



Cette lettre est l'occasion de vous tenir informé(e) régulièrement de l'avancée des projets de la Centrale de Technologie Universitaire. N'hésitez pas à consulter notre site WEB www.ief.u-psud.fr. Vous y trouverez la liste des principaux équipements de la plate-forme, les conditions d'accès, les archives de l'aCTU. Vous pourrez également effectuer une visite panoramique de la Centrale.

Dans ce
numéro :

- ♦ Piège de cristal
- ♦ Excitation par couplage évanescent de plasmons de surface localisés sur guide SOI
- ♦ Stages
- ♦ Informations pratiques

Piège de cristal

Xavier Checoury, Zheng Han, Delphine Néel, Sylvain David, Moustafa El Kurdi, Philippe Boucaud
Institut d'Electronique Fondamentale, Bât. 220, Université Paris-Sud 11, 91405 Orsay, France

Pouvoir «contrôler» la lumière comme l'on «contrôle» les électrons dans les dispositifs électroniques d'aujourd'hui, un tel challenge semble a priori bien difficile à relever ! C'est pourtant la performance que peuvent réaliser les cristaux photoniques. Des progrès spectaculaires ont été enregistrés au cours des dernières années dans la réalisation de cristaux photoniques constitués de réseaux périodiques de trous percés dans un matériau semi-conducteur et notamment dans le silicium, matériau de référence de la microélectronique.

I - Bande interdite photonique

Le cristal photonique est apparu relativement récemment dans la littérature scientifique (**encadré 1**) et il a ainsi été baptisé par analogie avec les structures électroniques et leur bande électronique interdite. Dans un cristal atomique, l'énergie des électrons ne peut pas prendre des valeurs comprises dans la bande interdite électronique (ou gap). Dans un cristal photonique, ce sont les photons dont l'énergie (ou de manière équivalente la fréquence) ne peut être dans la bande interdite photonique. La propagation dans le cristal photonique de lumière dont la longueur d'onde se situe dans cette bande y est donc interdite. Un émetteur lumineux placé au sein d'un cristal photonique voit donc son émission fortement modifiée, si sa longueur d'onde fait partie de cette bande interdite. Il est ainsi possible de modifier et contrôler l'émission lumineuse d'une source couplée au cristal photonique. Il s'agit de trouver un cristal photonique possédant des bandes interdites de propagation «gaps» intéressantes, autrement dit un matériau qui interdit à

Encadré 1

Dès 1987, il a été montré théoriquement qu'il était possible d'interdire la propagation de la lumière dans des matériaux diélectriques usuels grâce à la création d'une périodicité artificielle. De tels matériaux sont appelés cristaux photoniques (CP) par analogie avec les cristaux semi-conducteurs caractérisés par une bande interdite électronique découlant de la périodicité cristalline. La propagation des photons est interdite lorsque leur énergie est située dans une plage d'énergies ou de fréquences appelée bande interdite photonique. En général, cette bande interdite photonique apparaît pour des périodes du cristal voisines de la longueur d'onde de la lumière, c'est-à-dire voisines de quelques centaines de nanomètres dans le cas de la lumière visible.

Dans le monde de l'optique, les cristaux photoniques sont apparus comme des généralisations des miroirs de Bragg (figure 1 gauche). Connus depuis la fin du XIX^{ème} siècle, ces derniers sont des empilements périodiques dans une direction de l'espace de couches diélectriques d'indices de réfraction différents. Ils possèdent une bande interdite photonique qui se manifeste par une très forte réflectivité dans une certaine gamme de fréquences correspondant à la bande interdite. De telles structures sont aujourd'hui largement utilisées dans les systèmes de télécommunications par fibres optiques ou dans la fabrication de filtres optiques. Étant assimilables à des cristaux photoniques à une dimension, ils ne permettent cependant le contrôle de la lumière que dans une direction de l'espace. Au contraire, les cristaux photoniques tri-dimensionnels (figure 1 droite) sont périodiques dans les trois directions de l'espace et permettent de contrôler la lumière totalement dans ces trois directions. Cependant, leur fabrication relève, encore aujourd'hui, d'une grande difficulté technologique : il est, en effet, délicat dans chacune des trois directions de l'espace est de seulement quelques centaines de nanomètres.

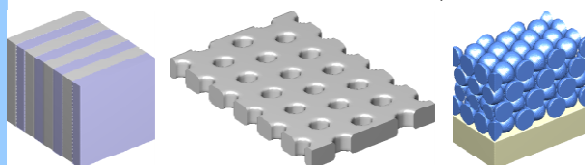


Figure 1 : De gauche à droite, vues schématiques de cristaux photoniques à une, deux et trois dimensions. Gauche, miroir de Bragg. Centre, cristal photonique bi-dimensionnel en approche membrane. Droite empilement de sphères de type opale reposant sur un substrat.

Pour plus
d'informations sur
l'aCTU contactez :
Benoit.belier@ief.u-
psud.fr

la lumière de se propager dans certaines gammes de longueurs d'onde (gaps), et ceci quelle que soit sa direction de propagation. Ce matériau, opaque aux longueurs d'onde interdites, doit redevenir transparent à l'extérieur de ces gaps. En utilisant les cristaux photoniques, on peut par exemple envisager la fabrication de cavités parfaites. Un photon placé dans cette cavité ne pourra s'en échapper, ou de manière plus réaliste sa probabilité d'en sortir sera très faible. Les applications pratiques de tels matériaux sont du plus grand intérêt. Parmi la (très) longue liste de ces applications, les cavités optiques font figure de brique de base. En effet, les cavités optiques à cristaux photoniques de grands facteurs de qualité ($\sim 10^6$) et de petit volume modal ($\sim 0,1 \mu\text{m}^3$) ont deux grands domaines d'application : la réalisation de composants sélectifs en longueur d'onde comme des filtres ainsi que des multiplexeurs/démultiplexeurs pour le traitement optique des signaux. L'autre domaine d'application, plus fondamental, concerne les expériences d'optique quantique où l'on cherche à contrôler l'émission spontanée d'émetteurs uniques (effet Purcell*) ou à mettre en évidence le couplage fort entre un émetteur et le champ qui le manipule (oscillations de Rabi*). Le contrôle accru par les cristaux photoniques de l'émission spontanée en plus du contrôle de l'émission stimulée permet la réalisation de lasers sans seuil ou à très faible seuil tout en présentant de grandes vitesses de modulation. Ces deux applications nécessitent la réalisation de cavités de facteurs de qualité les plus élevés possibles. A l'Institut d'Électronique Fondamentale (IEF), nous avons réussi à fabriquer des cavités à très fort facteur de qualité qui se situent à l'état de l'art mondial. Nous donnerons dans cet article, deux exemples d'applications que nous développons actuellement : des lasers ultra-compacts et des biocapteurs de très grande sensibilité.

II - Des facteurs de qualité record

Une cavité typique à cristal photonique fabriquée à l'IEF est représentée figure 2. La structure, entièrement en silicium, comporte la cavité, deux guides à cristal photonique pour se coupler à la cavité et deux guides standards pour l'injection et la collection de la lumière à partir d'une fibre optique. Les guides à cristaux photoniques sont obtenus par omission d'une rangée de trous dans un cristal photonique autrement parfait. Ils possèdent eux aussi une bande interdite mais sur une plage de fréquences comprise dans la bande interdite du cristal photonique. Ici, la cavité à proprement parler est constituée par un ensemble de trous décalés dans un guide à cristal photonique. Comme indiqué figure 12, le décalage des trous est inférieur à 10 nm, ce qui représente une très faible variation rapport à la périodicité du cristal (420 nm). Ce décalage est néanmoins suffisant pour que la fréquence

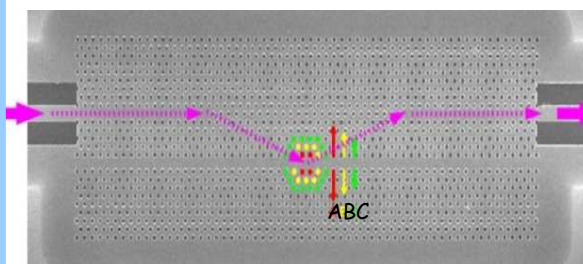


Figure 2: Cavité à cristal photonique et ses guides d'accès. Les facteurs de qualité mesurés peuvent atteindre 2 millions. Les décalages des trous ABC sont de, respectivement 9, 6 et 3 nm. La période du cristal photonique est de 420 nm et la taille de la structure de 20 μm .

résonance de la cavité soit dans la bande interdite du guide. Le contrôle des propriétés du dispositif est donc obtenu à l'échelle du nanomètre et nécessite des moyens en nanotechnologie ultra-performants.

Dans cette situation, la lumière ne peut alors quasiment pas s'échapper de la cavité car elle est bloquée par la bande interdite du guide et par celle du cristal photonique. Seule une petite fraction de la lumière peut s'échapper verticalement car il n'y a pas de bande interdite dans cette direction et le confinement s'effectue par réflexion totale interne. Dans une telle cavité, qui fonctionne pour des longueurs d'onde proches de 1,55 μm , le temps de vie des photons piégés à l'intérieur est néanmoins supérieur à la nanoseconde, ce qui est une très grande valeur pour des champs optiques oscillant à près de 200 THz. Néanmoins, pour utiliser une telle cavité, par exemple comme filtre, il faut pouvoir coupler de la lumière depuis l'extérieur. Cela peut se faire par exemple, en approchant latéralement des guides à cristaux photoniques qui permettent de faire entrer par couplage évanescent de la lumière, sans pour autant dégrader les capacités de confinement de la cavité. En effet, plus le guide d'accès est proche, plus la lumière entre facilement dans la cavité mais plus les capacités de confinement de la cavité sont réduites. La lumière entrant par le guide d'accès de gauche ne peut sortir par celui de droite que si sa longueur d'onde est égale à la longueur d'onde de résonance de la cavité. Les cavités réalisées avec ce type de dessin ayant des facteurs de qualité pouvant atteindre deux millions, la précision sur la longueur d'onde, qui est proche de 1,55 μm , doit être de l'ordre de plus ou moins un demi picomètre. On obtient ainsi un filtre optique planaire de très fort facteur de qualité, et donc très sélectif, son le spectre de transmission est représenté figure 3 pour deux couplages différents. On le voit, l'obtention de fort facteur de qualité dépend d'un contrôle fin du couplage de la cavité et de ses guides d'accès mais aussi du dessin de cavité utilisé. On a aussi pu tester d'autres schémas de couplage tel celui représenté figure 4, où la lumière est directement couplée à la cavité sans guide d'accès latéral. La lumière, qui peut aussi être collectée dans le plan à l'autre extrémité du cristal photonique, a ici été collectée par une caméra infrarouge située au-dessus de la cavité. À la fréquence de résonance de la cavité, une petite fraction de la lumière peut s'échapper par la surface de l'échantillon puisqu'il n'y a pas de bande interdite dans la direction perpendiculaire au plan du cristal photonique. Cette lumière peut être collectée par une fibre ou comme ici par une caméra infrarouge pour obtenir une image du champ rayonné par la cavité.

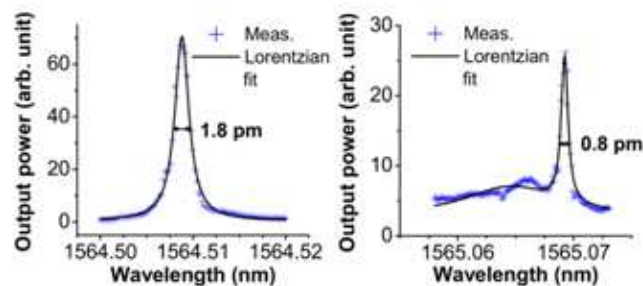


Figure 3: Spectre de transmission pour deux couplages différents : à gauche la cavité et le guide à cristal photonique ne sont séparés que de quatre rangées. Le couplage entre le guide et la cavité est fort mais le facteur de qualité n'est que de 800 000. à droite, le guide à cristal photonique et la cavité sont séparés de cinq rangées, le couplage ainsi que la transmission sont plus faibles mais le facteur de qualité atteint deux millions.

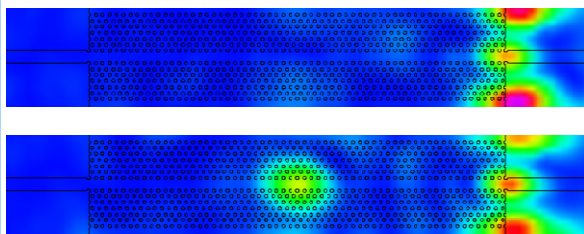


Figure 4: Images infrarouges en fausses couleurs d'une cavité observée par la surface à deux longueurs d'onde différentes. La structure du cristal a été ajoutée pour plus de lisibilité.

Haut: hors résonance la lumière arrivant par la droite est bloquée à l'entrée du cristal photonique qui se comporte comme une barrière infranchissable.

Bas: à la longueur d'onde de résonance de la cavité, la lumière traverse le guide et est en partie rayonnée au niveau de la cavité vers la surface.

Dans tous les cas de figure, si l'on souhaite mesurer une cavité très faiblement couplée et qui présente une faible transmission à la résonance, la lumière effectivement injectée dans la cavité puis collectée par des fibres optiques doit être plus intense que la lumière de fond qui n'a pas été couplée à la cavité ni aux guides d'accès. Pour améliorer le couplage entre une fibre et un cristal photonique, nous avons développé un système de guides suspendus et de pointes adaptatrices, appelées tapers, qui permettent un bon couplage entre une fibre et un cristal photonique tout en ne requérant, comme on le verra, qu'une seule étape de lithographie électronique. La figure 5 à gauche montre ainsi une pointe qui permet de coupler efficacement la lumière provenant d'une fibre optique dans un guide optique suspendu par des poutrelles (figure 5 au milieu). Ces guides suspendus, qui mesurent environ 250 μm de long et 500 nm de large et sont ensuite raccordés au cristal photonique (figure 5 droite), permettent d'avoir un échantillon de taille globale d'environ 0,5 mm plus facilement manipulable que des cristaux photoniques de seulement 25 μm de long. De plus, ces guides sont plus simples et plus faciles à réaliser que des guides à cristaux photoniques.

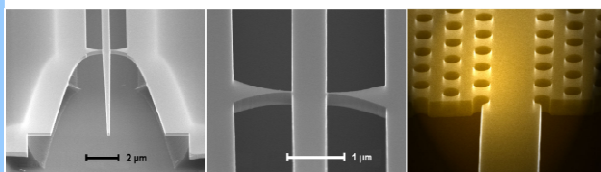


Figure 5: Images par microscopie électronique à balayage des structures fabriquées à l'IEF.

Gauche: Taper inversé permettant un meilleur couplage entre une fibre optique et le guide ruban en silicium. Centre: guide optique suspendu par une poutrelle. Les points d'attache sur le guide font environ 50 nm. Droite: interface entre le guide d'accès et le guide à cristal photonique. La période du cristal photonique est de 420 nm et le rayon des trous est de 100 nm.

III - Une technique de fabrication innovante

La fabrication s'effectue en utilisant les outils de lithographie électronique et de gravure de la salle blanche de l'Institut d'Électronique Fondamentale selon le procédé décrit ci-dessous. Les plaques de silicium utilisées pour la fabrication des cristaux photoniques comportent une couche de 200 nm d'épaisseur de silicium dans laquelle vont être réalisés les cristaux photoniques et qui est isolée du substrat en silicium par une couche de silice de 2 μm

d'épaisseur. Ces plaques de silicium sur isolant (SOI) sont recouvertes d'une couche de résine de 150 nm d'épaisseur. Cette résine, sensible aux électrons, est ensuite insolée en une seule étape au moyen d'un masqueur électronique avec les motifs que l'on souhaite graver dans le silicium. Cette étape de lithographie électronique est réalisée en utilisant une tension d'accélération des électrons de 30 kV (Raith 150), contre 100 kV prochainement grâce à un nouveau masqueur (Nanobeam NB4) qui permettra d'atteindre une meilleure résolution. Les trous sont insolés en suivant une trajectoire en spirale commençant et finissant au centre du trou pour éviter de trop insoler la périphérie des trous et pour minimiser les effets de bord. Cette technique permet la réalisation de trous très réguliers, ce qui est critique pour la réalisation de cavité à cristaux photoniques de très haut facteur de qualité. Après développement, la résine comporte donc des motifs conformes à ceux que l'on veut graver dans le silicium. La gravure est réalisée en plasma ICP (Inductively Coupled Plasma) en chimie fluorée. Si l'on souhaite fabriquer des cristaux photoniques sous forme de membranes suspendues, approche qui permet à l'heure actuelle d'obtenir les plus forts facteurs de qualité, il faut dissoudre la couche d'oxyde enterrée, ce qui se fait usuellement par gravure humide au moyen d'acide fluorhydrique.

Les résultats obtenus sur les cavités à cristaux photoniques ouvrent de nouvelles perspectives quant à la réalisation de lasers reposant sur des processus présentant un très faible gain, comme la diffusion Raman. En effet, les cristaux photoniques, et en particulier les cavités à cristaux photoniques, permettent d'exalter les interactions entre la lumière et la matière. Même pour des puissances incidentes très faibles, le champ électromagnétique est très intense au sein de la cavité à la résonance, du fait de l'effet de « piégeage » de la lumière.

IV - Première application : un laser ultracompact

La diffusion Raman, qui est un processus non-linéaire universellement présent dans les solides, les liquides et les gaz, est couramment utilisée pour caractériser la composition moléculaire et la structure d'un matériau. En effet, le décalage en longueur d'onde entre lumière incidente et lumière diffusée est caractéristique des liaisons chimiques et de la symétrie des molécules responsables de la diffusion. La spectroscopie Raman, ou ses variantes de surface, s'avère donc un outil de choix pour caractériser diverses molécules. Si à terme les cristaux photoniques devraient permettre de réaliser des capteurs ultra-compacts et ultra-sensibles utilisant la diffusion Raman des molécules du milieu baignant le cristal photonique, nous avons commencé par étudier un système plus simple mais présentant lui-aussi un grand intérêt. Il s'agit d'un laser reposant sur la diffusion Raman du silicium, le matériau constituant les cristaux photoniques. L'intérêt d'un tel laser, outre le fait qu'il soit en silicium et de taille permettant l'intégration sur puce, est qu'il présente des fluctuations (on parle aussi de bruit) d'intensité et de phase optiques plus faibles que ceux des lasers semi-conducteurs classiques. De plus, de tels lasers Raman à cristaux photoniques doivent pouvoir être modulés plus rapidement que les autres lasers semi-conducteurs tout en nécessitant des puissances de pompes relativement faibles de l'ordre du milliwatt. En effet, si les micro-cavités à cristaux photoniques permettent d'exalter les effets non linéaires, comme l'effet Raman, grâce au fort confinement du champ électromagnétique, un effet connu sous le nom d'effet

Purcell, qui n'existe que pour les cavités de très faible volume et à fort facteur de qualité, vient aussi exalter le processus de diffusion.

Nous avons ainsi pu mettre expérimentalement en évidence une augmentation du taux d'émission Raman spontanée de près de deux ordres de grandeur dans des guides à cristaux photoniques par effet Purcell comparé à des guides en silicium standards. De plus, nous avons pu obtenir une formule analytique caractérisant cette exaltation en très bon accord avec l'expérience. Ces travaux ont déjà montré que le coefficient de couplage de l'émission spontanée Raman au mode de la cavité est proche de 1, si bien que presque tous les photons émis spontanément le sont dans un unique mode. Un laser construit sur une telle cavité présentera des propriétés uniques en termes de seuil et de rapidité de modulation. Nous avons pu également récemment observer de l'émission Raman stimulée, c'est à dire un effet de gain lié à la diffusion Raman, pour des puissances de pompe de l'ordre de 10 mW dans ces structures. Il s'agit d'un pas supplémentaire vers la réalisation d'un laser ultracompact fonctionnant dans une gamme spectrale où le silicium est transparent.

V - Deuxième application : des biocapteurs ultra sensibles

Une autre application des cavités à cristaux photoniques concerne la réalisation de capteurs optiques. Le facteur de qualité obtenu dans une cavité à cristal photonique pouvant être extrêmement élevés, le moindre changement de l'environnement extérieur du cristal photonique peut suffire à dégrader ce facteur de qualité ou à déplacer de manière significative la fréquence de résonance de la cavité. Ainsi les cristaux photoniques représentent une plateforme intéressante pour la réalisation de nouveaux capteurs ultrasensibles d'espèces chimiques intégrés sur des puces de taille sub-millimétrique. En effet, les cristaux photoniques sont très sensibles à la variation d'indice de réfraction produite par le passage au travers de leurs trous de molécules ou par l'immobilisation d'une molécule à la surface du cristal photonique. Le fonctionnement de tels capteurs est similaire à celui des nombreuses techniques de détection basées sur les variations d'indice induites à la surface de micro-tubes ou de micro-sphères de silice. De plus, au contraire des techniques précédentes, les cristaux photoniques peuvent être dessinés pour localiser le champ électrique dans les régions de faible indice de réfraction (figure 6), c'est à dire dans les trous, ce qui en fait des capteurs beaucoup plus sensibles à de très petites variations d'indice de réfraction.

Fort de la maîtrise déjà obtenue dans la fabrication de cristaux photoniques silicium, nous poursuivons nos études sur le dessin des cavités pour encore augmenter leur facteur de qualité et ainsi les rendre plus sensibles à des variations d'indices de réfraction (**encadré 2**). De plus, nous cherchons de nouveaux dessins de cavités de façon à mieux adapter ces dernières à la détection d'espèces chimiques c'est-à-dire de façon à ce que le champ électromagnétique soit principalement confiné dans le milieu baignant le cristal photonique en silicium.

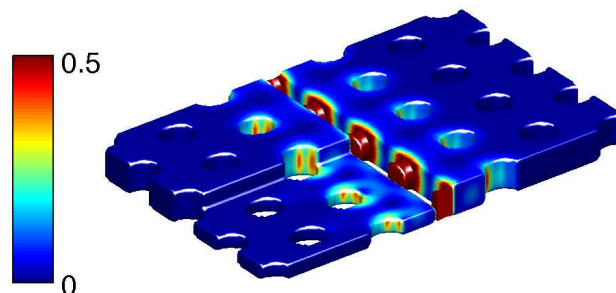


Figure 6: Intensité du champ électrique simulé dans un guide à cristal photonique fendu. Le champ a été calculé au moyen d'une décomposition sur une base d'ondes planes tri-dimensionnelles. La surface iso-intensité en rouge sombre indique que le champ se trouve principalement dans la fente d'air au centre du guide. De tels guides peuvent être utilisés pour réaliser des cavités ultra-sensibles à leur environnement extérieur.

Encadré 2

Des biocapteurs en diamant

Nous démarrons une étude, en collaboration avec le CEA-LIST, visant à terme la fabrication de nanostructures, y compris de cristaux photoniques, à base de diamant pour le développement de biocapteurs optiques. Le diamant est un matériau biocompatible extrêmement bien toléré par le corps humain. Il présente l'avantage d'une extrême stabilité et ne présente aucune réactivité. Pour fonctionner, les biocapteurs en diamant synthétique sont alors fonctionnalisés, c'est-à-dire qu'ils sont recouverts d'un matériau alternatif servant de récepteur sensible à l'espèce chimique recherchée et qui est directement attaché à la surface du diamant. Ceci peut se faire aisément, notamment par liaison covalente, grâce à la terminaison carbone du diamant.

Pour plus
d'informations
contactez :

Xavier.checoury@ief.u-
psud.fr

Excitation par couplage évanescent de plasmons de surface localisés sur guide SOI

Mickael Février¹, Abdelhanin Aassime¹, Philippe Gogol¹, Alexandre Bondi¹, Robert Megy¹, Pierre Beauvillain¹, Alexei Tcheltnokov², Jean-Michel Lourtioz¹, et Béatrice Dagens¹

(1) Institut d'Electronique Fondamentale, Bât. 220, Université Paris-Sud 11, 91405 Orsay, France

(2) CEA-LETI, MINATEC, DOPT 17 rue des martyrs 38054 Grenoble cedex 9, France

I - Introduction

La plasmonique, en plein essor depuis plusieurs années, s'est insérée dans de nombreux domaines d'application comme les antennes, les cellules photovoltaïques ou les biocapteurs. Les propriétés qui sont généralement mises en avant incluent d'une part, la possibilité de concentrer l'énergie électromagnétique aux petites échelles [1,2] et d'autre part, la forte sensibilité des résonances plasmoniques au milieu environnant. La plupart des études rapportées dans la littérature exploitent l'excitation de plasmons de surface localisés par une onde non guidée. Or, les structures plasmoniques peuvent aussi permettre de réduire la taille des dispositifs d'optique guidée à des dimensions sub-longueur d'onde. Elles constituent ainsi un moyen de relier le monde microscopique des guides d'onde optiques à celui des nano-dispositifs optiques ou électroniques. En pratique, les pertes induites par les résonances plasmoniques pouvant être rédhibitoires, il est souhaitable d'exciter les plasmons sur de courtes distances sans induire de réflexion parasite. L'originalité de notre approche est de coupler des guides d'onde SOI (Silicium-On-Insulator) à des chaînes de résonateurs à plasmons de surface localisés dont la résonance se produit dans la gamme spectrale de transmission des guides entre 1,2-1,6 μm . Les résonateurs sont des nanoparticules d'or déposées au sommet du guide SOI et la distance, qui les sépare, est suffisamment faible pour permettre une transmission par champ proche au sein de la chaîne.

Nous montrons ici qu'il est effectivement possible d'exciter les chaînes de nanoparticules d'or par le champ évanescent du mode TE d'un guide SOI, et que ces chaînes se comportent elles-mêmes comme de véritables guides d'onde. En dehors du domaine spectral de résonance, la transmission du guide SOI n'est que peu affectée par la présence des nanoparticules. Les résultats de modélisation théorique sont en très bon accord avec les résultats des mesures expérimentales. Dans ce qui suit, nous présentons d'abord la structure du dispositif et sa fabrication, puis le modèle et les résultats de simulation 3D, et enfin la comparaison théorie-expérience.

II - Structure étudiée

Les échantillons sont constitués de chaînes d'ellipsoïdes d'or déposées et centrées sur les faces supérieures des guides (figure 1). Les dimensions des axes, principal et secondaire, des ellipses sont environ de 220 et 75 nm respectivement, ce qui permet d'obtenir des résonances plasmoniques dans une gamme de longueur d'onde entre 1,2 et 1,6 μm . Le plasmon de surface localisé correspond au mode dipolaire transverse de la nanoparticule avec le champ électrique du dipôle parallèle au grand axe de l'ellipse. L'excitation des dipôles est réalisée par le champ évanescent du mode propagatif TE du guide SOI, et le transfert d'excitation dipolaire de particule à particule en champ proche est rendu possible par le faible espacement (~ 150 nm), centre à centre, des particules. Les guides SOI de type «ruban non enterré» sont réalisés dans la première étape de fabrication. Les nanoparticules sont ensuite définies sur le sommet des guides par lithographie électronique. Quatre marques

d'alignement permettent de les aligner le long des guides. Les nanoparticules sont réalisées dans la dernière étape par un procédé « lift-off », après avoir déposé une couche d'or de 30 nm par évaporation.

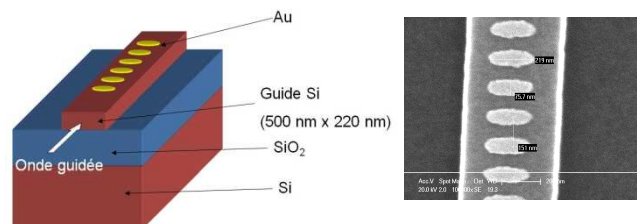


Figure 1 : schéma (gauche) et image de microscopie électronique (droite) du dispositif étudié

III - Conception et caractérisation de guides à plasmons de surface localisés sur SOI

La conception des guides à plasmons de surface localisés a été effectuée à l'aide de simulations numériques FDTD (Finite Difference Time Domain) en 3D. Les résonances plasmoniques étant extrêmement sensibles à leur environnement, les simulations doivent tenir compte au mieux des caractéristiques réelles des dispositifs. Ainsi, nous avons introduit dans le modèle FDTD la dispersion en longueur d'onde de la constante diélectrique de l'or déposé à la CTU-IEF-MINERVE, la constante étant mesurée par ellipsométrie. La courbe de dispersion obéit à un modèle de Drude ajusté aux données mesurées. De plus, nous avons tenu compte de la présence d'une couche d'oxyde natif sur la surface supérieure du guide SOI, couche mesurée au microscope électronique à balayage (MEB) et dont l'épaisseur est de 3 nm.

La simulation numérique consiste à injecter le mode guidé TE dans le guide SOI, et à calculer l'évolution de l'intensité de l'onde le long du dispositif en fonction de la longueur d'onde. A titre d'exemple, la figure 2(a) représente la cartographie de l'intensité du champ électrique pour une longueur d'onde de 1475 nm et une chaîne de 20 nanoparticules. La figure 2(b), donne respectivement l'évolution de l'intensité au centre du guide (courbe rouge) et celle au centre de la chaîne (courbe bleue). Comme l'on voit, l'onde se propageant dans le guide SOI est presque totalement transférée aux premières nanoparticules de la chaîne, puis recouplée au guide SOI après environ 1 μm de propagation. Le processus se répète ensuite de manière périodique. Ce comportement est caractéristique d'un système de guides couplés. La chaîne de nanoparticules se comporte comme un guide d'onde dont la constante de propagation est proche de celle du guide SOI, à la longueur d'onde considérée. L'énergie de l'onde est fortement atténuée à chaque oscillation dans la chaîne du fait des pertes ohmiques. La courbe rouge de la figure 2 (c) donne la transmission totale de la chaîne, calculée en fonction de la longueur d'onde. Le comportement oscillatoire, révélateur de guides couplés, est obtenu sur une large gamme spectrale autour du minimum de transmission (environ 100 nm). Le minimum de transmission à 1475 nm correspond à un couplage guide SOI - chaîne de nanoparticules, considéré comme optimal.

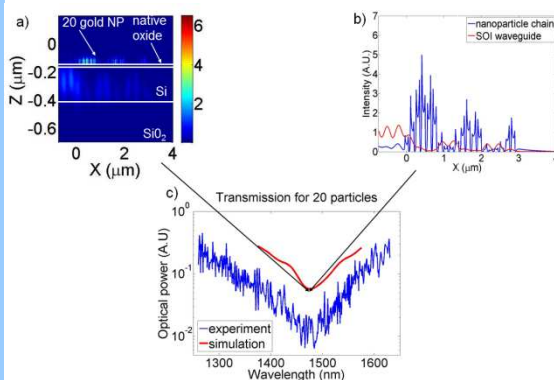


Figure 2. a) Cartographie de l'intensité du champ électrique calculée à $\lambda = 1475$ nm.
 b) Intensité du champ électrique calculée à $\lambda = 1475$ nm en fonction de distance de propagation dans le guide en SOI (courbe rouge) et dans la chaîne de particules (courbe bleue).
 c) Spectre de transmission mesuré (bleu) et simulé (rouge) pour une chaîne de 20 particules.

La courbe bleue de la figure 2 (c) représente la mesure expérimentale de transmission. L'accord théorie-expérience est remarquable aussi bien du point de vue de l'accord spectral que de l'allure des courbes d'évolution. Le même accord a été obtenu pour des chaînes de différentes longueurs, de 5 à 50 nanoparticules. Nous disposons donc d'un outil de simulation véritablement prédictif et adapté à la technologie développée, pour l'insertion de guides d'onde plasmoniques compacts sur SOI.

Les chaînes courtes (5 nanoparticules) se comportent de manière similaire aux chaînes longues dans le sens où l'on observe un transfert total de l'énergie du mode guidé vers la chaîne de nanoparticules. La longueur de

chaîne devient cependant insuffisante pour qu'il y ait re-couplage dans le guide SOI. On aboutit, de fait, à un dispositif fonctionnel très compact ($\sim 1 \mu\text{m}$) à plasmons de surface localisés.

IV - Conclusion

Nous avons démontré théoriquement et expérimentalement le couplage entre un guide SOI et une chaîne de nanoparticules métalliques dans la gamme de longueur d'onde de 1,2 à 1,6 μm . Dans le cas de chaînes longues, une oscillation périodique de l'onde de propagation entre les deux structures montre que la chaîne se comporte comme un véritable guide d'onde à plasmons de surface localisés. Une chaîne courte permet un transfert complet de l'énergie électromagnétique du guide SOI aux nanoparticules, ce qui laisse envisager des dispositifs d'optique intégrée très compacts.

Ce travail est soutenu par le projet ANR Blanc PLACIDO N°ANR-08-BLAN-0285-01 et par la Région Ile-de-France.

Références

- (1) J. R. Krenn, A. Dereux, J. C. Weeber, E. Bourillot, Y. Lacroute, J. P. Goudonnet, G. Schider, W. Gotschy, A. Leitner, F. R. Aussenegg, and C. Girard, "Squeezing the optical near-field zone by plasmon coupling of metallic nanoparticles", *Phys. Rev. Lett.*, 82, 2590 (1999).
- (2) M. L. Brongersma, J. W. Hartman, and H. A. Atwater, "Electromagnetic energy transfer and switching in nanoparticle chain arrays below the diffraction limit", *Phys. Rev. B*, 62, R16356 (2000).

Dates des prochains stages :

**Bases pour la conception et la mesure en hyperfréquences
du 16 au 18 janvier 2012**

**Conception et caractérisation des circuits hyperfréquences
du 19 au 20 janvier 2012**

**La micro-nano électronique : introduction aux procédés
technologiques
5 jeudis après-midis du 12 janvier 2012 au 9 février 2012**

Informations pratiques

La CTU IEF-MINERVE se situe dans le département de l'Essonne, à l'Université Paris-Sud, Bâtiment 220, 91405 ORSAY Cedex

Responsable de la CTU : **Daniel BOUCHIER**

Responsable de l'accueil : **Jean-René COUDEVILLE** (jean-rene.coudeville@ief.u-psud.fr)

Responsable de l'aCTU : **Benoit BELIER** (benoit.belier@ief.u-psud.fr)

Secrétariat : **Annie ROY** (annie.roy@ief.u-psud.fr)

Pour plus
d'informations
contactez :
Beatrice.dagens@ief.u-
psud.fr

Pour plus
d'informations
contactez :
annie.roy@ief.u-psud.fr