063] Comme l'échantillon est observé par une
10 caméra C grâce au système afocal de lentilles ML1-L6, les signaux interférométriques et de fluorescence sont parfaitement superposés au niveau du capteur et les plans de netteté sont communs pour les deux types d'illumination grâce à l'utilisation de composantes optiques ML1-L6
15 achromatiques.

Rôle de l'enregistrement interférométrique ou holographique

[0064] L'enregistrement interférométrique permet la mesure précise de l'amplitude optique complexe dans le plan
20 net de l'échantillon. La source interférométrique cohérente ou partiellement cohérente S est activée et illumine en faisceau collimaté le séparateur de faisceau BS1.

[0065] Une partie de ce faisceau, appelé faisceau objet, suit le trajet BS1-M1-L4-So-ML1-BS2-L6-C. La phase
25 et l'amplitude de ce faisceau sont modulées par l'échantillon contenu dans la cellule objet So.

[0066] L'autre partie du faisceau, appelé faisceau de référence, suit le trajet BS1-L5-Sr-ML2-M2-BS2-L6-C. La phase et l'amplitude de ce faisceau sont modulées par la
30 cellule de référence Sr.

[0067] Les faisceaux objet et de référence interfèrent sur la face sensible de la caméra (C). La forme de la figure d'interférence est influencée par les

changements relatifs de phase optique introduits par les échantillons So et Sr. Comme la cellule de référence Sr est une cellule expérimentale comparable à la cellule objet So mais sans l'échantillon étudié, la forme de la figure d'interférence n'est influencée de manière significative que par les changements de phase optique introduits par l'échantillon étudié.

[0068] Le premier objectif est de mesurer l'amplitude optique complexe émergente de l'échantillon à partir de la ou des figure(s) d'interférence mesurée(s) par la caméra. Pour cela, deux méthodes classiques en interférométrie sont disponibles :

- (i) La méthode de la transformée de Fourier [1]
- (ii) La méthode de décalage de phase.

[0069] Connaissant l'amplitude optique complexe dans le plan de netteté de l'échantillon, les méthodes d'holographie digitale permettent de calculer les amplitudes complexes dans des plans parallèles [2-6]. Ces méthodes consistent à calculer par des méthodes numériques le champ optique en utilisant les lois de propagation de l'optique de Fourier (Equation de Kirchhoff - Fresnel). On peut ainsi calculer les amplitudes lumineuses complexes dans des plans qui sont hors de la zone de profondeur de champ initiale du système d'imagerie. Ces méthodes permettent ainsi de rendre nettes des zones d'image qui ont été enregistrées floues.

[0070] Une amplitude optique complexe $u(x,y)$ dans un plan (x, y) s'écrit :

$$u(x,y) = \sqrt{I(x,y)} \exp\{i\alpha(x,y)\} \quad (1)$$

où :

$I(x,y)$ est l'intensité lumineuse au point (x,y)

$\alpha(x,y)$ est la phase optique au point (x,y)

i est le nombre imaginaire tel que $i^2 = -1$

[0071] La méthode interférométrique revient donc à

5 déterminer, dans le plan dont on réalise l'image, les quantités $I(x,y)$ et $\alpha(x,y)$ de manière à pouvoir calculer, par holographie digitale, l'amplitude optique $u_d'(x',y')$ dans les plans parallèles séparés par des distances d . Cette opération s'écrit formellement par :

10

$$u_d'(x',y') = R[d]u(x,y) \quad (2)$$

où $R[d]$ est l'opérateur de Kirchhoff-Fresnel.

Plusieurs implantations numériques de cette expression
15 existent dans la littérature [2].

Enregistrement du signal de fluorescence

[0072] La source de l'excitation de la fluorescence

étant activée, les substances fluorescentes réparties dans

20 l'échantillon émettent de manière isotrope de la lumière

qui donne lieu à un signal détecté par la caméra vidéo

(CCD). Si on considère l'émission par un point (x_0, y_0) de

l'échantillon situé à une distance d du plan dont on réalise

l'image par le couple de lentille ML1-L6, du fait que

25 l'objectif du microscope a une ouverture finie, le point

émetteur de fluorescence produit, dans le plan objet dont

on réalise l'image, un disque lumineux observable par la

caméra vidéo.

[0073] Cette répartition de l'intensité lumineuse

30 est notée $I_p(x-x_0, y-y_0)$ où l'indice p indique que l'on considère

le signal de fluorescence.

[0074] Le diamètre D du disque lumineux s'exprime, en première approximation, par :

$$D = \frac{d}{fnumber_{ML1}} \quad (3)$$

5

où $fnumber_{ML1}$ est le rapport de la distance focale de ML1 par le diamètre de son ouverture.

[0075] Il est à noter que l'équation (3) doit être corrigée pour les très petites distances d avec lesquelles
 10 il faut considérer les effets de diffraction en illumination incohérente. Toutefois, pour ces distances d , l'image du point source se trouve dans la zone de profondeur de champ et ne nécessite donc aucune manipulation ultérieure sur la netteté.

15 [0076] Dans le cas d'échantillons plus complexes comportant plusieurs zones d'émission qui peuvent se trouver à des distances d différentes du plan de netteté, on obtient une répartition d'intensité lumineuse qui s'exprime comme la somme de contributions élémentaires

20 $I_p(x-x_0, y-y_0)$.

Couplage entre l'amplitude complexe du signal d'holographie digitale et du signal de fluorescence

[0077] Le concept qui fait l'objet de la présente
 25 demande de brevet est le couplage du signal d'holographie digitale et le signal de fluorescence de manière à pouvoir manipuler le signal de fluorescence et à pouvoir remettre nets, par procédé numérique d'holographie digitale, des signaux de fluorescence qui auraient été enregistrés flous.

30 [0078] Pour que ce couplage puisse se faire, il faut que les régions au sein de l'échantillon biologique qui présentent une fluorescence aient des propriétés optiques

(absorbance optique et/ou indice de réfraction) distinctes des régions non fluorescentes qui les entourent. Il faut remarquer que cette condition est satisfaite dans de nombreuses applications en biologie cellulaire, puisque la
 5 fluorescence permet le marquage d'organites cellulaires qui sont également visibles par la microscopie optique en contraste de phase. Cette mise en évidence par contraste de phase démontre une variation locale d'indice de réfraction et/ou d'absorbance des organites.

10 [0079] Si on considère une zone limitée de fluorescence au niveau de l'échantillon biologique qui est également une zone de changement local d'indice et/ou d'absorbance par rapport à un fond constant et si on suppose que cette zone se trouve à une distance d du plan
 15 de netteté de l'échantillon, la zone de fluorescence, comme décrit précédemment, donne lieu à une tache lumineuse d'intensité $I_p(x-x_0, y-y_0)$. L'amplitude lumineuse mesurée par interférométrie est donnée par l'équation (1) :

$$20 \quad u(x, y) = \sqrt{I(x, y)} \exp\{i\alpha(x, y)\}$$

[0080] Dans un premier temps, on construit une amplitude équivalente de fluorescence par :

$$25 \quad u_p(x, y) = A \sqrt{I_p(x-x_0, y-y_0)} \sqrt{I(x, y)} \exp\{i\alpha(x, y)\} \quad (4)$$

où A est une constante multiplicative qui ne joue pas de rôle déterminant dans la discussion présente.

L'équation (4) pondère l'amplitude interférométrique par
 30 l'intensité de fluorescence de manière à amplifier la zone influencée par la fluorescence.

[0081] On applique ensuite la reconstruction par holographie digitale pour reconstruire l'image nette de la fluorescence :

$$5 \quad u_p'(x', y') = R[-d]u_p(x, y) \quad (5)$$

[0082] On calcule ensuite l'intensité lumineuse $u_p'(x', y')u_p'(x', y')$ pour obtenir l'image nette d'intensité de la tache de fluorescence.

10 [0083] En pratique, on mesure l'amplitude lumineuse d'interférométrie et la tache de lumière fluorescente sans connaître la distance d . On applique alors la technique de reconstruction par holographie digitale de manière incrémentale pour atteindre l'image la plus nette de la
15 tache de fluorescence.

[0084] Si on considère à présent le cas où au sein de l'échantillon l'on a plusieurs zones limitées avec des variations d'indice de réfraction et/ou d'absorbance parmi lesquelles seules certaines de ces zones présentent une
20 émission de fluorescence, deux cas peuvent se présenter :

- (i) 1^{er} cas : Les signaux d'interférométrie et de fluorescence sont séparés dans le plan net de l'échantillon. Dans ce cas, on peut directement utiliser la méthode telle que décrite ci-dessus.
- 25 (ii) 2^{ème} cas : Les signaux d'interférométrie et de fluorescence se recouvrent au moins partiellement dans le plan net de l'échantillon.

[0085] Dans ce cas deuxième cas, l'utilisation de la méthode telle que décrite ci-dessus peut donner lieu à des
30 reconstructions fausses de zones fluorescentes qui en réalité ne le sont pas. En effet, si on considère d'une part les signaux d'interférométrie dus à deux zones de variations d'indice et/ou d'absorbance qui se superposent

et d'autre part qu'une seule de ces deux zones présente de la fluorescence, comme la tache de fluorescence recouvre au moins partiellement les signaux interférométriques provenant des deux zones, l'utilisation de la méthode précédente donnera une contribution significative à la fluorescence pour les deux zones. Dans ce cas, de nombreuses méthodes de correction peuvent être implantées de manière à ne reconstruire que la zone pertinente. On citera, à titre d'exemple, une procédure itérative de correction. La distribution de fluorescence initiale dans le plan de netteté sera appelée D0. A la première itération, on utilise la méthode précédente de reconstruction holographique qui donne des contributions en fluorescence pour les deux zones. Le résultat de cette reconstruction sera appelé la configuration C1. On calcule ensuite, en utilisant les lois de propagation de l'optique incohérente, la distribution de lumière de fluorescence, appelée D1, dans le plan de netteté de l'échantillon qui correspond à C1. On compare D1 et D0 de manière à appliquer une correction à C1 et à obtenir une seconde configuration C2. On calcule de là une nouvelle distribution de fluorescence D2 par les lois de l'optique incohérente et on répète ainsi le processus itératif de correction jusqu'à obtenir une différence suffisamment faible entre la distribution de fluorescence DN (N^{ème} itération) calculée par les lois de l'optique incohérente et la distribution de fluorescence D0. De nombreuses méthodes d'optimisation numérique permettent l'implantation d'un tel processus d'optimisation. A titre d'exemple, on peut citer les méthodes de recuit simulé basées sur la recherche aléatoire de la minimalisation d'une fonction coût qui dans le cas présent pourrait être $(DN-D0)^2$ [7].

[0086] En résumé, la présente invention consiste à combiner un dispositif de fluorescence avec un microscope fonctionnant en holographie digitale pour la mesure en trois dimensions des zones fluorescentes de micro-échantillons et offre de nombreux avantages par rapport aux techniques actuellement connues.

[0087] Un premier avantage est que la présente invention, comparativement à la microscopie classique en fluorescence, permet d'obtenir une image tridimensionnelle de la fluorescence sans que l'on n'ait besoin de déplacer l'échantillon suivant l'axe optique du système.

[0088] En outre, dans la présente invention, l'information de phase et d'amplitude fournie par l'holographie digitale permet d'éliminer, en chaque point, la fluorescence parasite par traitement numérique.

[0089] Par rapport à la microscopie confocale, la présente invention présente également des avantages particuliers.

[0090] Un de ces avantages est que l'invention est beaucoup moins complexe à mettre en œuvre que la microscopie confocale.

[0091] Un autre avantage est qu'elle permet d'utiliser une gamme étendue de sources lumineuses pour générer le signal de fluorescence, et étend donc la gamme de longueurs d'onde disponible pour couvrir les applications. Cela permet en outre d'utiliser des sources moins agressives vis-à-vis des échantillons biologiques.

[0092] On notera également que, par rapport à la microscopie confocale, la présente invention permet d'enregistrer les informations sur tout l'échantillon de manière simultanée sur le volume et avec un décalage très faible entre chaque prise (typiquement 1/25 s) pour l'enregistrement de la fluorescence, de telle sorte que la

distorsion temporelle introduite par le balayage de la microscopie confocale est éliminée.

[0093] En conclusion, la méthode proposée dans la présente invention, qui consiste à coupler des signaux
5 d'interférométrie avec des signaux de fluorescence, permet de localiser en trois dimensions, et de rendre nettes, les régions qui présentent une fluorescence au sein d'un échantillon. Cette méthode est susceptible de trouver des applications intéressantes dans le domaine de l'embryologie
10 où les biologistes souhaitent analyser l'évolution et la dynamique d'embryons vivants qui présentent très rapidement des épaisseurs qui excèdent la profondeur de champ des microscopes optiques. La présente invention peut ainsi permettre, par exemple, une analyse *a posteriori* en trois
15 dimensions du mouvement des cellules marquées par des fluorochromes.

[0094] En outre, le microscope holographique selon la présente invention, présente également un certain nombre d'avantages par rapport aux dispositifs de l'état de la
20 technique, en particulier par rapport au microscope holographique décrit dans l'article « Improved three-dimensional imaging with digital holography microscope using a partial spatial coherent source », F. Dubois et
al., *Appl. Opt.* 38, pp.7085-7094 (1999).

25 [0095] En effet, comparativement au microscope holographique décrit dans cette publication, dans le microscope holographique selon la présente invention, la lentille L4 et la lentille L5 qui permettent de focaliser la lumière au niveau, respectivement de la cellule objet et
30 de la cellule de référence (ou d'autres moyens de compensation de chemin optique), sont situées dans l'interféromètre lui-même, précisément devant les objectifs, respectivement ML1 et ML2, et non plus en dehors

de l'interféromètre. De ce fait, les rayons lumineux qui parviennent au séparateur de faisceau BS1 sont collimatés à l'aide des miroirs M (figure 5) et la position du point de focalisation ne se modifie pas lorsque la position du rayon incident par rapport à l'axe optique varie. Cette caractéristique permet une utilisation beaucoup plus efficace de la table de rotation et une égalisation plus facile des trajets optiques des faisceaux de référence et objet. Cette possibilité de réglage est essentielle dans un microscope holographique comportant une source de lumière partiellement cohérente.

[0096] De plus, dans le microscope holographique selon la présente invention, la présence soit de la cellule d'observation de référence S_r , comparable à la cellule S_o qui elle contient l'échantillon, soit d'un matériau transparent d'épaisseur et composition adéquates permet encore d'améliorer l'égalisation des trajets optiques objet O et de référence R.

[0097] Enfin, comparativement à cette publication, le microscope selon la présente invention offre la possibilité d'utiliser trois autres types de sources partiellement cohérentes qui s'avèrent supérieures à celle utilisée dans la publication.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, "Fourier transform
method of fringe pattern analysis for computer based
5 topography and interferometry", J. Opt. Soc. Am. 72,
156-160 (1972)
2. F. Dubois, L. Joannes, J.-C. Legros, "Improved three-
dimensional imaging with digital holography microscope
using a partial spatial coherent source " Appl. Opt.
10 38, 7085-7094 (1999)
3. E.Cuche, F.Bevilacqua and C. Depeursinge, "Digital
holography for quantitative phase contrast imaging",
Opt. Lett. 24, 291-293 (1999)
4. T. Zhang and I. Yamaguchi, "Three-dimensional
15 microscopy with phase-shifting digital holography",
Opt. Lett. 23, 1221-1223 (1998).
5. Skarman, Wozniac and Becker "Simultaneous 3D-PIV and
temperature measurement using a New CCD based
holographic interferometer", Flow Meas. Instr. 7, N°1,
20 pp 1-6 (1996)
6. Y. Takaki and H. Ohzu, "Hybrid holographic microscopy:
Vizualization of three-dimensional object information
by use of viewing angles", Appl. Opt. 39, 5302-5308
(2000)
- 25 7. S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, Jr., M.P. Vecchi,
"Optimization by Simulated Annealing", Sciences 220,
671-679 (1983)
8. B. W.Schilling, T-C Poon, G. Indebetouw, B. Storrie,
K. Shinoda, Y. Suzuki and M. H. Wu, "Three-dimensional
30 holographic fluorescence microscopy", Optics Letters
22, n°19, 1506-1508 (1997)

REVENDICATIONS

1. Microscope capable de fonctionner en holographie digitale comprenant :

- 5 - une source de lumière partiellement cohérente, capable de générer un faisceau lumineux source;
- 10 - un premier sous-ensemble (SE1) mobile, comprenant un séparateur de faisceau (BS1) et un miroir (M1), pour former deux faisceaux parallèles, un faisceau objet (O) et un faisceau de référence (R) à partir du faisceau lumineux source;
- 15 - un deuxième sous-ensemble (SE2), comprenant également un séparateur de faisceau (BS2) et un miroir (M2), pour combiner ledit faisceau objet (O) et ledit faisceau de référence (R) en un faisceau lumineux recombiné;
- 20 - une cellule objet (So) comprenant un échantillon à étudier, disposée sur le trajet optique du faisceau objet (O) entre le premier sous-ensemble (SE1) et le deuxième sous-ensemble (SE2);
- 25 - un premier objectif de microscope (ML1), sur le trajet optique du faisceau objet (O) entre le premier sous-ensemble (SE1) et le deuxième sous-ensemble (SE2), en aval de la cellule objet (So);
- 30 - un deuxième objectif de microscope (ML2), disposé sur le trajet optique du faisceau de référence (R) entre le premier sous-ensemble (SE1) et le deuxième sous-ensemble (SE2);
- des moyens d'enregistrement(C) pour enregistrer des signaux interférométriques produits par le faisceau lumineux recombiné; et
- des moyens de focalisation supplémentaires(L6) pour focaliser ledit faisceau lumineux recombiné sur lesdits moyens d'enregistrement (C), lesdits moyens d'enregistrement (C) étant situés dans le plan focal

arrière des moyens de focalisation supplémentaires (L6), permettant un réglage du deuxième sous-ensemble (SE2) sans modification de la focalisation sur lesdits moyens d'enregistrement (C).

5 2. Le microscope selon la revendication 1, dans lequel les objectifs de microscope (ML1, ML2) et différents moyens de focalisation (L4, L5, L6) sont disposés de façon à ne pas modifier leur focalisation lors de mouvements du premier sous-ensemble (SE1) ou du second
10 sous-ensemble (SE2), lesdits mouvements permettant l'égalisation des chemins optiques des faisceaux objet et de référence.

 3. Le microscope selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, comprenant en outre des moyens de
15 compensation de chemin optique, disposés sur le trajet optique du faisceau de référence (R) entre le premier sous-ensemble (SE1) et le deuxième sous-ensemble (SE2), le deuxième objectif de microscope (ML2) étant en aval desdits moyens de compensation de chemin optique.

20 4. Le microscope selon la revendication 3, dans lequel lesdits moyens de compensation de chemin optique comprennent une cellule de référence (Sr) comparable à la cellule objet (So) mais ne comprenant pas l'échantillon à étudier, ou un matériau transparent
25 d'épaisseur et de composition adéquates.

 5. Le microscope selon l'une quelconque des revendications 3 ou 4, comprenant en outre des premiers moyens de focalisation (L4) aptes à focaliser le faisceau objet (O) sur la cellule objet (So) et des seconds moyens
30 de focalisation (L5) aptes à focaliser le faisceau de référence (R) sur lesdits moyens de compensation de chemin optique.

6. Le microscope selon la revendication 5, dans lequel les premiers moyens de focalisation (L4) forment avec le premier objectif de microscope (ML1) un système afocal et les seconds moyens de focalisation (L5) forment avec le second objectif de microscope (ML5) un système afocal.

7. Le microscope selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, comprenant des moyens (M) pour diriger le faisceau lumineux source sur le premier sous-ensemble (SE1), au niveau du séparateur de faisceau (BS1).

8. Le microscope selon la revendication 7, dans lequel les moyens (M) pour diriger le faisceau lumineux comprennent des miroirs.

9. Le microscope selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel le deuxième sous-ensemble (SE2) est fixe ou mobile.

10. Le microscope selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, comprenant des moyens de traitement du signal permettant de traiter lesdits signaux interférométriques selon la méthode de la porteuse, la méthode de la transformée de Fourier ou par la technique de décalage de phase.

11. Le microscope selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel que la source de lumière partiellement cohérente comprend les éléments suivants : une source émettrice de lumière de largeur spectrale réduite (S), une première lentille (L1), une première ouverture (A1), une seconde lentille (L2), une seconde ouverture (A2) et une troisième lentille (L3), la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, la lumière émise par la source émettrice de lumière rencontre successivement la

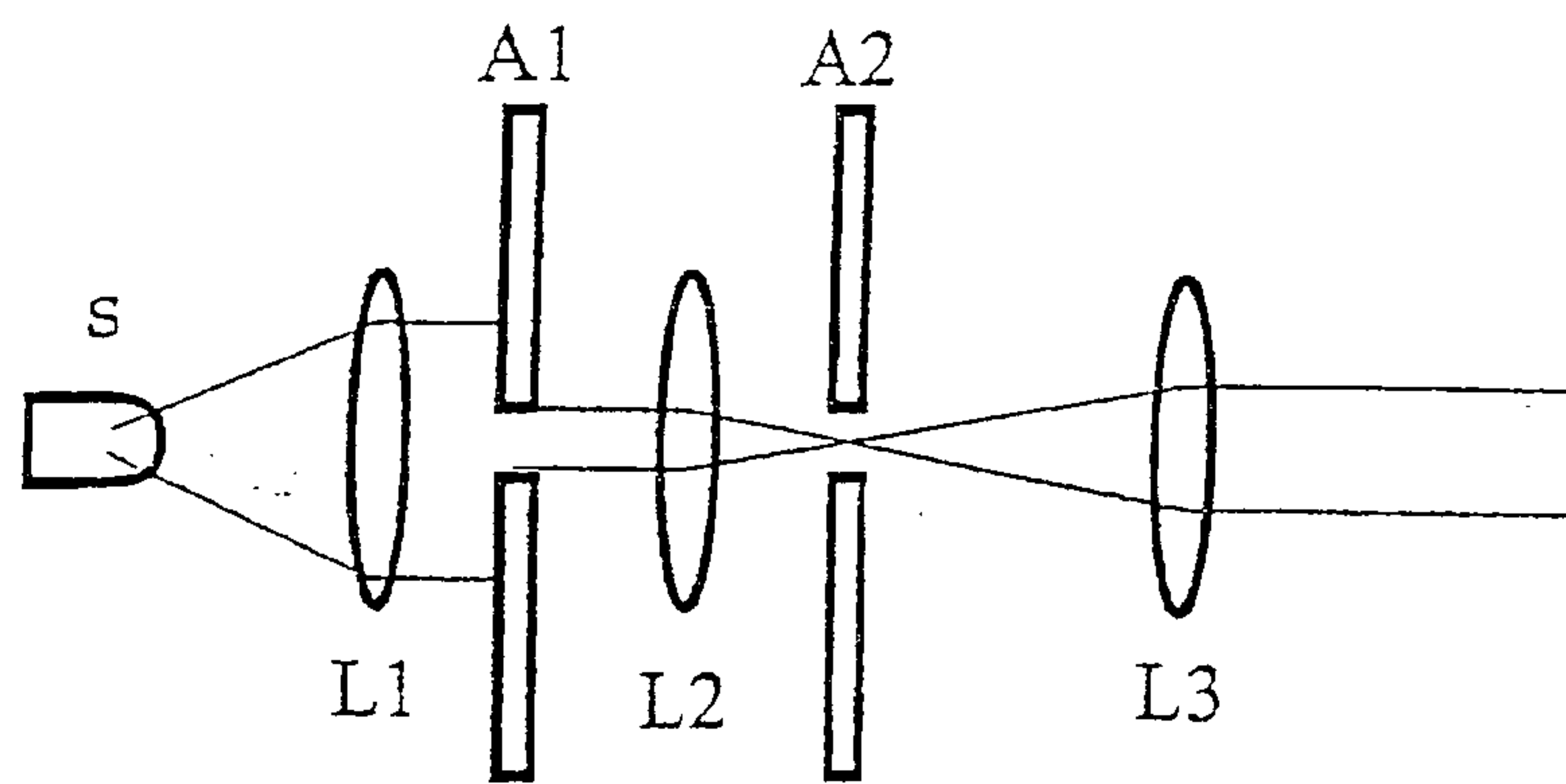
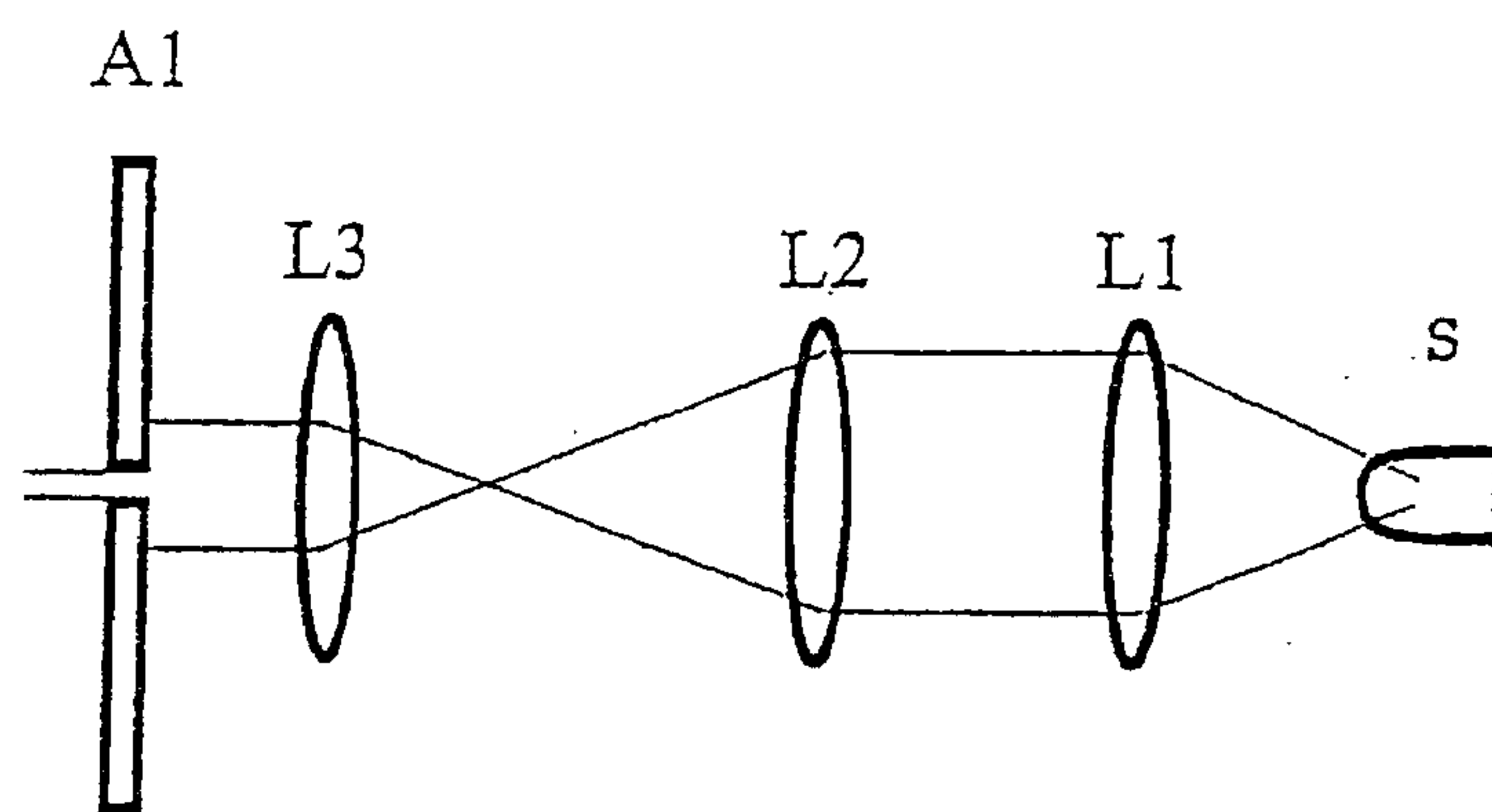
première lentille (L1), la première ouverture (A1), la seconde lentille (L2), la seconde ouverture (A2) et la troisième lentille (L3) et la lumière à la sortie la troisième lentille est une lumière collimatée.

- 5 **12.** Le microscope selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel la source de lumière partiellement cohérente comprend les éléments suivants : une source émettrice de lumière de largeur spectrale réduite (S), une fibre optique, une première lentille (L1),
- 10 une seconde lentille (L2), une troisième lentille (L3) et une ouverture (A1) à ouverture réglable, la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, la lumière émise par la source émettrice de lumière traverse d'abord la fibre optique de
- 15 manière à avoir un champ lumineux homogène, puis rencontre la première lentille (L1) puis la seconde lentille (L2) et la troisième lentille (L3) pour obtenir une lumière collimatée sur l'ouverture (A1).

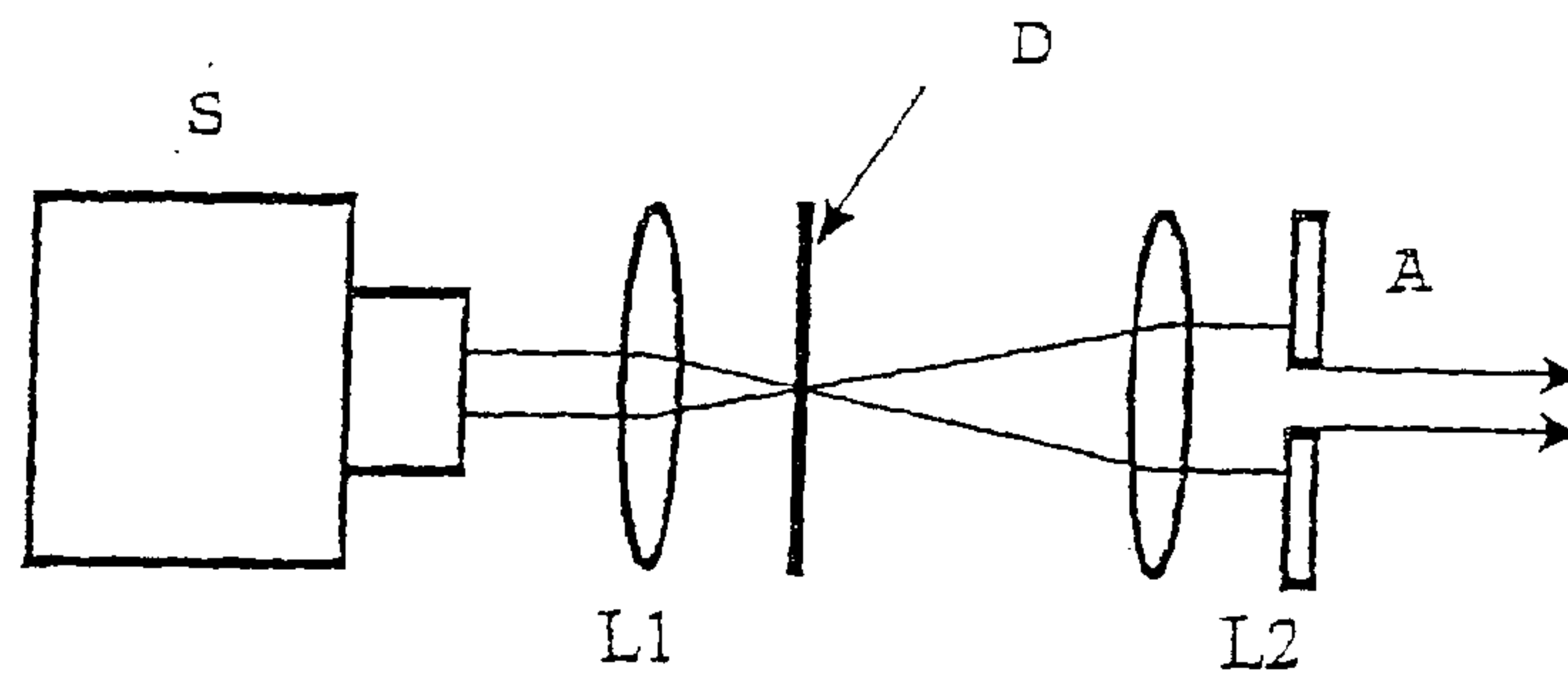
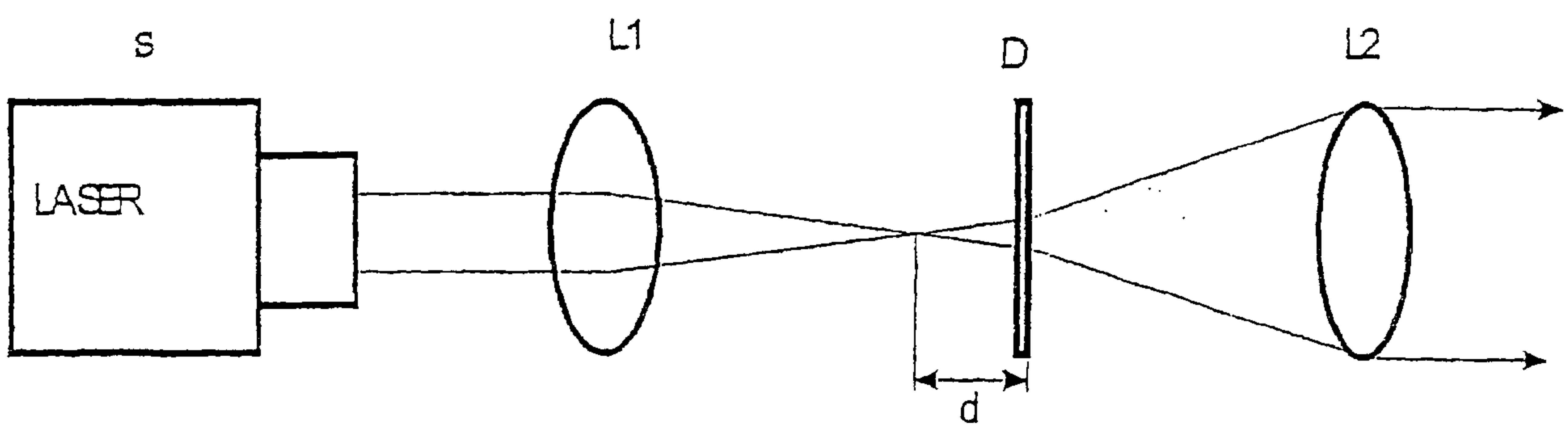
- 13.** Microscope selon l'une quelconque des
- 20 revendications 1 à 10, dans lequel que la source de lumière partiellement cohérente dudit microscope comprend les éléments suivants :
- une source laser (S), une première lentille (L1), un diffuseur tournant (D), une seconde lentille (L2) et une
- 25 ouverture (A), la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, le faisceau laser émis par la source laser traverse d'abord la première lentille (L1), puis le diffuseur tournant (D) qui est placé derrière le point focal de ladite première
- 30 lentille (L1), puis la deuxième lentille (L2) placée à sa distance focale par rapport au plan du diffuseur tournant (D), puis ladite ouverture (A).

14. Le microscope selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel la source de lumière partiellement cohérente comprend les éléments suivants : une source laser (S), une première lentille (L1), un **5** diffuseur tournant (D) tel qu'un verre dépoli, et une seconde lentille (L2), la disposition relative de ces différents éléments étant telle que lorsque la source fonctionne, le faisceau laser émis par la source laser traverse d'abord la première lentille (L1) puis le **10** diffuseur (D) puis la deuxième lentille (L2), le faisceau laser à la sortie de la première lentille (L1) étant focalisé en un point de focalisation situé en amont du diffuseur à une distance (d) réglable du diffuseur (D).

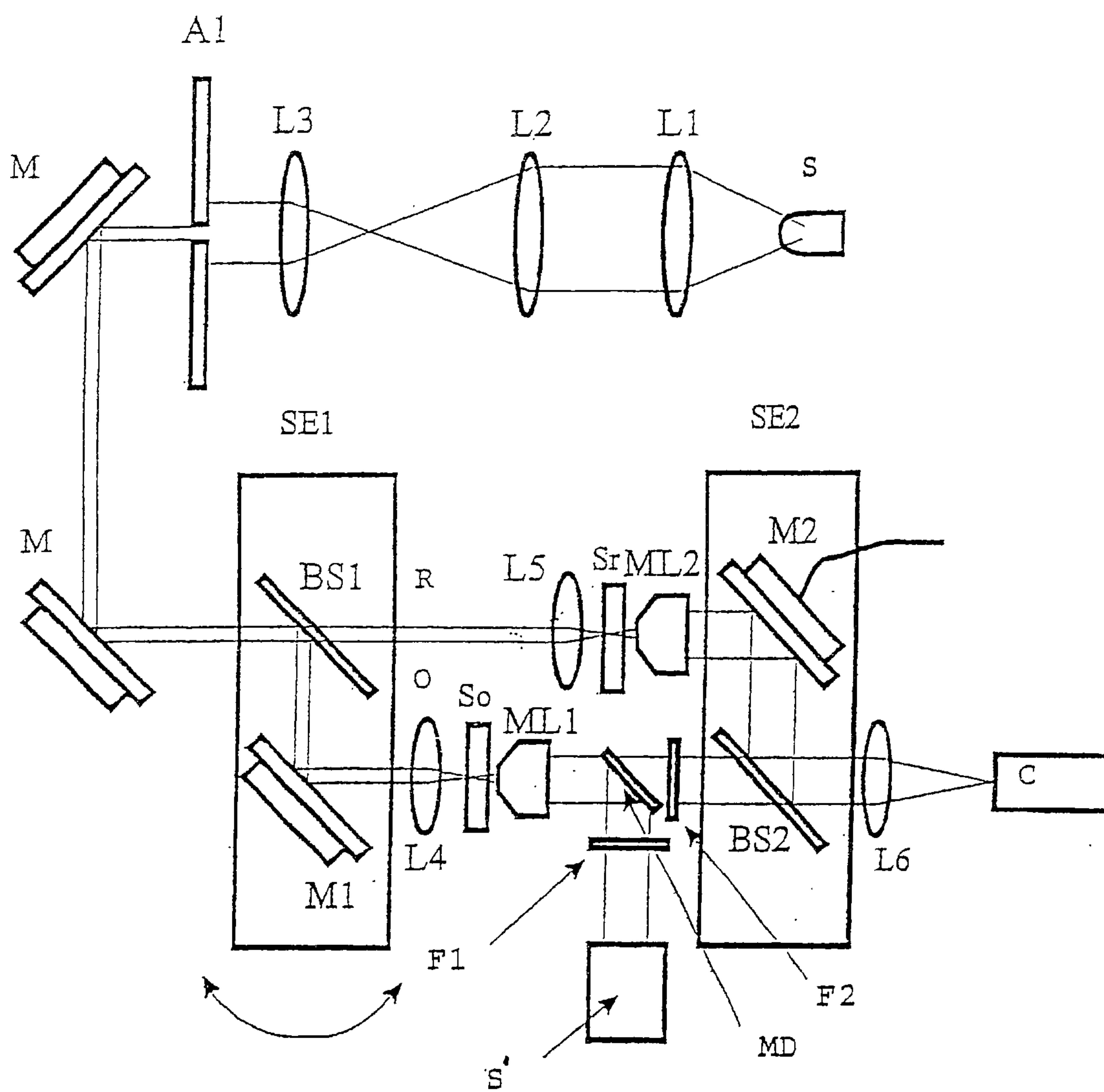
1/3

FIG. 1FIG. 2

2/3

FIG. 3FIG. 4

3/3

FIG. 5

