

horizontal et le cristal bidimensionnel va permettre de contrôler la lumière dans les autres directions du plan.

La preuve expérimentale

Dans les années 1990, Eli Yablonovitch eut l'idée d'imiter la structure des cristaux solides existants, plus particulièrement celle des cristaux semi-conducteurs, tels le silicium ou le germanium. Comme ces semi-conducteurs ont de larges bandes d'énergie interdites pour les électrons, on peut imaginer qu'il en serait de même pour les photons. La structure cristalline correspondante, qui est aussi celle du diamant, résulte de l'emboîtement de deux structures cubiques à faces centrées (la maille cristalline est un cube, et les atomes sont au sommet et au centre des faces du cube), l'une étant décalée de l'autre par un quart de la grande diagonale du cube. Comment fabriquer une telle structure ?

Les symétries de ces structures, d'une importance capitale pour la physique des semi-conducteurs, ont été étudiées et recensées en détail depuis des dizaines d'années. En particulier, les physiciens du solide savent que, dans certaines directions, il y a des galeries vides d'atomes, de véritables canaux au sein de l'édifice atomique. Autrement dit, dans ces directions, on peut traverser le cristal sans ren-

contrer d'atomes : si le cristal était plus gros, on pourrait voir à travers ! On peut concevoir un cristal de silicium comme un bloc percé de galeries judicieusement orientées.

Partant d'un bloc de plexiglas d'indice optique élevé, E. Yablonovitch et son équipe ont percé selon trois directions à 120 degrés, simulant les galeries du cristal de silicium (voir la figure 6). Par des mesures de transmission, ils ont observé que cette structure était parfaitement opaque, quelle que soit la direction d'incidence de la lumière. C'était un cristal photonique parfait. Cette expérience fut capitale pour son aspect démonstratif, mais elle concernait des longueurs d'onde de quelques centimètres, plusieurs ordres de grandeurs supérieures aux longueurs d'onde micrométriques utilisées pour les télécommunications optiques. Durant les dix années suivantes, les physiciens se sont évertués à réduire la taille de ces motifs tridimensionnels, imaginant des moyens de structurer la matière à petite échelle.

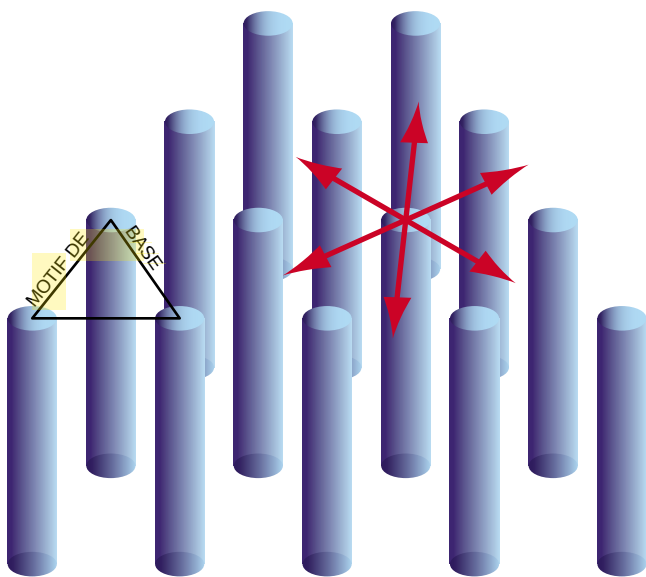
Vers les nanostructures

Au début des années 1990, la fabrication de miroirs de Bragg constitués de multicouches de semi-conducteurs avec des épaisseurs de l'ordre du dixième de micromètre venait juste d'être maîtrisée grâce aux techniques de dépôt de

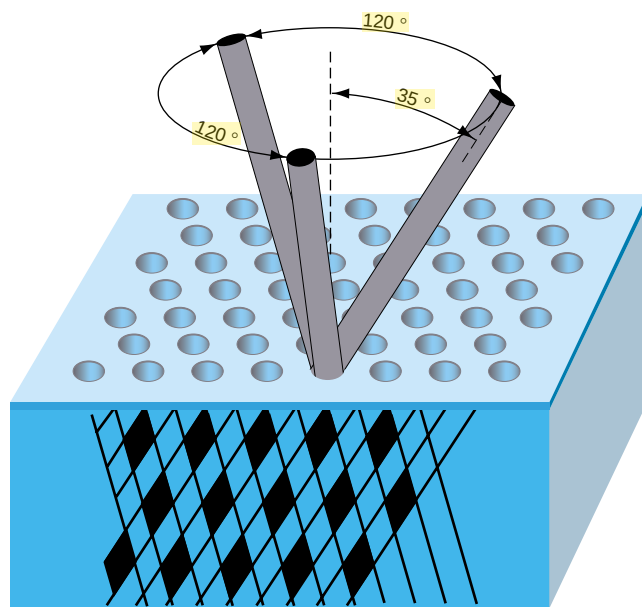
diélectrique sous vide, tandis que les premiers composants optoélectroniques utilisant des microcavités étaient expérimentés. Rares étaient ceux qui imaginaient alors qu'en moins de dix ans les physiciens fabriqueraient les premiers cristaux photoniques en deux et en trois dimensions dans le domaine infrarouge et visible : ils ne prévoyaient pas les progrès en miniaturisation qui ont accompagné les progrès de la microélectronique durant cette fin de siècle.

Les circuits de nos ordinateurs comportent des millions de transistors dont les tailles sont de l'ordre de quelques micromètres. Les multiples techniques de fabrication de ces circuits ont aiguillonné la fabrication de cristaux photoniques. Nous présenterons deux exemples de structures récemment obtenues, qui ont l'avantage de posséder des bandes interdites photoniques aux longueurs d'onde des télécommunications optiques (vers 1,5 micromètre).

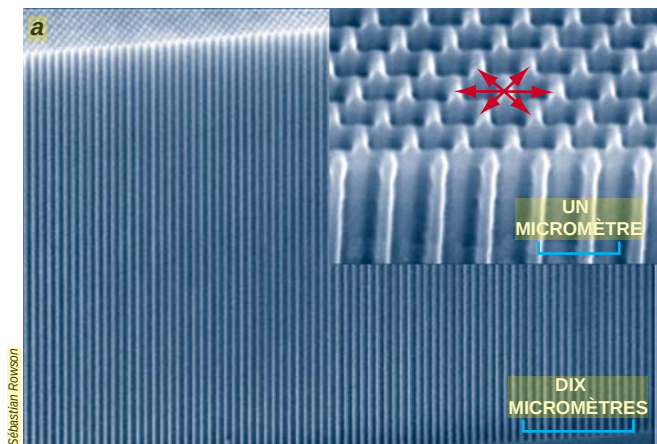
En 1999, Sebastian Rowson, Alexis Chelnokov et l'un de nous (J.-M. Lourtioz) ont fabriqué un cristal bidimensionnel obtenu par gravure photoélectrochimique d'un substrat de silicium (voir la figure 7a). On utilise d'abord un masque de silice percé de trous qui reproduit le motif hexagonal quel'on veut obtenir. Le masque est déposé sur le substrat de silicium, qui est alors soumis à une



5. UN CRISTAL PHOTONIQUE BIDIMENSIONNEL est constitué d'un assemblage de tiges diélectriques cylindriques séparées par de l'air. Le motif périodique est un triangle équilatéral, et la structure possède une symétrie hexagonale : la lumière se propage de manière identique dans les six directions (flèches rouges). Grâce à cette symétrie, si la transmission de la lumière est interdite suivant une direction, elle le sera pour les cinq autres.



6. LE PREMIER CRISTAL PHOTONIQUE TRIDIMENSIONNEL a été construit en 1991 par percement d'un bloc de plexiglas selon trois directions à 120 degrés. En creusant ces trous, on laisse dans le bloc des zones qui reproduisent à grande échelle la structure cristalline du silicium. C'est un cristal photonique idéal, parfaitement opaque quelles que soient la direction d'incidence de la lumière et sa polarisation.



7. DEUX CRISTAUX PHOTONIQUES fabriqués en 1999. Un cristal bidimensionnel (a) est façonné selon une symétrie hexagonale (flèches rouges). Une autre structure, tridimensionnelle, est un

empilement de tiges horizontales de section carrées, placées sur un substrat de silicium (b). En raison de leurs symétries, ces cristaux réfléchissent parfaitement la lumière.

attaque chimique, ce qui crée une ébauche du motif cristallin.

Ensuite, le substrat est utilisé comme anode dans un bain électrochimique : les trous amorcés se creusent selon une direction privilégiée du cristal de silicium. En moins de deux heures de ce régime, on obtient des trous de 100 micromètres de profondeur. La structure obtenue ressemble à celle d'une brique poreuse, les trous verticaux jouant le rôle des tiges cylindriques du cristal bidimensionnel décrit précédemment. En réduisant la distance entre les trous (la période du cristal) à 0,680 micromètre, la propagation était interdite à la longueur d'onde des télécommunications optiques (1,5 micromètre), quelles que soient la direction (indiquée par les flèches, sur la figure 7a) et la polarisation.

La même année, une autre structure a été fabriquée aux Laboratoires Sandia, à Albuquerque, par Shawn-Yu Lin et ses collègues. C'est un cristal tridimensionnel fabriqué couche par couche, par combinaison des techniques de dépôt sur silicium et des techniques de gravure. Chaque couche gravée est un réseau de tiges horizontales de section carrée (voir la figure 7b). Les tiges des couches adjacentes sont perpendiculaires et les tiges à une couche d'intervalle sont parallèles entre elles, mais décalées latéralement, de sorte que le motif se répète à l'identique toutes les quatre couches. L'empilement obtenu reproduit la structure d'un cristal atomique : les intersections des

tiges de l'empilement sont disposées selon deux réseaux cubiques à faces centrées, comme le sont les atomes d'un cristal de silicium. Une bande interdite a été obtenue pour une longueur d'onde voisine de dix micromètres, puis, après une diminution de la période du cristal, pour une longueur d'onde de 1,5 micromètre.

Ces exemples ne doivent pas nous laisser croire que les problèmes de fabrication de tels cristaux sont résolus. L'obtention d'un cristal tridimensionnel requiert un nombre considérable d'étapes, et la superposition ne serait-ce que d'une période (quatre couches) relève encore de l'exploit technique. L'observation de la nature nous invite à un peu de modestie, car l'homme ne fait que réinventer ce qui existe déjà : la similitude entre du silicium poreux et une aile d'oiseau est à ce titre frappante (voir la figure 8). Les ailes de certains papillons ou les opales sont également des cristaux photoniques naturels.



8. L'OBSERVATION MICROSCOPIQUE d'une aile d'oiseau (un ministre mâle) révèle des microstructures qui se comportent comme un cristal photonique dont la bande interdite est située dans le bleu : la lumière bleue est totalement réfléchie, de sorte que l'aile apparaît bleue, bien qu'elle soit totalement dépourvue de pigments colorés.

La cage aux photons

Le contrôle de l'émission spontanée de lumière par les atomes du milieu solide est l'une des principales motivations des travaux sur les cristaux photoniques. Or, jusqu'ici, nous avons uniquement décrit les cristaux photoniques comme des réflecteurs omnidirectionnels. Autrement dit, nous avons décrit les barreaux de la cage de lumière. Si l'on désire placer un émetteur dans le cristal et piéger des photons, il faudra creuser une microcavité au sein du cristal photonique. Cette cavité s'obtient simplement en rompant la périodicité du cristal, en y créant un défaut, pour reprendre la terminologie de la physique du solide. La lumière qui se trouverait dans ce défaut ne pourrait donc pas en sortir, entourée de toutes parts de parois parfaitement réfléchissantes. Toute émission de lumière serait inhibée.

Toute? En réalité, et fort heureusement, le piège ne sera pas total, car il permettra d'extraire de la lumière dont la longueur d'onde correspond à la taille de la cavité. Même avec une paroi très réfléchissante (99,999 pour cent de réflexion, par exemple), la transmission résiduelle suffira à extraire tous les photons qui ont la longueur d'onde adéquate, à condition que les pertes d'absorption des matériaux soient réellement négligeables : le moindre photon ne pouvant être absorbé finira par sortir.

Grâce à la faible taille de la cavité et à la forte