

la pointe. La mesure de cette déflexion injectée dans une boucle d'asservissement maintient la pointe en contact ou à une distance constante de quelques nanomètres de la surface de l'échantillon, en agissant sur l'élément piézo-électrique. Un balayage complet de l'échantillon sous la pointe donne, grâce à un ordinateur, une image topographique de la surface.

Dans le microscope optique en champ proche, un laser éclaire la région de l'échantillon où se trouve la pointe. Si des structures sub-longueurs d'onde sont présentes dans cette région, elles produisent des ondes évanescentes qui restent confinées dans la zone de champ proche. La sonde locale diffusante, de taille inférieure à la longueur d'onde du laser et située à l'extrémité de la pointe du microscope, convertit ces ondes évanescentes en ondes propagatives.

Ondes évanescentes et super-résolution

On distingue trois types de microscope optique en champ proche, selon la sonde diffusante qu'ils utilisent. Chacune correspond à un objet de taille très inférieure à la longueur d'onde d'éclairement ; il s'agit soit de la pointe même du microscope, jouant le rôle d'un diffuseur sphérique, soit d'une nano-ouverture à l'extrémité d'une fibre optique étirée en forme de pointe, soit d'un nano-objet fluorescent (une molécule, un nano-cristal, etc.) collé au bout d'une pointe. Le choix de l'une ou l'autre de ces approches dépend des conditions expérimentales, telles que la longueur d'onde du laser, les conditions d'éclairement, la façon dont on souhaite collecter la lumière, etc.

La lumière émise par la sonde locale diffusante au bout de la pointe du microscope se propage et est collectée à l'aide d'une lentille ou de l'objectif d'un microscope dans le cas des microscopes à pointe diffusante et à sonde fluorescente, ou à l'aide d'une fibre optique dans le cas du microscope à ouverture. Puis elle est focalisée sur un détecteur optique qui mesure son intensité.

L'élément important dans ces microscopes est que l'on connaît avec une précision nanométrique la position du nano-objet diffusant les ondes à la surface de l'échantillon. En outre, l'intensité de la lumière diffusée loin du nano-objet et dirigée vers le détecteur est proportionnelle à l'intensité de la lumière qu'il reçoit dans la zone de champ proche, à laquelle

contribuent les ondes évanescentes. Elle peut être mesurée selon la position de la sonde sur la surface de l'échantillon.

Ainsi, en mesurant cette intensité pendant le balayage de la pointe sur la surface de l'échantillon, on enregistre point par point une image optique super-résolue de la zone balayée, dont la résolution ne dépend que de la taille du nano-objet utilisé comme sonde locale d'intensité dans la zone de champ proche, et de la distance entre deux points de mesure. L'image optique super-résolue est enregistrée en même temps que l'image topographique. Ces deux images fournissent deux informations différentes qui peuvent être comparées ; la première est liée aux variations spatiales d'intensité optique à la surface de l'échantillon sur des échelles sub-longueur d'onde, la seconde au relief de l'échantillon.

À quoi sert la microscopie optique en champ proche ? Un domaine d'application important est l'étude des propriétés optiques de nanomatériaux à la surface d'un échantillon. Il est parfois nécessaire de connaître les propriétés optiques d'un matériau à une longueur d'onde λ , alors que l'étendue spatiale de ce matériau est inférieure à λ . Dans ce cas, l'utilisation d'un microscope conventionnel est proscrite, car sa résolution spatiale ($\lambda/2$) est insuffisante.

Le microscope optique en champ proche apporte une solution à ce problème. Le contraste optique dans une image super-résolue résulte du fait que l'intensité de la lumière qui arrive sur le détecteur dépend des propriétés optiques du matériau situé sous la sonde locale diffusante. Une partie des ondes arrivant sur le détecteur provient de l'image de la sonde diffusante, de sorte que l'intensité varie selon la nature du matériau situé sous la pointe pendant le balayage.

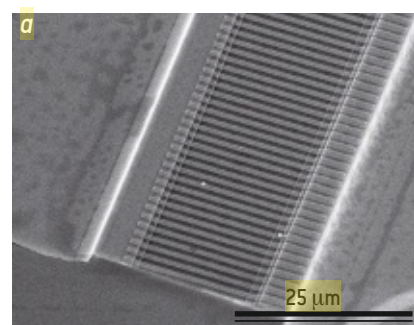
Par exemple, avec un microscope optique en champ proche à pointe diffusante fonctionnant dans l'infrarouge à une longueur d'onde de 10,6 micromètres, nous avons obtenu l'image optique d'un film métallique de chrome (réfléchissant dans l'infrarouge), percé de trous circulaires d'environ 200 nanomètres de diamètre laissant apparaître le substrat de verre (absorbant dans l'infrarouge, voir la figure 2). L'image montre que ce microscope est capable de distinguer les deux matériaux avec une résolution spatiale bien meilleure que celle imposée par la diffraction.

LES AUTEURS

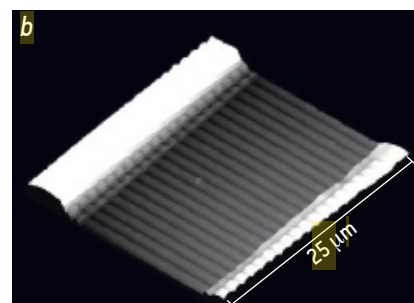


Rémi CARMINATI est professeur à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI ParisTech) où il dirige le Laboratoire d'optique physique. Il est le directeur adjoint de l'Institut Langevin.

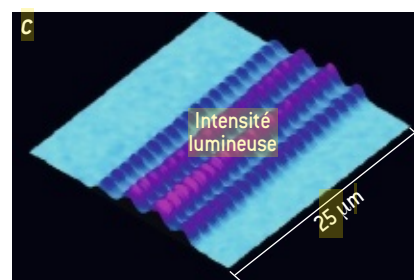
Yannick DE WILDE est directeur de recherche du CNRS à l'Institut Langevin.



R. Colombelli et A. Bousseksou, IEF



Y. De Wilde et A. Babuty



Y. De Wilde et A. Babuty

3. À LA SURFACE DU RÉSEAU MÉTALLIQUE de sa cavité [a, en microscopie électronique], un laser semi-conducteur produit des ondes évanescentes sous la forme de plasmons. Un microscope en champ proche enregistre simultanément une image topographique [b] et une image optique super-résolue [c] de la surface du dispositif pendant qu'il émet un rayonnement laser. L'image topographique révèle la structure du réseau métallique, tandis que l'image optique montre la répartition spatiale des ondes évanescentes sur le dispositif.

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Babuty *et al.*, **Semiconductor surface plasmon sources**, *Physical Review Letters*, vol. 104, article 226806, 2010.

R. Heintzmann et M. G. Gustafsson, **Subdiffraction resolution in continuous samples**, *Nature Photonics*, vol. 3, p. 362, 2009.

E. Betzig *et al.*, **Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution**, *Science*, vol. 313, p. 1642, 2006.

L. Aigouy, Y. De Wilde et C. Fréty, **Les nouvelles microscopies : à la découverte du nanomonde**, Belin, 2006.

C. Boccara et R. Carminati, **Champ proche optique : de l'expérience à la théorie**, *Les nanosciences : nanotechnologies et nanophysique*, Belin, 2004.

J. J. Greffet et R. Carminati, **Image formation in near-field optics**, *Progress in Surface Science*, vol. 56, p. 133, 1997.

Un autre domaine d'application de la microscopie en champ proche est la réalisation d'images d'ondes évanescentes à la surface de guides d'ondes. Quand des ondes se propagent dans un prisme transparent (dont l'indice optique est supérieur à un) et subissent une réflexion totale à la surface interne de ce prisme, elles produisent des ondes réfléchies propagatives qui poursuivent leur route dans le prisme. La réflexion engendre aussi des ondes dans l'air sur la surface externe du prisme, mais ces ondes ne se voient pas : elles sont évanescentes, c'est-à-dire qu'elles déclinent rapidement à la surface du prisme sans qu'aucune composante propagative qui permettrait de les observer en se plaçant loin de la surface du prisme n'y soit associée.

Un phénomène analogue a lieu quand des ondes se propagent dans un guide d'onde diélectrique (d'indice optique supérieur à un). Les ondes propagatives confinées dans le guide se prolongent dans l'air à la surface du guide sur une distance de l'ordre d'une fraction de la longueur d'onde, sous la forme d'ondes évanescentes. Des ondes peuvent également se propager sur des surfaces métalliques et présentent dans ce cas un caractère éva-

nescent à la fois dans l'air et dans le métal. On les nomme des plasmons (polaritons) de surface. Ces ondes qui restent naturellement confinées à la surface lorsqu'elles se propagent sur une piste métallique suscitent aujourd'hui beaucoup d'intérêt, car elles devraient permettre la réalisation de nouveaux types de dispositifs d'optique intégrée. Le microscope optique en champ proche est capable de caractériser la propagation des ondes évanescentes à la surface de ces structures guidantes.

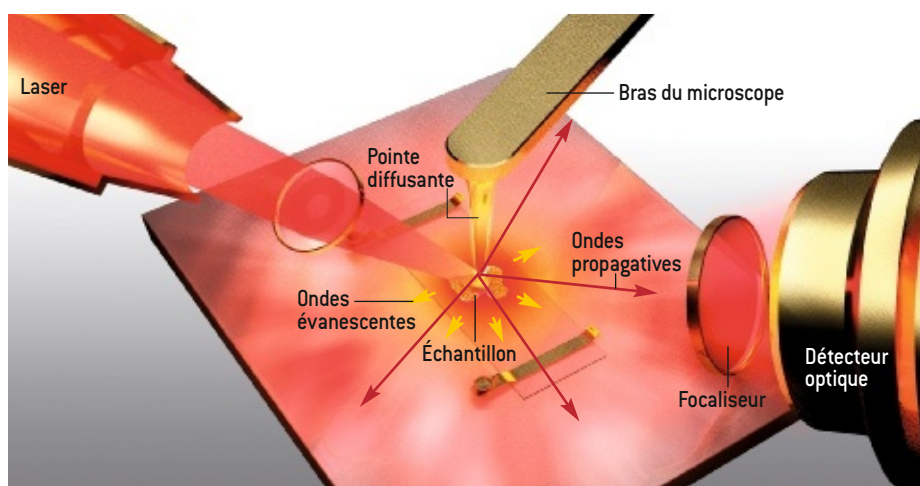
Qui plus est, le microscope optique en champ proche présente un intérêt dans des domaines situés à l'interface de la recherche fondamentale et appliquée. En 2010, nous avons observé des dispositifs laser semi-conducteurs (conçus par l'équipe de Raffaele Colombelli à l'Institut d'électronique fondamentale du CNRS et de l'Université Paris Sud), avec un microscope en champ proche fonctionnant dans l'infrarouge. Ces dispositifs produisent des plasmons à la surface du réseau métallique situé sur la cavité du laser, l'émission du laser vers l'extérieur se faisant par les deux extrémités de la cavité.

Le microscope en champ proche donne une image super-résolue des plasmons de

LE MICROSCOPE OPTIQUE EN CHAMP PROCHE

Ce microscope détecte des ondes dites évanescentes, uniquement présentes à des distances de l'échantillon très inférieures à la longueur d'onde d'observation. La sonde utilisée se termine par une pointe de taille nanométrique qui réalise une cartographie du champ proche. Des translations piézo-électriques contrôlées par ordinateur déplacent la pointe avec précision. Un faisceau laser de longueur d'onde λ est focalisé sur la zone de l'échantillon où se trouve l'extrémité de la pointe, ce qui produit des ondes évanescentes près de tout objet de taille inférieure à λ se trouvant dans la zone éclairée. On balaye l'échantillon latéralement sous la pointe maintenue à une distance nanométrique de la surface grâce au dispositif d'asservissement qui agit sur sa position verticale.

L'enregistrement de la position verticale de la pointe en chaque point de la zone balayée donne une image topographique, qui rensei-



gne sur le relief de l'échantillon. Par ailleurs, les ondes évanescentes présentes à la surface de l'échantillon sont diffusées à l'extrémité de la pointe pendant le balayage. Comme elles subissent des diffusions, elles deviennent des ondes propagatives classiques, lesquelles sont collectées et focalisées sur un détecteur optique. L'enregistrement de l'inten-

sité du signal selon la position de la pointe à la surface de l'échantillon pendant le balayage fournit une image optique de l'échantillon. La résolution spatiale dépend uniquement de la taille de l'extrémité diffusante de la sonde, soit quelques nanomètres.

Différentes sondes en forme de pointe sont utilisées pour diffuser

les ondes évanescentes dans la zone de champ proche. Le choix de la sonde dépend des conditions expérimentales, telles que la longueur d'onde d'éclairage, la façon dont la lumière est collectée, etc.

Ainsi, ce microscope fournit une image topographique et une image optique de l'échantillon avec une résolution de quelques nanomètres.

Didier Florentz