

Micro-interféromètre monolithique sur silicium pour applications en espace libre

Philippe ARGUEL
LAAS-CNRS / Université de Toulouse
arguel@laas.fr

L'intégration de fonctions optiques au sein de systèmes compacts et robustes permet d'envisager la réalisation de dispositifs répondant à des besoins issus de nombreux domaines d'applications. Au-delà des procédés d'hybridation qui restent aujourd'hui les plus répandus pour accéder à ces systèmes, la recherche de solutions monolithiques constitue un enjeu de première importance pour leur développement à grande échelle. Ainsi, la mise en œuvre de technologies issues de la microélectronique est une voie privilégiée pour l'élaboration de dispositifs innovants, à large diffusion et à fortes potentialités, notamment grâce à l'intelligence procurée par l'association de diverses fonctions électroniques. Un tel dispositif est présenté ici : il s'agit d'un micro-interféromètre dont le principe de fonctionnement a permis une intégration monolithique de fonctions optique et photo-déetectrice sur silicium, lui conférant de grandes potentialités pour le développement de nouveaux micro-systèmes optiques.

Les atouts d'un mode de fabrication collective

La miniaturisation de fonctions optiques et leur intégration au sein de micro-systèmes sont aujourd'hui des voies privilégiées pour accroître la compacité et la robustesse d'un grand nombre de dispositifs. Ces fonctions optiques peuvent, en outre, être associées à des fonctions électroniques ou mécaniques au sein de micro-systèmes plus complexes, communément appelés MOEMS (*micro-opto-electro-mechanical systems*), dont les fonctionnalités accrues sont recherchées pour de nombreuses applications, notamment dans le domaine des capteurs et de l'instrumentation. Cependant, bien que des procédés technologiques issus de la micro-électronique permettent la réalisation de la plupart des éléments constitutifs de ces systèmes, leur élaboration simultanée sur un support commun se heurte à d'importantes difficultés. En effet, selon leur nature, les éléments recherchés sont obtenus par des filières technologiques différentes et peu compatibles entre elles. De plus, les éléments optiques font généralement appel à des

dimensions et géométries spécifiques qui imposent une réalisation dissociée, suivie de leur hybridation sur une plate-forme destinée à accueillir les différentes fonctions à associer. Cette démarche est la plus répandue pour la réalisation de micro-systèmes optiques pouvant notamment devenir « intelligents » grâce à la mise en œuvre de diverses fonctions électroniques de conditionnement et de traitement du signal, préalablement intégrées sur une plate-forme d'accueil en silicium.

Toutefois, parallèlement à cette démarche d'hybridation, on peut trouver quelques exemples de dispositifs obtenus par intégration entièrement monolithique et produits à faible coût par la mise en œuvre d'une technologie collective issue de la micro-électronique. Il s'agit là de dispositifs relevant essentiellement du domaine de la photo-détection dont le mode de réalisation collective constitue un atout majeur permettant d'atteindre compacité, robustesse, intelligence, et diffusion à grande échelle. Le micro-interféromètre présenté dans la suite est obtenu par la mise en œuvre de ce dernier mode de réalisation et bénéficie ainsi des avantages qui lui sont associés.

Principe du micro-interféromètre

Le principe de fonctionnement de divers capteurs optiques repose sur la détection de franges d'interférences. Ainsi, pour mesurer le paramètre physique visé, le capteur met en œuvre un interféromètre qui permet de déterminer la valeur du déphasage induit par ce paramètre entre un faisceau « sonde » et un faisceau de « référence ». Au-delà de la source lumineuse et de l'élément séparateur du faisceau

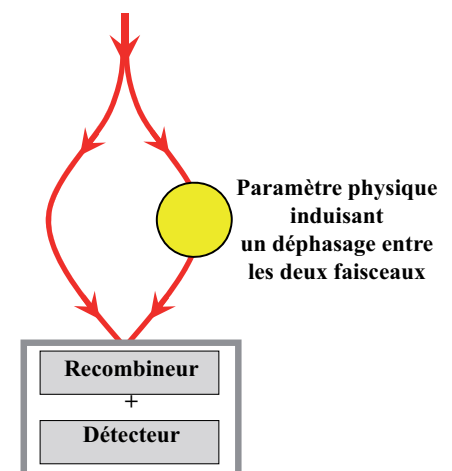


Figure 1. Représentation schématique d'un capteur optique interférentiel.

initial en deux bras, un tel capteur doit alors associer (figure 1) :

- un recombineur de faisceaux procurant la superposition du faisceau de référence et du faisceau sonde après qu'il ait été déphasé ;
- un photo-détecteur positionné de sorte à recevoir le produit d'interférence de ces deux faisceaux et délivrant un signal permettant d'effectuer la mesure souhaitée.

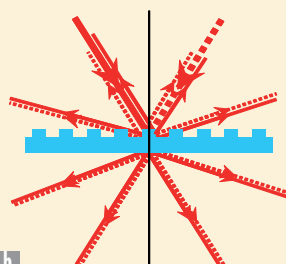
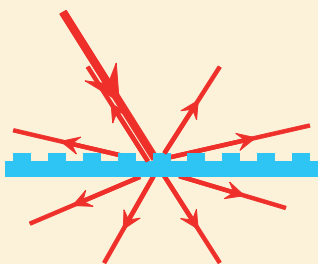
Parmi les différentes solutions pour recombinaison de deux faisceaux, et dans la recherche de l'intégration des différentes fonctions au sein d'un microsystème optique, la mise en œuvre d'un réseau de diffraction présente l'avantage d'être réalisable par des technologies micro-électroniques conventionnelles. Cet élément sera donc disposé de sorte à intercepter les faisceaux constituant les deux bras de l'interféromètre et à en assurer la mise en interférence. Dans ce cadre, une configuration commode consiste à travailler avec des faisceaux incidents symétriques par rapport à la normale à la surface du réseau. La recherche de l'incidence de Littrow (voir encadré) garantit alors une superposition parfaite de tous les ordres de diffraction. Le faisceau de sonde et le faisceau de référence sont ainsi diffractés dans les ordres transmis et réfléchis par le réseau et, selon chaque direction de diffraction, ces deux faisceaux engendrent des ondes qui interfèrent et dont le produit d'interférence est fonction du déphasage induit par le paramètre physique à mesurer. Lorsque la valeur de ce paramètre

varie, le déphasage évolue et entraîne une modification des conditions d'interférence dans chaque direction de diffraction qui se traduit par une modification de la répartition de l'énergie totale [1]. Ainsi, selon la valeur du déphasage, la puissance optique apportée par les deux faisceaux incidents peut se répartir majoritairement dans les ordres transmis ou dans les ordres réfléchis.

Afin de mesurer l'évolution de cette répartition de puissance, il suffit de disposer, sous le réseau, une photodiode qui intercepte tous les ordres transmis. L'exploitation du courant délivré par cette seule photodiode permet alors d'accéder à la valeur du déphasage et, par suite, à la valeur du paramètre physique à mesurer. Le choix de cette configuration innovante reposant sur la simple superposition d'un réseau de diffraction et d'une photodiode présente l'avantage considérable d'être compatible avec une réalisation entièrement monolithique. Dans cette perspective, l'utilisation d'un substrat en silicium permet, à la fois, la réalisation de photodiodes efficaces dans le domaine spectral du visible et proche infrarouge, la réalisation de réseaux de diffraction par divers procédés, et l'association de fonctions électroniques génériques ou spécifiques à l'exploitation visée. Les technologies micro-électroniques offrent ainsi la possibilité d'accéder à un micro-interféromètre compact, robuste, « intelligent » et bon marché, essentiellement dédié à des applications en espace libre.

Encadré

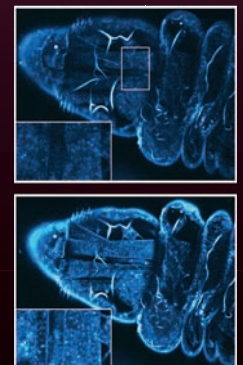
Un faisceau lumineux tombant sur un réseau de diffraction est dit « en incidence de Littrow » s'il se superpose à un des faisceaux diffractés par le réseau (figure a). La répartition des directions de diffraction est alors symétrique par rapport à la normale à la surface du réseau. Lorsque le faisceau superposé correspond à l'ordre m de diffraction, on est en présence de l'incidence de Littrow d'ordre m . Ainsi, deux faisceaux en incidence de Littrow selon le même ordre, et symétriques par rapport à la normale à la surface du réseau (figure b), procurent la superposition de tous leurs ordres de diffraction.



Optique adaptative en microscopie



Le miroir déformable mirao 52-e, avec ou sans analyseur de surface d'onde HASO, avec nos logiciels CASAO ou GENAO, offre la meilleure capacité de correction et permet d'améliorer la résolution de l'image de manière spectaculaire.



En haut, image d'une larve de drosophile en microscopie THG non-corrigée. En bas, image du même échantillon corrigée avec l'optique adaptative.

Images de E. Beaurépaire, D. Débarre et N. Olivier, Ecole Polytechnique, LOB

Venez nous voir en juin à MIFOBIO du 3 au 9 octobre à Talmont Saint Hilaire. Appelez le +33 (0)1 64 86 15 60 ou visitez :

imagine-optic.com

Imagine Optic™



©2012 Imagine Optic. Tous droits réservés. M.PUB Photoniques 59 1207

Évaluation des performances

La photodiode située sous le réseau de diffraction délivre un courant électrique dont l'intensité dépend du déphasage introduit entre les deux bras de l'interféromètre par le paramètre physique à mesurer. Lorsque le déphasage évolue de façon monotone, la variation de l'intensité du photocourant présente une composante continue et une composante alternative d'allure sinusoïdale (figure 2). Pour une puissance incidente donnée, la composante continue est essentiellement conditionnée par la nature et la géométrie du réseau de diffraction, tandis que la composante alternative reflète l'évolution de l'état d'interférence entre les deux faisceaux incidents. Les performances du micro-interféromètre sont alors évaluées en termes de contraste que l'on définit comme le rapport entre l'amplitude de la composante alternative du photocourant et la valeur de sa composante continue.

La recherche d'une valeur de contraste élevée suppose donc la réalisation d'un dispositif dont le réseau de diffraction procure un net renforcement des ordres transmis ou des ordres réfléchis en fonction de l'évolution du déphasage entre les deux faisceaux incidents. Une étude spécifique des caractéristiques du réseau de diffraction a montré que la mise en œuvre d'un réseau de phase (réseau directement gravé dans le matériau constituant la photodiode) ne permettait pas d'obtenir des contrastes supérieurs à 25%. En revanche, la mise en œuvre d'un réseau d'amplitude (réseau obtenu par dépôt et élimination sélective d'un métal à la surface de la pho-

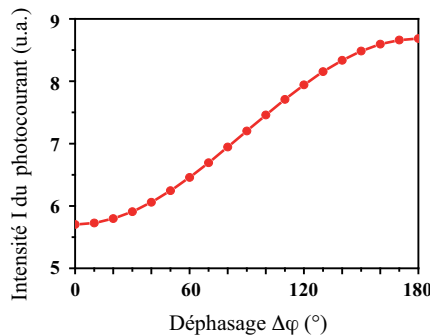


Figure 2. Variation de l'intensité I du photocourant délivré par le dispositif en fonction du déphasage $\Delta\phi$ entre les deux faisceaux incidents. On montre que cette variation est de la forme $I(\Delta\phi) = A - B \cos(\Delta\phi)$, où A et B sont des paramètres fixés par les caractéristiques du dispositif.

totodiode) permet l'obtention de contrastes supérieurs à 90 %, rendant ces dispositifs très concurrentiels des systèmes conventionnels pour de nombreuses applications. Cette deuxième voie d'intégration présente en outre l'avantage de faire appel à une technologie bien maîtrisée et largement diffusée, ne nécessitant pas la gravure parfois délicate du matériau semiconducteur. Enfin, la présence de métal sur la surface de la photodiode peut être mise à profit pour augmenter la surface de contact électrique et appliquer ainsi une polarisation plus efficace à cet élément.

Démonstration expérimentale : la mesure de déplacement

La première démonstration expérimentale d'un micro-interféromètre monoli-

thique reposant sur le principe qui vient d'être décrit a été réalisée dans le cadre de l'étude d'un capteur optique de déplacement [2]. Ce premier dispositif mettait en œuvre un réseau de phase et procurait un contraste de l'ordre de 6 %. La recherche d'un contraste plus élevé a alors conduit au développement de nouvelles structures [3] dont un exemple est donné ici (figure 3). Il s'agit d'une photodiode en silicium obtenue par un procédé technologique standard et dont la surface a été entièrement recouverte par une couche d'aluminium lors d'une étape classique de métallisation. Après photolithographie d'un réseau de diffraction sur cette surface métallique, le réseau d'amplitude recherché a été obtenu par élimination de l'aluminium dans les zones destinées à être transparentes. Le pas du réseau a été fixé à $1 \mu\text{m}$ de sorte à travailler en lumière rouge sous une incidence voisine de 40° correspondant à l'incidence de Littrow d'ordre 2.

Le micro-interféromètre a alors été testé dans le cadre de la mesure d'un déplacement, et la figure 4 montre le signal délivré par ce dispositif pour une vitesse de déplacement quasi-uniforme. Une accélération du déplacement se traduirait par une réduction de la pseudo-période de la composante alternative du signal observé et, inversement, un ralentissement entraînerait une augmentation. Sur cet exemple, le rapport cyclique du réseau (largeur des zones opaques / pas du réseau) est égal à 0,65 et conduit à une valeur de contraste voisine de 70 %. Un contraste supérieur pourrait être obtenu par la réalisation d'un réseau présentant un plus grand rapport cyclique.

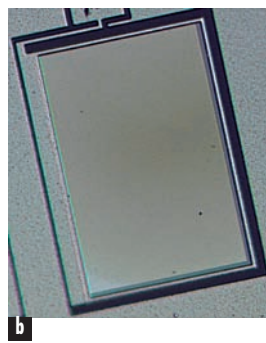
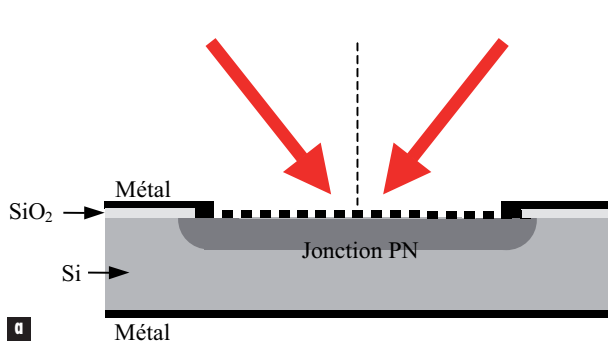


Figure 3. a. Représentation schématique du dispositif intégrant un réseau d'amplitude et une photodiode (jonction PN dans silicium). b. Photographie du dispositif étudié : les dimensions de la photodiode sont $400 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$.

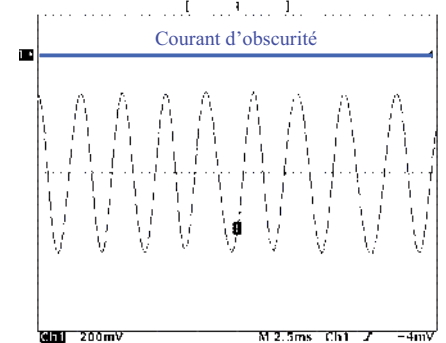


Figure 4. Observation à l'oscilloscope du signal délivré par le dispositif lors de la mesure d'un déplacement.

La pseudo-période du signal, quant à elle, correspond à une évolution du déphasage égale à 2π , soit un déplacement de $0,5 \mu\text{m}$ pour le système étudié ici. Ainsi, un simple comptage des passages par zéro de la composante alternative de ce signal permet de mesurer un déplacement avec une résolution égale à 250 nm . Une résolution bien supérieure peut aisément être obtenue par l'adjonction d'une fonction électronique d'interpolation comme cela est utilisé dans bon nombre de systèmes. D'autre part, la juxtaposition de deux interféromètres de ce type, dont les réseaux respectifs sont décalés d'un quart de période, conduit à deux signaux électriques en quadrature de phase permettant de connaître le sens du déplacement mesuré.

Vers un large champ d'applications

Au-delà de la mesure de déplacement qui a constitué le cadre de la première démonstration expérimentale de ce micro-interféromètre, de nombreux paramètres physiques induisant un déphasage entre les deux faisceaux tombant sur le dispositif peuvent être mesurés par ce moyen. On peut ainsi envisager la mesure de concentration, épaisseur, dilatation, température, pression... Outre la métrologie, l'accès au déphasage procuré par un tel dispositif ouvre également la voie au développement de systèmes pour le stockage optique, l'imagerie tridimensionnelle, l'holographie digitale... Une configuration matricielle, permettrait d'accéder à l'analyse de front d'onde par un système compact et robuste adapté à l'optique adaptative embarquée. D'autre part, une caractéristique importante de ce micro-interféromètre, liée à son réseau de diffraction unidimensionnel, est sa sensibilité à la polarisation des faisceaux interceptés. Ainsi, la juxtaposition de dispositifs aux réseaux « croisés » peut être envisagée pour accéder à cette information. Enfin, la gamme spectrale explorée peut être ajustée par le choix du matériau semi-conducteur du photodétecteur, ce qui permet notamment d'envisager des applications aux longueurs d'onde comprises

entre 1 et 2 micromètres. L'exploitation de l'ensemble de ces propriétés ouvre alors la voie à la conception de composants matriciels et monolithiques procurant simultanément la mesure de l'amplitude, du déphasage et de la polarisation d'une onde lumineuse se propageant en espace libre...

Une technologie qui favorise le développement des microsystemes optiques

La réalisation de microsystemes optiques est généralement obtenue par l'hybridation de diverses fonctions sur une plate-forme commune. Cependant, la recherche de dispositifs compacts, robustes et bon marché suppose l'association de l'ensemble de ces fonctions par un procédé d'intégration monolithique. Dans ce cadre, le dispositif qui vient d'être présenté montre que des fonctions optique et photo-déetectrice peuvent être associées de façon originale pour constituer un micro-interféromètre répondant à ces exigences. La technologie mise en œuvre pour son élaboration est directement issue de la technologie micro-électronique CMOS initialement dédiée à l'intégration de fonctions électroniques. Cette technologie, largement diffusée et maîtrisée, est ainsi particulièrement bien adaptée pour conférer de l'intelligence aux systèmes qu'elle permet de réaliser. Cette démarche d'intégration multifonctionnelle monolithique autorise alors l'émergence d'une nouvelle génération de dispositifs dont les propriétés constituent un atout considérable pour le développement des microsystemes optiques.

Références

- [1] Y. Jourlin, O. Parriaux et A.V. Tishchenko, *Phase relationships of a two-beam grating recombiner*, Optical Engineering, vol. 40, n°8, pp. 1464-1470 (2001)
- [2] P. Arguel, J. Valentin, S. Fourment, F. Lozes-Dupuy, G. Sarrabayrouse, S. Bonnefont, Y. Jourlin, S. Reynaud, N. Destouches, A.V. Tishchenko et J. Jay, *A monolithic optical phase-shift detector on silicon*, IEEE Sensors Journal, vol. 5, n°6, pp. 1305-1309 (2005)
- [3] P. Arguel, F. Lozes-Dupuy, G. Sarrabayrouse et O. Bouchard, *Dispositif de détection d'interférences monolithique intégré*, Brevet CNRS n° WO 2008074939 (A1) (2009)



Evaluations des nouvelles générations d'éclairage



T-10A
Luxmètre portable à filtre



CL-500A
Luxmètre/Spectroradiomètre portable

PRECIS / PERFORMANT
FIABLE / FACILE / RAPIDE

• T-10A

- Conforme aux normes JIS et DIN
- Mesure multi-points (2 à 30)
- Compatible PWM
- Liaison USB

• CL-500A

- Mesures d'éclairement, de couleur, de température de couleur, d'Indice de Rendu des Couleurs (IRC), de pureté, de la longueur d'onde dominante

ScienTec c'est aussi ...

Sources de référence

Vidéocolorimètres

Photomètres

Chromamètres



+33 (0)1.64.53.27.00
info@scienteec.fr / www.scienteec.fr