

réflectivité de ses miroirs, l'émission spontanée du matériau émetteur placé en son sein sera même considérablement renforcée par rapport à ce qu'elle serait dans l'espace libre : on dit que la luminescence est exaltée. On parle aussi de laser sans seuil, car les photons s'accumulent dans la cavité, et on aboutit rapidement à un effet d'avalanche, c'est-à-dire à une amplification de l'émission stimulée. Le matériau émetteur, quant à lui, peut être le même que celui qui constitue le cristal photonique (un semi-conducteur, par exemple). Ce peut être aussi un matériau différent, que l'on introduit dans la cavité pour ses propriétés émissives.

Pour illustrer l'effet de sélectivité en longueur d'onde de la microcavité, considérons un cristal photonique bidimensionnel de tiges diélectriques au sein duquel on a créé un défaut en ôtant l'une des tiges diélectriques (voir la figure 9). Comparons la transmission de ce cristal à celui du cristal périodique. La transmission est analogue dans les deux cas, avec une bande interdite de transmission comprise entre 0,9 et 1,3 micromètre, dans l'infrarouge proche. Toutefois, dans le cas du cristal avec lacune, un pic de transmission très étroit apparaît pour une longueur d'onde voisine de 1,1 micromètre. Ce pic, où la transmission est voisine de l'unité, résulte de la présence

de la cavité au sein du cristal. À ce phénomène de résonance de cavité, bien connu en électromagnétisme, sont le plus souvent associées de nombreuses fréquences (ou de longueurs d'onde). Ici, la fréquence de résonance est unique et reste inchangée lorsque l'incidence de la lumière sur le cristal varie. De surcroît, le pic est très étroit, ce qui résulte de la bonne réflectivité de la cavité.

Dans cet exemple, la lumière provient de l'extérieur de la cavité, et non de l'intérieur. Suivons son trajet à travers la structure. À la longueur d'onde de résonance, la lumière pénètre dans le cristal, s'accumule quelques instants dans la cavité et finit par ressortir du cristal avec un flux égal au flux entrant. Ainsi, à cette longueur d'onde, la lumière est « aspirée » par la cavité, au sein de laquelle une forte énergie lumineuse reste stockée. La cavité agit donc comme un « relais » pour la lumière incidente, qui traverse alors facilement le cristal. C'est aussi un filtre, puisque le cristal qui l'entoure reste opaque à toutes les autres longueurs d'onde.

Une autre propriété serait utile pour les communications : la directivité de l'émission. Or, une cavité dont la symétrie est hexagonale ne peut émettre de manière directionnelle, car les photons ont une probabilité équivalente d'être émis suivant les six directions. De la même façon, dans une cavité sphérique, il n'y aurait pas de direc-

tion privilégiée. Pour pallier cet inconvénient, on crée un défaut asymétrique dans le cristal photonique.

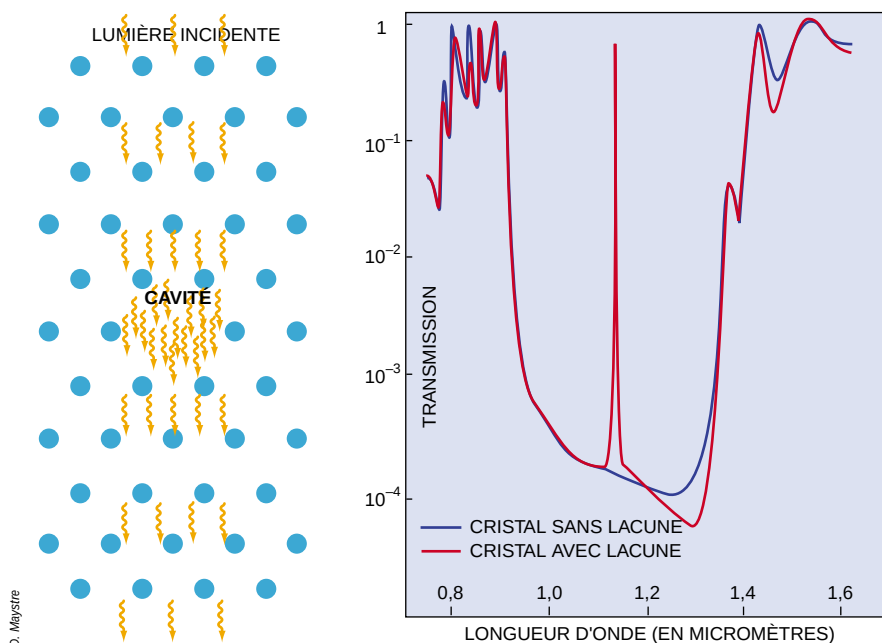
Alex Scherer et ses collègues, à l'Institut de technologie de Californie, ont fabriqué un cristal photonique bidimensionnel formé d'un réseau hexagonal de trous percés dans une membrane d'un semi-conducteur composite, qui a la propriété d'émettre vers 1,5 micromètre. Tous les trous sont identiques, sauf deux, de rayons supérieurs, qui délimitent la microcavité (voir la figure 10). Ayant rompu la symétrie, l'émission peut se faire de manière privilégiée dans la direction où la cavité est la plus allongée. Lors de cette expérience, les physiciens ont obtenu la première émission laser à partir d'une microcavité insérée dans un cristal photonique. C'est l'un des plus petits lasers jamais construits avec un volume de moins d'un dixième de micromètre cube. Des expériences similaires sont menées par l'équipe de Pierre Viktorovitch, à l'École centrale de Lyon.

Prévoir pour construire

Avant de fabriquer cristaux et cavités, les physiciens évaluent le comportement des structures et optimisent leurs performances. Ces études ont beaucoup profité des travaux de la physique du solide, qui permettent de prévoir les propriétés des électrons dans un matériau solide, notamment pour prédire l'ensemble des bandes permises ou interdites. Cependant, à la différence des cristaux atomiques qui possèdent un très grand nombre de périodes, les cristaux photoniques réels sont le plus souvent limités à une dizaine de périodes.

De ce fait, des effets de bords empêchent l'application rigoureuse des traitements issus de la physique du solide pour l'analyse du comportement des cristaux photoniques. La description détaillée de la propagation d'une onde lumineuse dans un cristal limité dans l'espace est alors nécessaire. Ces modélisations consistent donc à résoudre les équations de Maxwell, qui décrivent le comportement des ondes électromagnétiques, dans des géométries complexes. Seules les modélisations informatiques permettent ce travail.

Dans des cas très complexes, notamment lorsque l'on associe des cristaux photoniques avec d'autres éléments optiques, tels des émetteurs, les moyens de calcul mis en œuvre



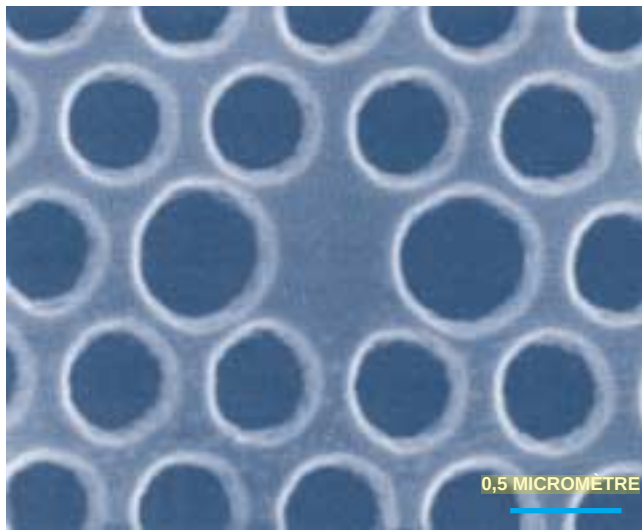
9. LA RUPTURE DE LA PÉRIODICITÉ dans un cristal crée une cavité constituée par la suppression d'une barre diélectrique dans un cristal bidimensionnel à symétrie hexagonale. Cette cavité sélectionne la lumière d'une longueur d'onde précise qui est transmise presque sans pertes après quelques instants d'accumulation dans la cavité, comme l'atteste le pic de transmission (à droite).

ne permettent encore qu'une modélisation partielle.

Le domaine des cristaux photoniques est en plein essor, et les physiciens rivalisent d'imagination dans la conception de nouvelles structures et de nouvelles applications. Toutefois, il convient d'être prudent : les recherches dans un domaine en pleine exploration débouchent parfois dans des directions inattendues. Nous avons souligné qu'une motivation importante de ces recherches concernait les sources optiques à l'état solide. À ce titre, la mise au point d'un microlaser à cristal photonique est encourageante, mais le chemin est encore long avant que ce type de source puisse être utilisé dans un système optoélectronique plus élaboré.

Les physiciens rêvent également de pouvoir faire émettre ces sources, photon par photon, en plaçant au centre de la cavité un minuscule émetteur de lumière en matériau semi-conducteur, nommé boîte quantique. Le contrôle du flux de lumière, photon par photon, ouvrirait des perspectives sans précédent dans le domaine de la cryptographie quantique et des communications optiques. Dans cette veine, l'application la plus concrète, avant même l'émission de lumière, est le filtrage en longueur d'onde à l'entrée et à la sortie des fibres optiques. Nous avons vu que les cristaux photoniques creusés de cavités permettraient, grâce à leur sélectivité, de filtrer la lumière en transmission ou en réflexion. On pourrait alors réduire d'un facteur 100 l'encombrement des composants utilisés pour le filtrage des longueurs d'onde.

À plus court terme, les études des cristaux photoniques débouchent peut-être sur des applications dans le domaine des micro-ondes, domaine où le premier cristal photonique a été mis au point. Comme les échelles de longueur en jeu sont plus grandes (du millimètre à quelques centimètres), la fabrication de structures à ces échelles est facilitée. Or, ces longueurs d'onde sont aussi celles des télécommunications, civiles ou militaires, les signaux se propageant le plus souvent dans l'air et non plus dans des fibres. Pour les téléphones portables notamment, les réflecteurs



10. UN RÉSEAU HEXAGONAL DE TROUS percés dans une membrane d'un semi-conducteur composite, qui a la propriété d'émettre vers 1,5 micromètre, est le premier laser obtenu à partir d'une microcavité insérée dans un cristal photonique. La microcavité est bordée des deux trous d'un diamètre supérieur à ceux du reste du réseau.

à cristaux photoniques ont certainement leur rôle à jouer. Des ingénieurs pensent les utiliser pour éliminer, par réflexion, le rayonnement de l'antenne des téléphones portables qui n'est pas directement utilisé pour la communication, ce qui réduirait des risques potentiels pour l'utilisateur.

Le champ d'application qui s'ouvre aujourd'hui aux cristaux photoniques est vaste. À cet égard, il est étonnant de pouvoir réunir autour d'un thème unique les études sur les antennes et les recherches sur les sources optiques ultimes. D'une certaine façon, cette vision tridimensionnelle de l'optique ressemble aux architectures à trois dimensions qui apparaissent dans les mémoires de nos ordinateurs sous la forme d'empilements de circuits micro-électroniques séparés par des plans métalliques. Au-delà du matériau à bande interdite photonique et des dispositifs élémentaires qu'il permet de réaliser, les physiciens envisagent de véritables circuits optiques ou optoélectroniques à deux ou à trois dimensions. Des microcanaux de lumière, plus communément nommés guides d'onde électromagnétique, y remplaceraient les conducteurs métalliques : les parois du guide seraient formées de cristaux photoniques réflecteurs à tous les angles d'incidence. Cette conception pose bien évidemment de redoutables problèmes de modélisation et de fabrication, et beaucoup d'efforts seront nécessaires avant d'aboutir à une application pratique.

L'engouement pour les cristaux photoniques tient aussi à l'analogie fascinante entre la propagation de la lumière et celle des ondes électroniques dans un cristal solide. En science, l'analogie est courante, car elle stimule l'imagination et entraîne souvent une vision nouvelle des objets étudiés. Des travaux récents explorent plus avant cette analogie, en évoquant notamment les concepts de cristal photonique non linéaire en optique et de cristal sonique en acoustique.

Dans le premier cas, on imagine des alternances périodiques de matériaux dont les propriétés optiques sont altérées par un flux lumineux intense. La structure apparente du matériau se modifiera en conséquence avec l'intensité de l'éclairement, et ce qui était une bande de transmission pourra, par exemple, devenir une bande interdite photonique. Autrement dit, on disposera d'un système susceptible de nous protéger contre les flux lumineux intenses, tels ceux des lasers de puissance, à des longueurs d'onde données. Dans le cas du cristal sonique, on sait que le son est une onde de vibration des milieux matériels dont les équations de propagation sont très proches des équations de propagation de la lumière. Il n'y a qu'un pas à franchir pour élaborer des matériaux ou des objets qui empêchent la propagation des sons dans des plages de fréquence et des directions de l'espace choisies à l'avance (bandes interdites soniques). De la lumière au son, le pas est presque franchi.

Jean-Michel LOURTIOZ est chercheur à l'Institut d'électronique fondamentale de l'Université d'Orsay. Daniel MAYSTRE est chercheur au Laboratoire d'optique électromagnétique de la Faculté des sciences et techniques de Saint-Jérôme, à Marseille.

J.D. JOANNOPOULOS, R.D. MEADE et J.N. WINN, *Photonic crystals*, Princeton University Press, 1995.

J. RARITY et C. WEISBUCH, *Microcavities and Photonic Bandgaps : Physics and Applications*, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, 1996.