



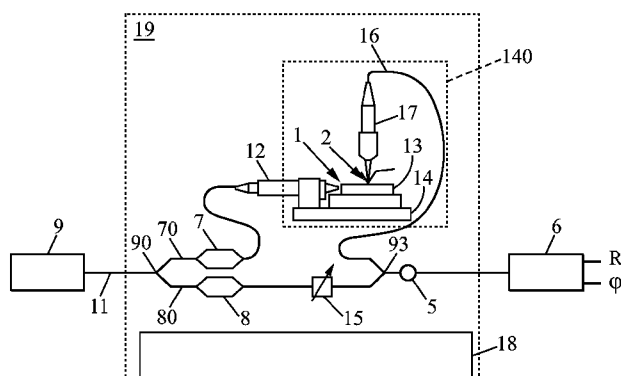
- (51) Classification internationale des brevets :
G03H 1/04 (2006.01) **G01B 9/02** (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2017/050041
- (22) Date de dépôt international :
6 janvier 2017 (06.01.2017)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
16 50165 8 janvier 2016 (08.01.2016) FR
- (71) Déposant : CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE - CNRS - [FR/FR]; 3, rue Michel Ange, PARIS, 75016 (FR).
- (72) Inventeurs : DE WILDE, Yannick; 6, rue Nicolas Roret, 75013 PARIS (FR). GREUSARD, Léo; 4 Chemin du Barrou, 31650 AUZIELLE (FR). TESSIER, Gilles; 37, Rue de la Grange aux belles, 75010 paris (FR). GIGAN, Sylvain; 40 avenue des Gobelins, 75013 PARIS (FR). GRÉ-SILLON, Samuel; 80, Boulevard de Port Royal, 75005 PARIS (FR). BENCHEIKH, Kamel; 7, Rue de la glacière, 94400 VITRY SUR SEINE (FR).
- (74) Mandataires : CABINET PLASSERAUD et al.; 66 rue de la Chaussée d'Antin, 75440 PARIS CEDEX 09 (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : DEVICE FOR IMAGING THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF A SAMPLE

(54) Titre : DISPOSITIF D'IMAGERIE DU CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUE D'UN ÉCHANTILLON

FIG. 7



(57) Abstract : An optical detection device comprises a light source (9) that emits a light beam with an electromagnetic field, means suitable for splitting the beam (91) into a first beam defining a first, control path (80), and a second beam defining a second, sample path (70), a modulation system (78) which shifts the frequency of the electromagnetic fields of the two beams, a beam coupler (92) suitable for combining the beams, an optical detection system (50) suitable for detecting the signal resulting from the interference between the beams coupled by the coupler, the sample being placed in the sample path (70), the optical detection system (50) comprising an optical detector (5) and a device suitable for measuring the amplitude and phase of the signal (6), an opaque screen (2) comprising an optical aperture (20) being placed on a sample zone near the sample in the sample path (70).

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

**Publiée :**

- *sans rapport de recherche internationale, sera republiée
dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)*

Dispositif de détection optique comprenant une source lumineuse (9) émettant un faisceau lumineux dont le champ électromagnétique, un moyen adapté pour diviser le faisceau (91) en un premier faisceau définissant une première voie référence (80) et un deuxième faisceau définissant une deuxième voie échantillon (70), un système de modulation (78) décalant en fréquence les champs électromagnétiques des deux faisceaux, un coupleur de faisceaux (92) adapté pour collecter les faisceaux, un système de détection optique (50) adapté pour détecter le signal issu de l'interférence entre les faisceaux et couplés via ledit coupleur, l'échantillon étant placé dans la voie échantillon (70), le système de détection optique (50) comprenant un détecteur optique (5) et un dispositif adapté pour mesurer l'amplitude et la phase du signal (6), un écran opaque (2) comprenant une ouverture optique (20) est placé au niveau d'une zone d'un échantillon, à proximité de l'échantillon, dans la voie échantillon (70).

DISPOSITIF D'IMAGERIE DU CHAMPS ELECTROMAGNETIQUE D'UN
ECHANTILLON

La présente invention est relative aux dispositifs
5 d'imagerie du champ électromagnétique présent à proximité
de la surface d'un échantillon.

Plus particulièrement, l'invention se rapporte à un
dispositif de détection optique pour caractériser en
amplitude et en phase le champ électromagnétique d'une zone
10 d'un échantillon, le dispositif comprenant une source
lumineuse adaptée pour émettre un faisceau lumineux dont le
champ électromagnétique a une pulsation ω , un moyen adapté
pour diviser le faisceau en un premier faisceau définissant
une première voie, dite voie référence et un deuxième
15 faisceau définissant une deuxième voie dite voie
échantillon, un système de modulation qui décale en
fréquence les champs électromagnétiques des deux faisceaux
d'une fréquence δ , un coupleur de faisceaux adapté pour
collecter les faisceaux issus des deux voies, un système de
20 détection optique adapté pour détecter le signal issu de
l'interférence entre les faisceaux issus des deux voies et
couplés via ledit coupleur de faisceaux.

Le document « Numerical heterodyne holography with
two-dimensional photodetector arrays » F. Le Clerc & co.,
25 Optics letters, décrit un exemple d'un tel dispositif de
détection optique utilisant la détection hétérodyne pour
caractériser en amplitude et en phase le champ
électromagnétique qui traverse un échantillon, par une
technique d'holographie numérique hétérodyne.

30 Cependant un tel dispositif nécessite l'utilisation
d'un détecteur matriciel ce qui limite la gamme de
longueurs d'onde dans laquelle les mesures peuvent être
réalisées. La résolution spatiale d'un tel dispositif est

de plus limitée par la longueur d'onde utilisée.

La présente invention a notamment pour but de pallier ces inconvénients.

A cet effet, selon l'invention, un dispositif du genre en question est caractérisé en ce que l'échantillon est placé dans la voie échantillon, le système de détection optique comprend un détecteur optique et un dispositif adapté pour mesurer l'amplitude et la phase du signal, un écran opaque comprenant une ouverture optique est placé au niveau de la zone dans la voie échantillon, à proximité de l'échantillon.

Grâce à ces dispositions, la caractérisation du champ en amplitude et en phase pourra être obtenue avec une résolution spatiale qui ne dépendra que de la taille de l'ouverture optique et qui sera indépendante de la longueur d'onde.

Une très bonne résolution spatiale pourra notamment être obtenue. De plus un tel dispositif pourra être utilisé sur une gamme spectrale étendue. L'amplitude du signal pourra être amplifiée par un tel dispositif ce qui sera particulièrement intéressant dans le cas d'un signal d'intérêt de faible amplitude.

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

- la source lumineuse est l'échantillon lui-même, et l'échantillon est également le moyen adapté pour séparer le faisceau ;

- la source lumineuse, le moyen adapté pour séparer le faisceau et l'échantillon sont trois éléments distincts, ladite deuxième voie échantillon comprenant l'échantillon ;

- le moyen adapté pour séparer le faisceau est un séparateur de faisceau ;

- le dispositif adapté pour mesurer l'amplitude et la phase du signal est un dispositif à détection synchrone ;

- le système de modulation comprend un premier moyen de modulation, l'une ou l'autre de ladite première voie référence ou de ladite deuxième voie échantillon comprend ledit premier moyen de modulation, ledit premier moyen de modulation étant adapté pour moduler en fréquence le champ dudit premier faisceau ou deuxième faisceau respectivement, le premier moyen de modulation étant adapté pour implémenter le décalage en fréquence δ entre les fréquences respectives des champs correspondant aux faisceaux de chacune des deux voies ;

- le système de modulation comprend un premier moyen de modulation, ladite première voie référence comprend ledit premier moyen de modulation, ledit premier moyen de modulation étant adapté pour moduler en fréquence le champ du premier faisceau, et également un deuxième moyen de modulation, ladite deuxième voie échantillon comprenant ledit deuxième moyen de modulation, ledit deuxième moyen de modulation étant adapté pour moduler en fréquence le champ du deuxième faisceau, les premier et deuxième moyens de modulation étant adaptés pour implémenter le décalage en fréquence δ entre les fréquences respectives des champs correspondants aux faisceaux de chacune des deux voies ;

- ledit deuxième moyen de modulation précède l'échantillon dans l'ordre de progression du faisceau de la voie échantillon ;

- l'échantillon et l'ouverture optique de l'écran opaque sont adaptés pour être déplacés l'un par rapport à l'autre ;

- l'échantillon est monté sur un système de

déplacement adapté pour déplacer l'échantillon par rapport à l'ouverture optique fixe ;

- le système de déplacement est un système piézo-électrique ;

5 - l'ouverture optique est une zone vide de l'écran opaque ;

- l'ouverture optique est une zone de l'écran opaque transparente à la fréquence $\omega/2\pi$;

- le dispositif est géométriquement agencé pour que
10 le deuxième faisceau traverse l'échantillon et l'écran opaque dans un ordre quelconque, dans son parcours vers le système de collection, le dispositif étant géométriquement agencé pour que le premier et le deuxième faisceau puissent être collectés au niveau du coupleur de faisceaux ;

15 - le dispositif est géométriquement agencé pour que le deuxième faisceau se réfléchisse à la surface de l'échantillon et traverse l'écran opaque dans un ordre quelconque avant de se diriger vers le système de collection, le dispositif étant géométriquement agencé pour
20 que le premier et le deuxième faisceau puissent être collectés au niveau du coupleur de faisceaux ;

- le détecteur optique est un détecteur monocanal ;

- l'ouverture optique est installée à l'extrémité de la pointe du cantilever d'un microscope à force
25 atomique.

L'invention porte aussi sur un procédé de détection optique pour caractériser en amplitude et en phase le champ électromagnétique d'une zone d'un échantillon, ledit procédé comprenant les étapes suivantes d'émettre un
30 faisceau lumineux dont le champ électromagnétique a une pulsation ω , de diviser le faisceau en un premier faisceau définissant une première voie, dite voie référence et un deuxième faisceau définissant une deuxième voie dite voie

échantillon, de placer sur la voie échantillon un échantillon et un écran opaque comprenant une ouverture optique placé au niveau de la zone à proximité de l'échantillon, de décaler en fréquence les champs électromagnétiques des deux faisceaux d'une fréquence δ , de collecter les faisceaux issus des deux voies, de détecter le signal issu de l'interférence entre les faisceaux issus des deux voies et couplés via ledit coupleur de faisceaux, de déduire l'amplitude et la phase du champ électromagnétique d'une zone de l'échantillon.

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

Sur les dessins :

- la figure 1a illustre le principe de l'invention,
- la figure 1b illustre le cas où le dispositif est intégré dans une pointe AFM,
- la figure 2 illustre le premier mode de réalisation de l'invention,
- la figure 3 illustre le deuxième mode de réalisation de l'invention,
- la figure 4 illustre le troisième mode de réalisation de l'invention,
- la figure 5 illustre le quatrième mode de réalisation de l'invention,
- la figure 6 illustre le cinquième mode de réalisation de l'invention,
- la figure 7 illustre une réalisation pratique de l'invention.

Sur les différentes figures, les mêmes références désignent des éléments identiques ou similaires.

Dans le dispositif 10 de l'invention, un faisceau lumineux incident est séparé en deux faisceaux lumineux parcourant deux voies différentes 70, 80, les deux signaux étant déphasés d'une fréquence connue, un seul des deux signaux impactant l'échantillon 1 à imager. L'échantillon est placé dans la voie échantillon 70. L'échantillon 1, porté par un porte échantillon 30, est mis en regard avec un écran opaque 2 de taille supérieure à la longueur d'onde et comprenant une ouverture optique 20, ledit écran bloquant efficacement la lumière autour de l'ouverture optique, seule la lumière traversant l'ouverture optique atteignant le système de détection. Les signaux issus des deux voies interfèrent ensuite et le signal d'interférence est détecté par un système de détection 50 adapté pour déduire du signal d'interférence l'image de l'amplitude et de la phase du champ électromagnétique présent à proximité de la zone de l'échantillon 1 placée face à l'ouverture optique 20. L'échantillon 1 et l'écran opaque 2 se déplacent l'un par rapport à l'autre de sorte que différentes zones de l'échantillon 1 sont successivement mises en regard avec l'ouverture optique 20 de l'écran opaque 2 et imagées. La sélection spatiale de la zone à imager par l'ouverture optique 20 dans l'écran opaque 2 permet de résoudre spatialement l'image de l'échantillon 1, c'est-à-dire d'identifier la zone de l'échantillon 1 à laquelle doit être attribuée l'amplitude et la phase mesurées. Il peut s'agir par exemple du déplacement du porte échantillon 30 par rapport à l'écran fixe 2 ou du déplacement de l'écran 2 par rapport au porte échantillon 30 fixe. Dans tout ce qui suivra on considèrera que l'écran 2 est fixé et que le porte échantillon 30 déplace l'échantillon 1 (le porte échantillon est donc le système de déplacement 3).

L'écran opaque 2 pourra être placé avant ou après l'échantillon 1 dans l'ordre de progression du deuxième faisceau de la deuxième voie échantillon 70. Dans tout ce qui suivra, on considèrera le cas où l'échantillon 1 est
 5 placé avant l'écran 2 dans l'ordre de progression du deuxième faisceau. Le deuxième faisceau et l'ouverture devront être au moins grossièrement alignés, en particulier si le faisceau est étroit.

Plus précisément comme illustré à la **figure 1a**, en
 10 sortie d'une source 9, le faisceau lumineux incident est séparé en deux voies 70, 80 par un moyen adapté pour diviser le faisceau 91. Un système de modulation 78 implémente un décalage en fréquence δ (battement temporel à la fréquence δ entre les deux voies) entre les champs des
 15 faisceaux qui parcourent chaque voie.

Le système de modulation 78 comprend par exemple des moyens de modulation 7, 8 positionnés sur chacune des voies 70, 80 respectivement. Ces moyens de modulation 7, 8 implémentent un décalage en fréquence δ (battement
 20 temporel à la fréquence δ entre les deux voies) entre les champs des faisceaux qui parcourent chaque voie. Dans le cas où le champ optique issu de la source a une pulsation ω et où les moyens de modulation 7, 8 modulent les champs de la voie de référence 80 et de la voie comprenant
 25 l'échantillon, dite voie échantillon 70, respectivement aux fréquences f et $f+\delta$, le champ dans la voie échantillon 70 est par exemple de la forme :

$$E_{ech} e^{i((\omega+2\pi f+2\pi\delta)t+\varphi_{ech})}$$

Avec E_{ech} l'amplitude du champ dans la voie échantillon 70 et φ_{ech} la phase du champ dans la voie échantillon 70.

30 Le champ dans la voie de référence est par exemple de la forme :

$$E_{ref} e^{i((\omega+2\pi f)t+\varphi_{ref})}$$

Avec E_{ref} l'amplitude du champ dans la voie référence 80 et φ_{ref} la phase du champ dans la voie référence 80.

La détection hétérodyne consiste à faire interférer sur le détecteur optique 5 le faisceau lumineux d'intérêt 5 ayant impacté l'échantillon avec un second faisceau lumineux qui circule dans la voie référence, puis à déterminer l'amplitude et la phase à l'aide d'un oscilloscope ou de systèmes d'acquisition lents.

L'intensité I à la sortie du détecteur 5 correspond 10 donc à l'interférence de ces deux signaux et a la forme :

$$I \propto |E_{ech} e^{i((\omega+2\pi f+2\pi\delta)t+\varphi_{ech})} + E_{ref} e^{i((\omega+2\pi f)t+\varphi_{ref})}|^2$$

$$I \propto |E_{ech}|^2 + |E_{ref}|^2 + 2E_{ech}^* E_{ref} \cos(2\pi\delta t + \varphi_{ech} - \varphi_{ref})$$

En démodulant l'intensité à l'aide d'un dispositif à 15 détection synchrone 6 à la fréquence δ en sortie du détecteur 5, sont extraits l'amplitude R et la phase φ du champ qui traverse l'échantillon données par les expressions suivantes :

$$R \propto |E_{ref}| |E_{ech}|$$

$$\varphi = \varphi_{ech} - \varphi_{ref} + cst$$

L'amplitude R est proportionnelle à l'amplitude du champ détecté qui traverse l'échantillon 1 et la phase φ est égale à une constante additive près, $(-\varphi_{ref} + cst)$, où 20 cst est une constante, à la phase φ_{ech} du champ étudié.

Cette information est donc locale car elle est restreinte à la lumière qui passe dans l'ouverture optique, le reste étant bloqué par l'écran. L'écran percé d'une ouverture optique est par exemple un cantilever avec une 25 ouverture optique.

En alternative de la détection synchrone l'amplitude et la phase pourront être obtenus en

multipliant le signal à analyser par un signal connu de même fréquence par exemple à l'aide d'un oscilloscope ou d'un convertisseur analogique numérique suffisamment rapide.

5 En variante, le système de modulation 78 peut ne comprendre qu'un premier moyen de modulation 8. L'une ou l'autre de ladite première voie référence 80 ou de ladite deuxième voie échantillon 70 comprend ledit premier moyen de modulation 8, ledit premier moyen de modulation 8 étant
10 adapté pour moduler en fréquence le champ dudit premier faisceau ou deuxième faisceau respectivement. Le premier moyen de modulation 8 est adapté pour implémenter le décalage en fréquence δ entre les fréquences respectives des champs correspondant aux faisceaux de chacune des deux
15 voies.

L'écran opaque 2 comprenant l'ouverture 20 peut être déplacé par rapport à l'échantillon 1 pour sélectionner une zone à imager. Un système de déplacement 3 permet un déplacement relatif de l'échantillon 1 par
20 rapport à l'écran opaque 2. Des systèmes de collection 40 permettent de collecter les faisceaux lumineux de part et d'autre de l'écran opaque 2. Par exemple, l'échantillon 1 est déplacé et l'ouverture 20 et le faisceau dans la voie échantillon 70 sont alignés. L'ouverture 20 aura une
25 dimension qui est sensiblement inférieure à la dimension du faisceau qui éclaire l'échantillon 1.

Le déplacement permet d'accéder aux variations spatiales des paramètres d'amplitude et de phase du champ électromagnétique avec une résolution qui ne dépend que de
30 la taille de l'ouverture 20 et pas de la longueur d'onde.

Comme illustré à la **figure 2**, le moyen adapté pour diviser le faisceau 91 peut être un séparateur de faisceau à travers lequel est envoyé le faisceau lumineux issu de la

source. Des miroirs positionnés sur le parcours du faisceau lumineux peuvent permettre d'orienter les faisceaux de chacune des voies. Les moyens de modulation utilisés 7, 8 peuvent être des modulateurs et en particuliers des modulateurs acousto-optique, mais également d'autres types de modulateurs tels que les modulateurs en amplitudes en phase ou de Mach-Zehnder. La fréquence f est par exemple de 80 MegaHertz (MHz) et le décalage en fréquence δ est par exemple de 1 KiloHertz (kHz). Des systèmes de collection peuvent être placés sur la trajectoire du faisceau lumineux dans la voie échantillon 70, les systèmes de collection étant adaptés pour donner une direction au faisceau dispersé avant qu'il traverse l'échantillon, ou en sortie de l'ouverture 20 dans sa trajectoire vers le détecteur. La source peut par exemple être une source laser. Les systèmes de collection sont par exemple des lentilles 40. Le détecteur est par exemple une photodiode ou par exemple un détecteur monocanal.

Les faisceaux lumineux issus des deux voies 70 et 80 peuvent être recombinaés via un coupleur de faisceaux 92. L'échantillon 1 est en déplacement par rapport à l'écran opaque 2 comprenant une ouverture 20, via un système de déplacement 3 sur lequel est installé l'échantillon 1 (il s'agit du porte échantillon 30). Le système de translation est par exemple un système piézo-électrique. En variante le système de translation peut être un système de platines de translations équipées de moteurs électriques, en particulier pour les applications aux grandes longueurs d'onde telles que les applications micro-ondes. L'ouverture 20 dans l'écran opaque a notamment un diamètre D_{ouv} , il peut s'agir d'un trou ou d'une zone transparente ou translucide à la fréquence du champ électromagnétique d'intérêt. L'écran opaque est par exemple une poutre percée

d'une ouverture. L'ouverture peut être de taille inférieure à la longueur d'onde par exemple. L'ouverture peut par exemple être installée à l'extrémité de la pointe 200 du cantilever 2 d'un microscope à force atomique (AFM) comme illustré à la **figure 1b**. L'ouverture est réalisée en traversant à la fois la pointe 200 et le cantilever 2, de sorte que la lumière située à l'extrémité de la pointe 200 puisse traverser la pointe 200 et le cantilever 2 de part en part. Cette technique peut être couplée avec une technique de sonde locale à balayage 31 dans le cas d'un cantilever d'AFM par exemple.

Dans le cas d'une ouverture de taille sub-longueur d'onde ($D_{\text{ouv}} < \lambda$) réalisée à l'extrémité de la pointe d'un AFM, le balayage de la pointe dans la zone de champ proche à la surface de l'échantillon (ouverture à une distance d de l'échantillon telle que $d < \lambda$ pour accéder aux champs proches) donne accès à des images super-résolues de l'amplitude et de la phase du champ proche à la surface de l'échantillon. Dans ce cas, l'intensité du faisceau d'intérêt peut être très faible car la lumière doit traverser une ouverture de taille inférieure à sa longueur d'onde. La mesure hétérodyne jouera un rôle important d'amplification du faisceau optique d'intérêt. L'amplification hétérodyne consiste à faire interférer sur le détecteur optique via le coupleur de faisceaux 92 le faisceau d'intérêt, de très faible intensité, avec le faisceau de référence d'intensité beaucoup plus grande. La cohérence entre ces signaux optiques permet d'amplifier le faisceau d'intérêt d'un facteur qui est donné par le rapport entre l'amplitude du faisceau de référence et l'amplitude du faisceau d'intérêt, ce qui rend ce dernier plus facilement mesurable, tout en donnant accès à son amplitude et à sa phase. L'échantillon 1 n'est soumis à

aucune vibration.

Dans les quatre modes de réalisation qui suivront, ledit deuxième moyen de modulation 7 précède l'échantillon 1 dans l'ordre de progression du faisceau de la voie échantillon 70.

Dans un **premier mode de réalisation**, le dispositif 10 est monté en espace libre. Dans le cas illustré à la **figure 2**, le laser 9 émet un faisceau lumineux qui est séparé par le séparateur de faisceau 91 en deux faisceaux lumineux correspondant aux deux voies :

- la voie référence 80, dans laquelle le faisceau traverse un premier modulateur 8, qui module le champ du faisceau qui le traverse à la fréquence f , puis est réfléchi par un premier miroir 81 dans la direction du coupleur de faisceaux 92,
- la voie échantillon 70 comprenant un deuxième miroir 71, le faisceau étant réfléchi par ledit deuxième miroir 71 pour traverser ensuite le deuxième modulateur 7, qui module le champ du faisceau à la fréquence $f+\delta$, le faisceau traversant ensuite un premier système de collection 41, puis le faisceau traverse l'échantillon 1, le faisceau ayant une direction sensiblement perpendiculaire à la direction dans laquelle s'étend l'échantillon 1, le faisceau issu de l'ouverture 20 de l'écran opaque en regard de l'échantillon traversant un deuxième système de collection 40 pour être collecté par le coupleur de faisceaux 92,

Les faisceaux issus de la voie échantillon 70 et de la voie référence 80 interfèrent et le signal

d'interférence est collecté par le détecteur 5. Le signal détecté est transmis au dispositif à détection synchrone 6 qui est adapté pour extraire la phase φ et le module R selon le principe physique de la détection hétérodyne 5 expliqué ci-dessus. En particulier, le parcours du faisceau qui arrive à l'échantillon 1 et qui quitte l'ouverture 20 de l'écran opaque se fait en espace libre.

En variante de ce mode de réalisation, l'écran opaque comprenant une ouverture 2 peut être placé 10 « avant » l'échantillon, i.e. que le faisceau issu du modulateur 7 traverse d'abord l'écran opaque comprenant l'ouverture 20 avant de traverser l'échantillon.

Dans ce mode de réalisation du dispositif 10, le système fonctionne avec un échantillon translucide. Le 15 système de déplacement 3 doit être au moins partiellement translucide également pour laisser passer le faisceau.

Dans un **deuxième mode de réalisation**, illustré à la **figure 3**, le dispositif 10 est en version partiellement fibrée, c'est-à-dire que l'architecture du dispositif 10 20 est analogue au mode de réalisation précédent, mais une partie des faisceaux lumineux dans chaque voie sont transmis par des câbles. En particulier, le parcours du faisceau qui arrive à l'échantillon 1 et qui quitte l'ouverture 20 de l'écran opaque se fait en espace libre.

En variante de ce mode de réalisation, l'écran opaque comprenant une ouverture 20 peut être placé 25 « avant » l'échantillon, i.e. que le faisceau issu du modulateur 7 traverse d'abord l'écran opaque comprenant l'ouverture 20 avant de traverser l'échantillon.

30 Dans ce mode de réalisation du dispositif 10, le système fonctionne avec un échantillon translucide. Le système de déplacement 3 doit être au moins partiellement translucide également pour laisser passer le faisceau.

Dans un **troisième mode de réalisation** illustré à la **figure 4**, la source 9 émet un faisceau lumineux qui est séparé par le séparateur de faisceau 91 en deux faisceaux lumineux correspondant aux deux voies :

- 5 • la voie de référence 80, dans laquelle le faisceau traverse un premier modulateur 8, qui module le champ du faisceau qui le traverse à la fréquence f , puis est réfléchi par un premier miroir 81 dans la direction du
10 deuxième séparateur de faisceau 92,
- la voie échantillon 70 comprenant un deuxième miroir 71, le faisceau étant réfléchi par ledit deuxième miroir 71 pour traverser ensuite le deuxième modulateur 7, qui module
15 le champ du faisceau à la fréquence $f+\delta$, le faisceau étant ensuite à nouveau réfléchi par un troisième miroir 72, le faisceau ainsi réfléchi ayant une direction quasi parallèle à la direction d'extension de l'échantillon 1
20 (incidence oblique du faisceau, le champ électromagnétique diffusés au niveau de l'ouverture 20 traversant celle-ci), le faisceau traversant ensuite un premier système de collection 41 puis l'échantillon 1
25 pour être partiellement transmis dans la direction sensiblement perpendiculaire à l'échantillon 1 et partiellement réfléchi par l'échantillon 1, le faisceau issu de l'ouverture 20 de l'écran opaque 2 en regard
30 de l'échantillon traversant ensuite un deuxième système de collection 40 pour être collecté par le coupleur de faisceaux 92.

Les faisceaux issus de la voie échantillon 70 et de

la voie référence 80 interfèrent et le signal d'interférence est collecté par le détecteur 5. Le signal détecté est transmis au dispositif à détection synchrone 6 qui est adapté pour extraire la phase φ et le module R selon le principe de la détection hétérodyne expliqué ci-dessus. Une telle configuration pourra notamment apparaître dans le cas de guide d'onde intégré, le champ étant alors seulement un champ surfacique et l'injection étant faite latéralement au niveau de l'entrée du guide.

10 Dans ce mode de réalisation du dispositif 10, le système fonctionne avec un échantillon translucide. Le système de déplacement 3 doit être au moins partiellement translucide également pour laisser passer le faisceau. En particulier, le parcours du faisceau qui arrive à 15 l'échantillon 1 et qui quitte l'ouverture 20 de l'écran opaque se fait en espace libre.

Dans un quatrième mode de réalisation illustré à la **figure 5**, dans le cas d'une version partiellement fibrée comme celle du deuxième mode de réalisation, le laser 9 20 émet un faisceau lumineux qui est séparé par le séparateur de faisceau 91 en deux faisceaux lumineux correspondant aux deux voies :

- la voie de référence 80, dans laquelle le faisceau traverse un premier modulateur acousto-optique 8, qui module le champ du faisceau qui le traverse à la fréquence f , puis est guidé vers le coupleur de faisceaux 92,
- la voie échantillon 70 dans laquelle le faisceau est guidé vers le deuxième modulateur acousto-optique 7, qui module le champ du faisceau à la fréquence $f+\delta$, le faisceau étant ensuite réfléchi par un miroir

72, le faisceau ainsi réfléchi étant collecté par un deuxième séparateur de faisceau 73, le deuxième séparateur de faisceau 73 étant adapté pour séparer le faisceau en un faisceau dirigé vers l'échantillon 1 dans une direction sensiblement perpendiculaire à la direction d'extension de l'échantillon 1, ledit faisceau étant réfléchi par l'échantillon, le faisceau réfléchi étant re-collecté par le deuxième séparateur de faisceau 73, et en un faisceau directement transmis vers le coupleur de faisceaux 92, l'ensemble des faisceaux issus du deuxième séparateur de faisceau 73 étant collectés par le coupleur de faisceaux 92.

Dans ce mode de réalisation, des systèmes de collection 40, 41, 42 peuvent être utilisés pour collecter le faisceau dans son parcours, notamment un système de collection 41 pour son arrivée sur le miroir 72, un système de collection 40 pour son passage entre le deuxième séparateur de faisceau 73 et l'échantillon 1 et un système de collection 42 pour son parcours en sortie du deuxième séparateur de faisceau 73.

Les faisceaux issus de la voie échantillon 70 et de la voie référence 80 collectés par le coupleur de faisceaux 92 interfèrent et le signal d'interférence est collecté par le détecteur 5. Le signal détecté est transmis au dispositif 6 adapté pour extraire la phase φ et le module R , selon le principe de la détection hétérodyne expliqué ci-dessus. Il s'agit par exemple d'un dispositif à détection synchrone.

Dans ce mode de réalisation du dispositif 10, le système fonctionne en mode retro-réfléchi, c'est-à-dire

qu'il fonctionne notamment sur un échantillon opaque. En particulier, le parcours du faisceau qui arrive à l'échantillon 1 et qui quitte l'ouverture 20 de l'écran opaque se fait en espace libre.

5 En variante de ce mode de réalisation, le faisceau incident sur l'échantillon pourrait également avoir une incidence oblique sur l'échantillon 1.

Dans **un cinquième mode de réalisation** illustré à la **figure 6**, la source lumineuse 9 est l'échantillon 1 lui-même, et l'échantillon 1 est également le moyen adapté pour
10 séparer le faisceau 91. L'échantillon 1 peut par exemple être un laser semi-conducteur, et est alors une source de rayonnement. Le laser semi-conducteur émet un champ propagatif par son extrémité, dans la voie dite voie
15 référence 80 et le champ électromagnétique est mesuré à sa surface dans la voie dite voie échantillon 70. En particulier, le parcours du faisceau qui arrive à l'échantillon 1 et qui quitte l'ouverture 20 de l'écran opaque se fait en espace libre.

20 La figure 7 illustre une **réalisation pratique** de l'invention adaptée à l'étude de l'amplitude et de la phase du champ à la surface d'un guide d'onde passif dont l'injection se fait de façon latérale à l'aide d'une fibre micro-lentillée. le dispositif 10 comprend un microscope
25 SNOM comprenant une platine piézoélectrique et une sonde à pointe à ouverture sur cantilever 17. Une source laser accordable 9 émet un faisceau monochromatique de longueur d'onde arbitrairement fixée entre 1490nm et 1650nm, couplée dans une fibre monomode 11. Un coupleur fibré 90 permet de
30 séparer le faisceau en deux voies, la voie échantillon 70 et la voie référence 80. Un modulateur acousto-optique fibré présent sur chaque voie 7, 8, permet d'induire un battement temporel entre les deux voies de fréquence δ . Une

5 fibre micro-lentillée 12 est connectée à la voie échantillon, comme système de collection de faisceau, de manière à focaliser le faisceau dans l'entrée de l'échantillon c'est-à-dire du guide d'onde passif 13. Le guide d'onde 13 est placé sur la platine piézoélectrique 14 qui joue le rôle de système de déplacement. La sonde 17, qui joue le rôle de l'écran opaque à ouverture, transmet un signal détecté à la surface de l'échantillon dû à la transmission à travers la nano-ouverture de la portion évanescence du champ qui se propage dans le guide d'onde passif 13. Ce signal transmis en l'espace libre au-dessus de la nano-ouverture est collecté par un objectif à grande ouverture numérique puis focalisé sur une fibre optique 16, recombinaison avec la voie de référence à l'aide d'un deuxième coupleur fibré 93. Le signal résultat est ensuite envoyé vers un détecteur fibré 5 où le champ de référence et le champ qui traverse l'échantillon transmis par la nano-ouverture interfèrent. Selon le principe général de l'invention, la tension délivrée par le détecteur est ensuite démodulée à l'aide d'une détection synchrone à la fréquence δ , pour obtenir une amplitude proportionnelle à l'amplitude du champ sondé par la sonde à balayage et une phase égale à une constante additive près à la phase de ce champ sondé.

25 Le guide d'onde est par exemple un guide en silice sur un substrat de silicium de dimensions transversales inférieures à la longueur d'onde (section transversale $200 \times 500 \text{ nm}^2$).

La phase ϕ à laquelle on accède en plus de la mesure d'amplitude renseigne sur le chemin optique et apporte simultanément une information sur l'indice du milieu et la distance parcourue. Dans les problèmes de diffusion, en particulier avec des variations de distances parcourues,

les mesures d'amplitude R et de phases φ permettent d'accéder à la matrice de diffusion de l'échantillon reliant les modes d'entrée et de sortie du champ électromagnétique. Dans le cas de systèmes résonnants, la
5 phase φ pourra aussi révéler des informations sur la nature de l'oscillateur (plasmonique ou cavités).

REVENDICATIONS

1. Dispositif de détection optique pour caractériser en amplitude et en phase le champ
5 électromagnétique d'une zone d'un échantillon (1), le dispositif comprenant :

- une source lumineuse (9) adaptée pour émettre un faisceau lumineux dont le champ électromagnétique a une pulsation ω ,

10 - un moyen adapté pour diviser le faisceau (91) en un premier faisceau définissant une première voie, dite voie référence (80) et un deuxième faisceau définissant une deuxième voie dite voie échantillon (70),

15 - un système de modulation (78) qui décale en fréquence les champs électromagnétiques des deux faisceaux d'une fréquence δ ,

- un coupleur de faisceaux (92) adapté pour collecter les faisceaux issus des deux voies (70, 80),

20 - un système de détection optique (50) adapté pour détecter le signal issu de l'interférence entre les faisceaux issus des deux voies (70, 80) et couplés via ledit coupleur de faisceaux (92),

caractérisé en ce que :

25 - l'échantillon est placé dans la voie échantillon (70),

- le système de détection optique (50) comprend un détecteur optique (5) et un dispositif adapté pour mesurer l'amplitude et la phase du signal (6),

30 - un écran opaque (2) comprenant une ouverture optique (20) est placé au niveau de la zone dans la voie échantillon (70), à proximité de l'échantillon (1),

- au moins un système de collection (40) adapté pour collecter les faisceaux lumineux, placé au moins d'un

côté de l'écran opaque (2), les faisceaux lumineux se propageant dans l'espace libre au moins dans un parcours entre l'ouverture optique (20) et le système de collection (40).

5

2. Dispositif selon la revendication 1 dans lequel la source lumineuse (9) est l'échantillon (1) lui-même, et l'échantillon (1) est également le moyen adapté pour séparer le faisceau (91).

10

3. Dispositif selon la revendication 1 dans lequel la source lumineuse (9), le moyen adapté pour séparer le faisceau (91) et l'échantillon (1) sont trois éléments distincts, ladite deuxième voie échantillon (70) comprenant l'échantillon (1).

15

4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 ou 3 dans lequel le moyen adapté pour séparer le faisceau est un séparateur de faisceau (91).

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 dans lequel le dispositif adapté pour mesurer l'amplitude et la phase du signal est un dispositif à détection synchrone.

6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel le système de modulation (78) comprend un premier moyen de modulation (8), l'une ou l'autre de ladite première voie référence (80) ou de ladite deuxième voie échantillon (70) comprend ledit premier moyen de modulation (8), ledit premier moyen de modulation (8) étant adapté pour moduler en fréquence le champ dudit premier faisceau ou deuxième faisceau respectivement, le premier moyen de modulation (8) étant adapté pour implémenter le décalage en fréquence δ entre les fréquences respectives des champs correspondant aux faisceaux de chacune des deux voies.

7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel le système de modulation (78) comprend un premier moyen de modulation (8), ladite première voie référence (80) comprend ledit premier moyen
5 de modulation (8), ledit premier moyen de modulation (8) étant adapté pour moduler en fréquence le champ du premier faisceau, et également un deuxième moyen de modulation (7), ladite deuxième voie échantillon (70) comprenant ledit deuxième moyen de modulation (7), ledit deuxième moyen de
10 modulation (7) étant adapté pour moduler en fréquence le champ du deuxième faisceau,
les premier et deuxième moyens de modulation (7, 8) étant adaptés pour implémenter le décalage en fréquence δ entre les fréquences respectives des champs correspondants aux
15 faisceaux de chacune des deux voies.

8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 et 3 à 5 et 7 dans lequel ledit deuxième moyen de modulation (7) précède l'échantillon (1) dans l'ordre de progression du faisceau de la voie échantillon
20 (70).

9. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 dans lequel l'échantillon (1) et l'ouverture optique (20) de l'écran opaque (2) sont adaptés pour être déplacés l'un par rapport à l'autre.

25 10. Dispositif selon la revendication 9 dans lequel l'échantillon (1) est monté sur un système de déplacement (3) adapté pour déplacer l'échantillon (1) par rapport à l'ouverture optique (20) fixe.

11. Dispositif selon la revendication 10 dans
30 lequel le système de déplacement (3) est un système piézo-électrique.

12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 11 dans lequel l'ouverture optique (20)

est une zone vide de l'écran opaque (2).

13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 11 dans lequel l'ouverture optique (20) est une zone de l'écran opaque (2) transparente à la
5 fréquence $\omega/2\pi$.

14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 et 3 à 13 géométriquement agencé pour que le deuxième faisceau traverse l'échantillon (1) et l'écran opaque (2) dans un ordre quelconque, dans son parcours vers
10 le système de collection (40), le dispositif étant géométriquement agencé pour que le premier et le deuxième faisceau puissent être collectés au niveau du coupleur de faisceaux (92).

15. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 et 3 à 13 géométriquement agencé pour que le deuxième faisceau se réfléchisse à la surface de l'échantillon (1) et traverse l'écran opaque (2) dans un ordre quelconque avant de se diriger vers le système de collection (40), le dispositif étant géométriquement agencé
20 pour que le premier et le deuxième faisceau puissent être collectés au niveau du coupleur de faisceaux (92).

16. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 15 dans lequel le détecteur optique (5) est un détecteur monocanal.

25 17. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 16 dans lequel l'ouverture optique est installée à l'extrémité de la pointe (200) du cantilever (2) d'un microscope à force atomique.

18. Procédé de détection optique pour caractériser
30 en amplitude et en phase le champ électromagnétique d'une zone d'un échantillon (1), ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- émettre un faisceau lumineux dont le champ

électromagnétique a une pulsation ω ,

- diviser le faisceau (91) en un premier faisceau définissant une première voie, dite voie référence (80) et un deuxième faisceau définissant une deuxième voie dite
5 voie échantillon (70),

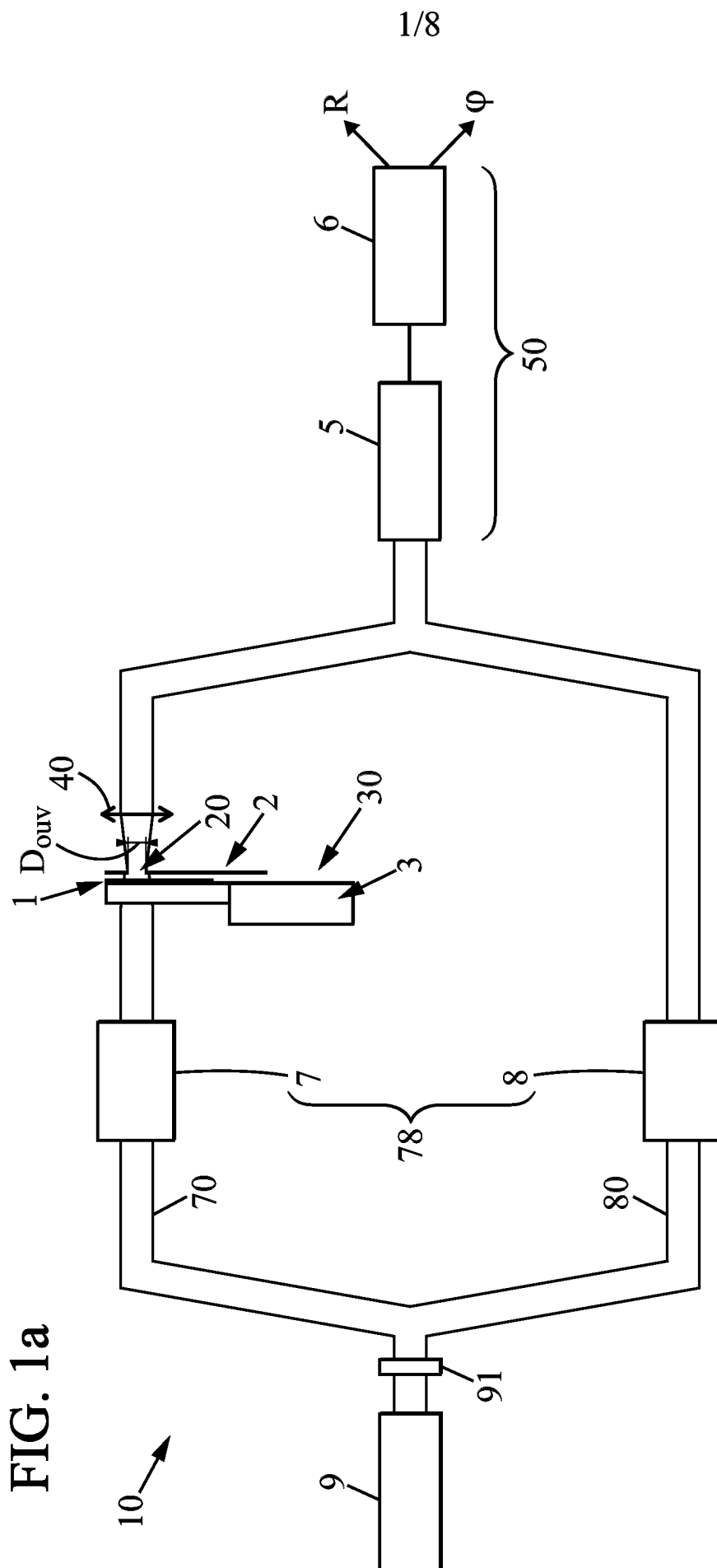
- placer sur la voie échantillon (70) un échantillon (1) et un écran opaque (2) comprenant une ouverture optique (20) placé au niveau de la zone à proximité de l'échantillon (1),

10 - décaler en fréquence les champs électromagnétiques des deux faisceaux d'une fréquence δ ,

- collecter les faisceaux issus des deux voies (70, 80), le faisceau issu de la voie échantillon (70) se propageant dans l'espace libre au moins dans un parcours
15 entre l'ouverture optique (20) et un système de collection (40) placé sur la voie échantillon,

- détecter le signal issu de l'interférence entre les faisceaux issus des deux voies (70, 80) et couplés via ledit coupleur de faisceaux (92),

20 - déduire l'amplitude et la phase du champ électromagnétique d'une zone de l'échantillon (1).



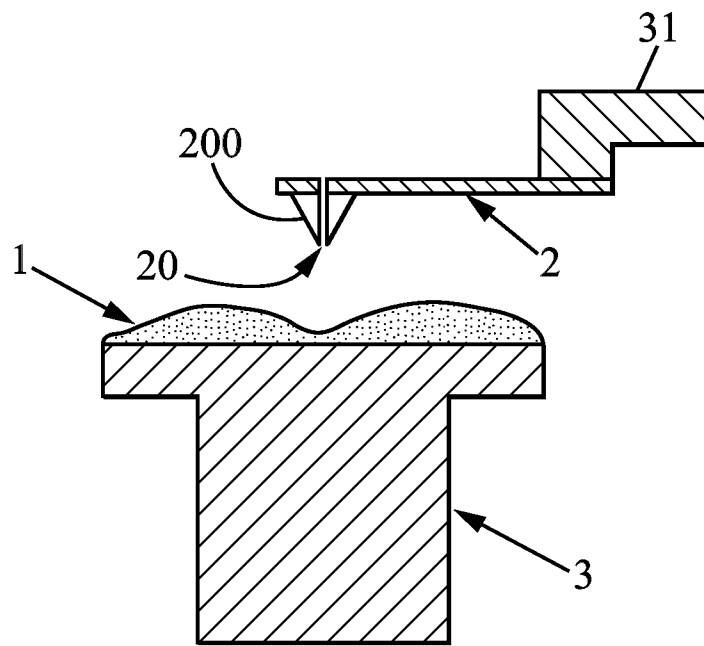


FIG. 1b

FIG. 2

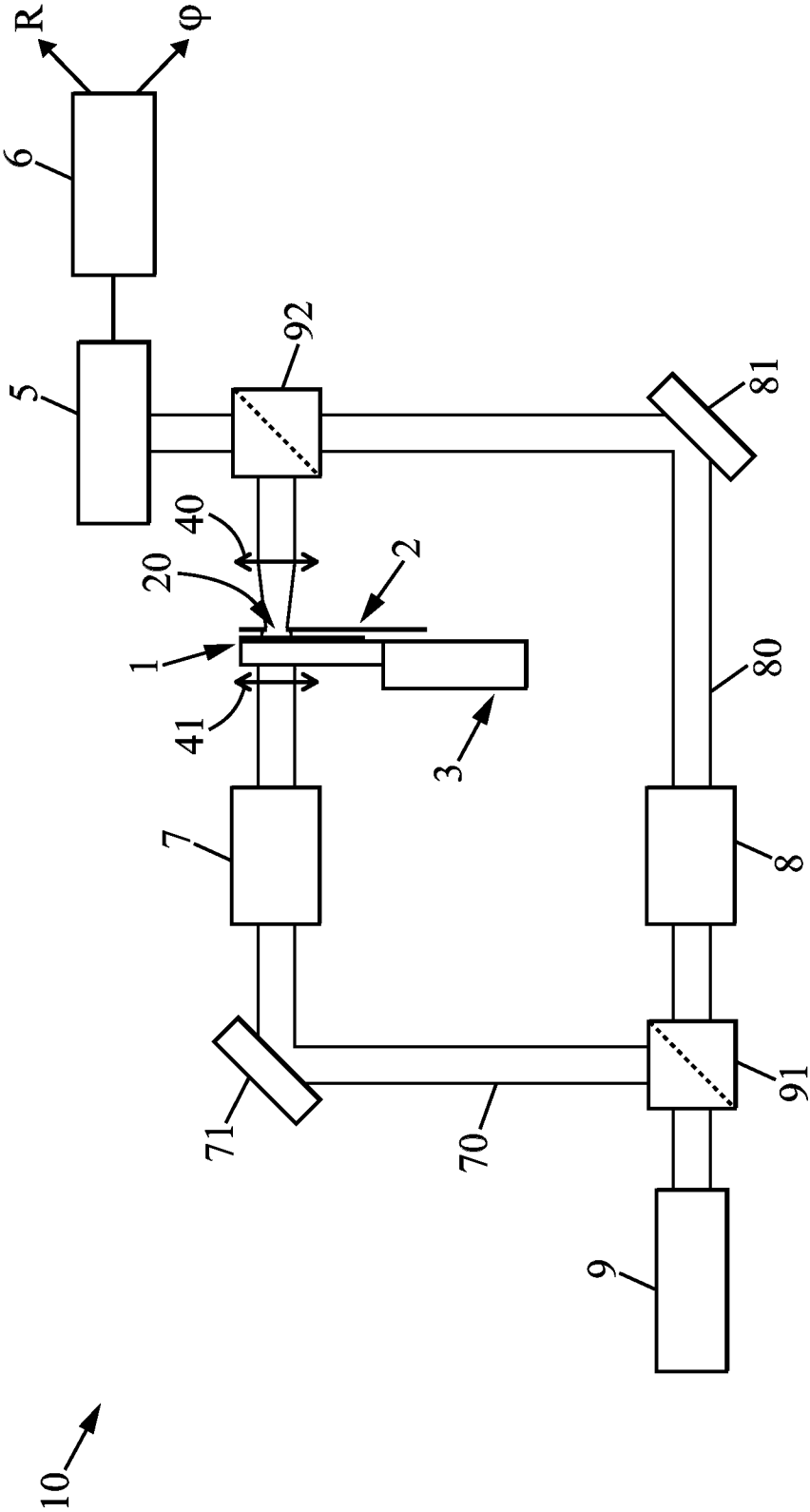
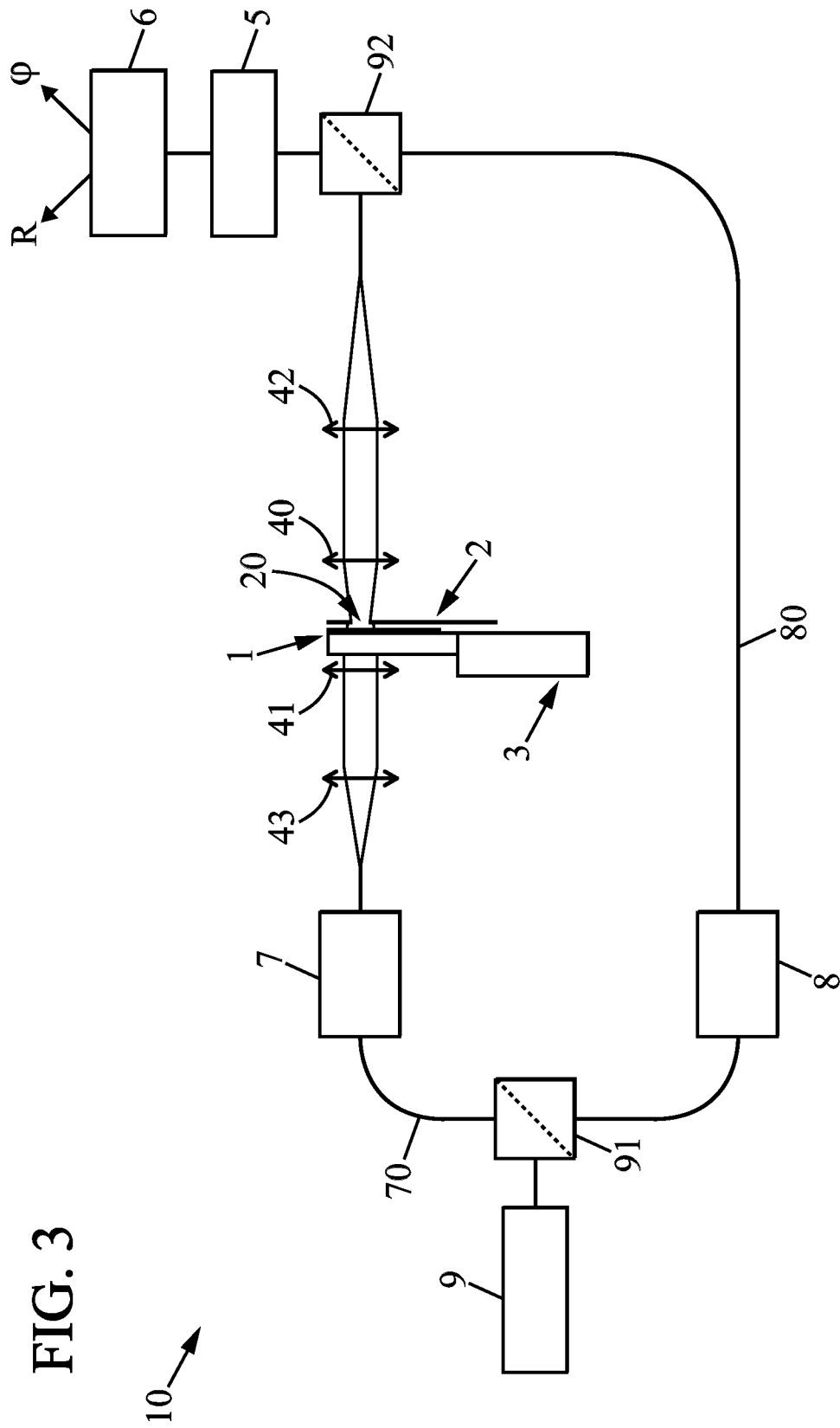


FIG. 3



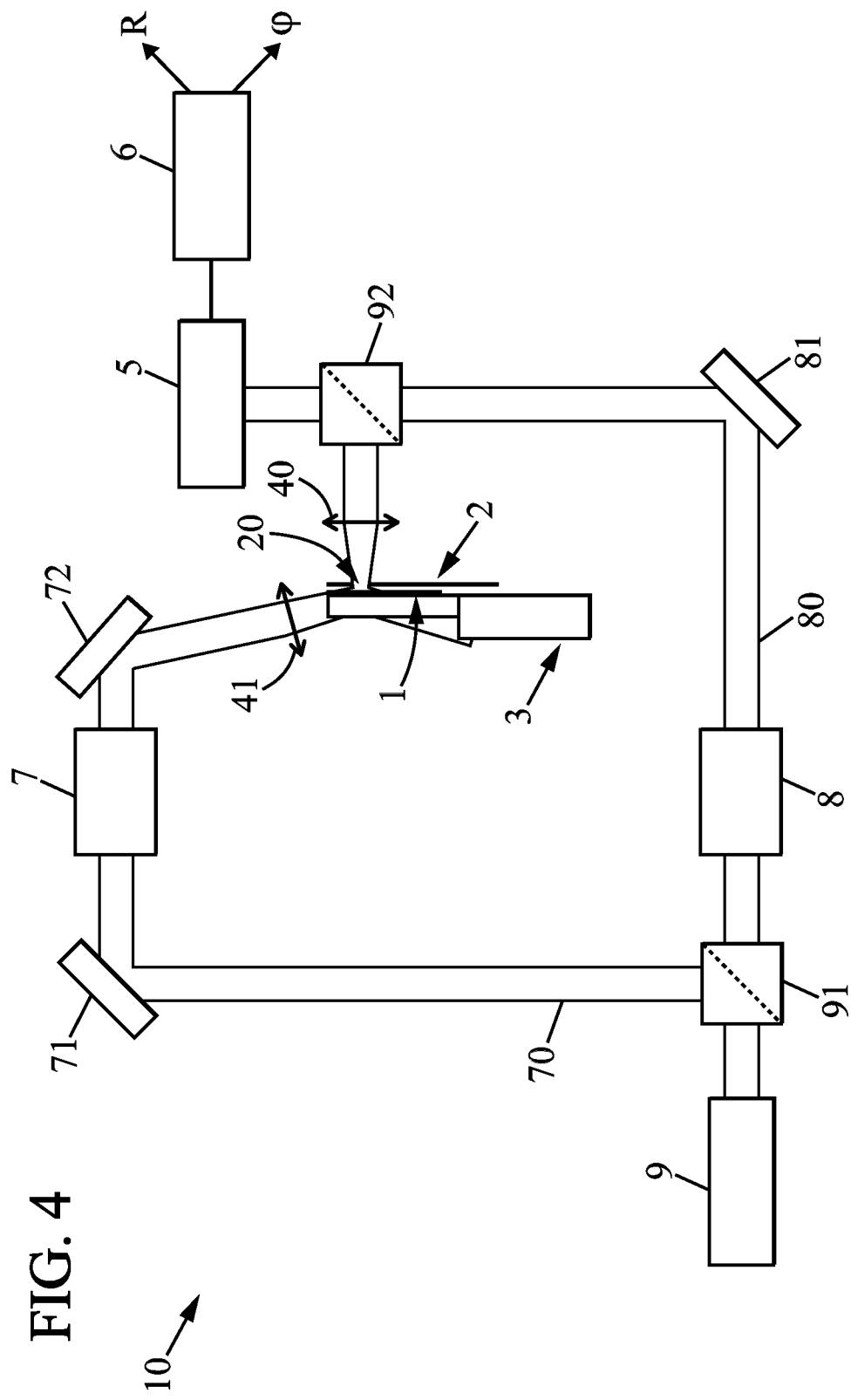


FIG. 4

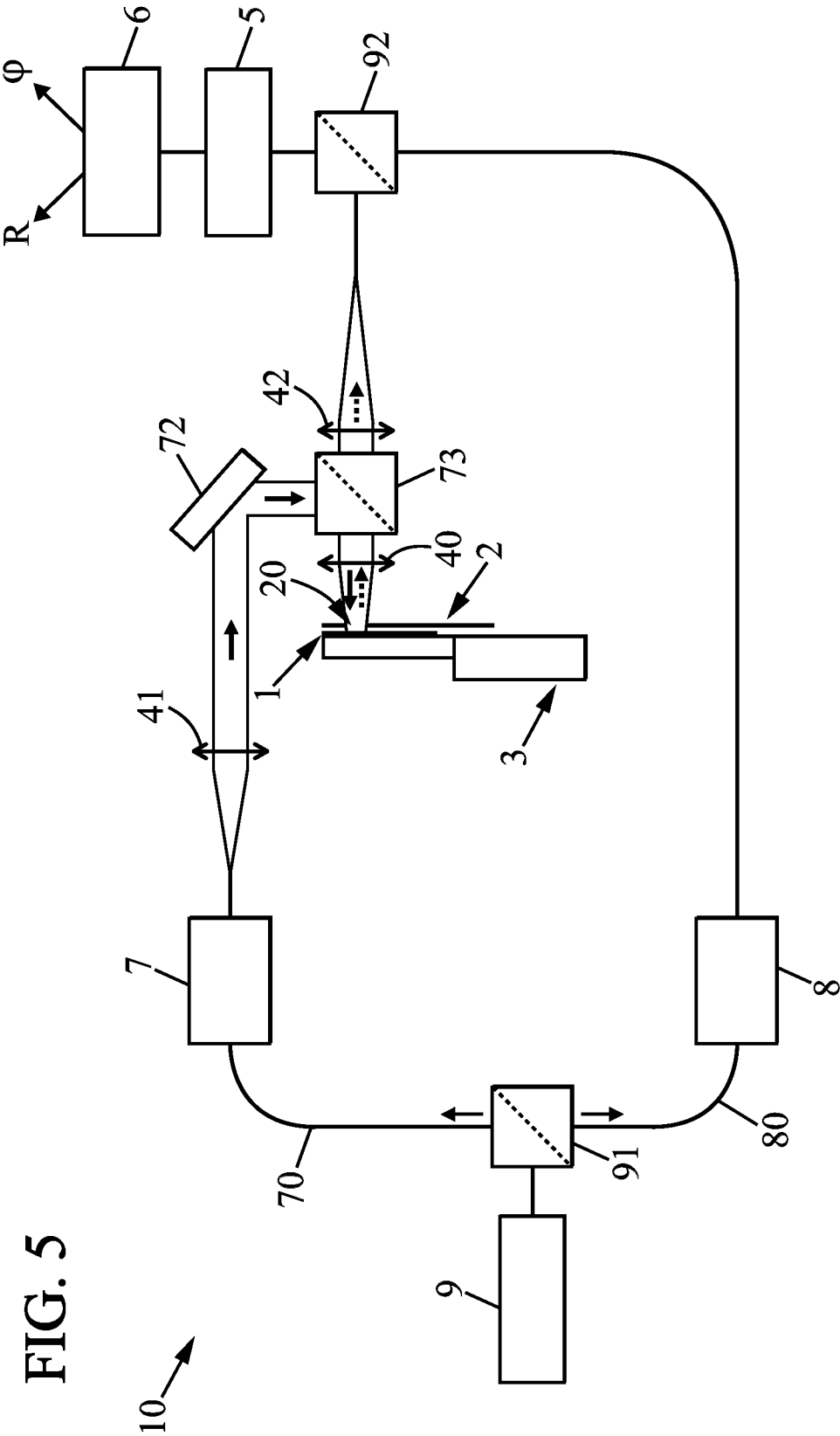


FIG. 5

FIG. 6

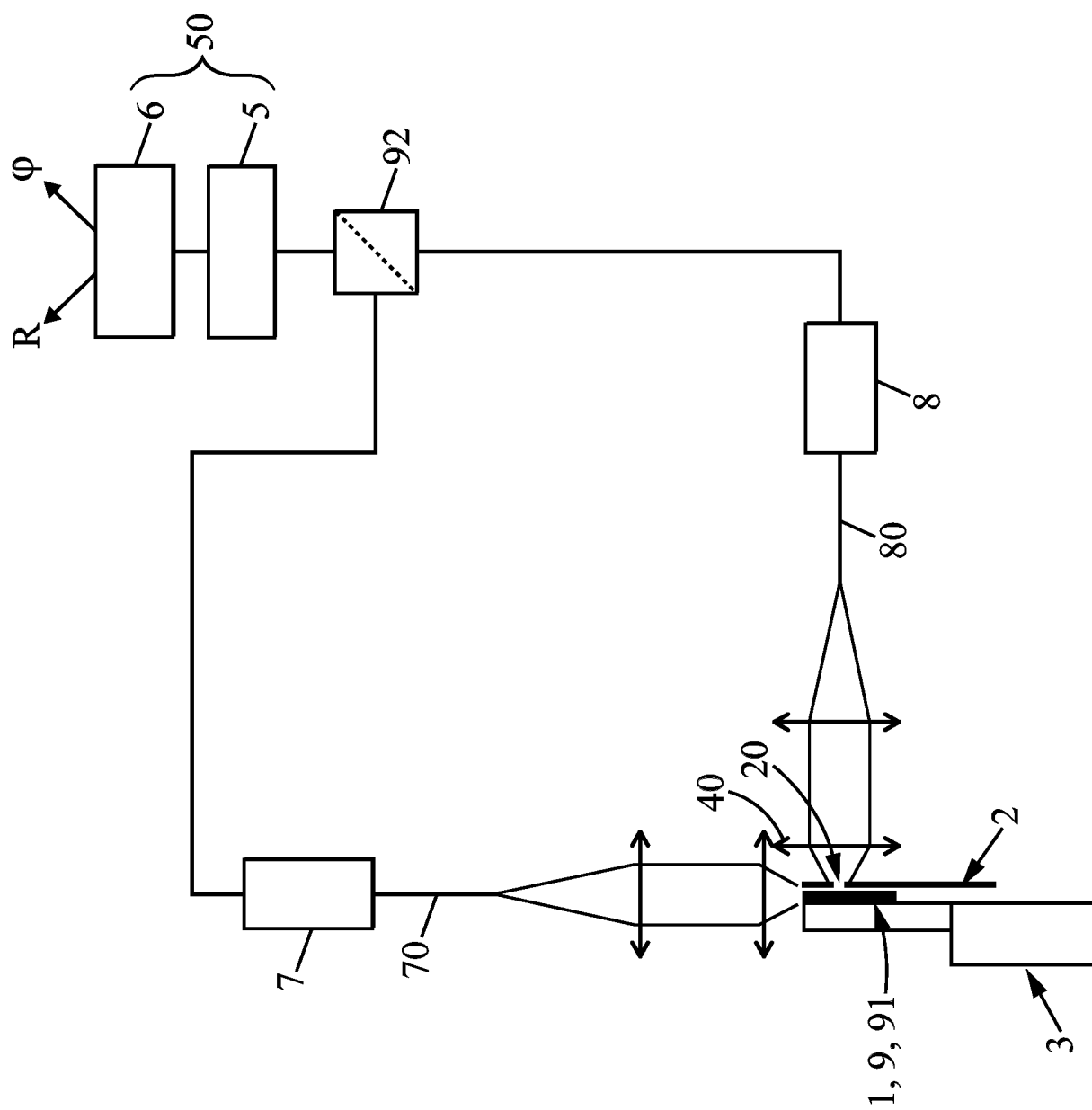


FIG. 7

