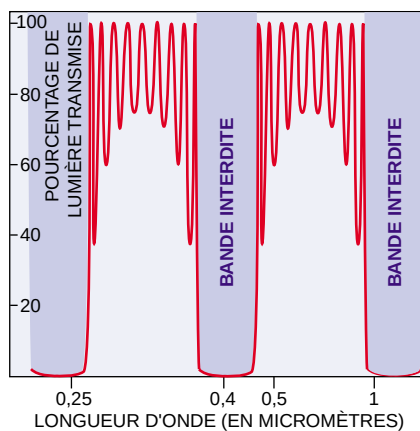


si l'épaisseur de lame est un multiple impair du quart de la longueur d'onde, il y aura accord de phase entre l'onde retour et la première onde réfléchie. L'interférence sera donc constructive et la réflexion de la lame sera maximale (voir la figure 3).

Ainsi, avec une seule lame diélectrique d'indice optique égal à trois, et aux longueurs d'onde où l'interférence est constructive, on obtient une réflexion de 60 pour cent de la lumière incidente, soit une transmission de 40 pour cent. Cette valeur est supérieure à celle de la réflexion par une seule interface air-diélectrique (environ 25 pour cent), mais elle ne permet pas de classer la lame comme un bon réflecteur. Comment augmenter encore la réflexion et réduire la transmission ? En empilant des couches minces à des distances régulières.

En première analyse, la transmission de deux couches sera égale au carré de la transmission d'une couche unique, puisque l'onde qui arrive sur la première couche subit deux transmissions successives avant de sortir de la seconde couche. La transmission avec deux couches devrait être égale à 16 pour cent ($0,4 \times 0,4$), à 6,4 pour cent avec trois couches et, finalement, à un pour cent avec cinq couches superposées.

En fait, cette analyse néglige les réflexions dans l'air qui sépare les couches. Ces réflexions sont profitables : il se crée dans les couches d'air un système de réflexions multiples, semblable à celui qui existe dans les couches de diélectrique. Lorsque l'épaisseur des couches d'air est aussi un multiple impair du quart de la longueur d'onde, les maximums de réflexion de ces couches coïncident avec ceux des couches diélectriques. Or, pour une lumière incidente donnée, la longueur d'onde dans l'air sera trois fois supérieure à celle dans le diélectrique (si l'indice optique est égal à trois). L'épaisseur des couches d'air devra, pour un effet optimal, être trois fois celle des couches diélectriques. Avec un empilement de cinq couches diélectriques séparées par quatre couches d'air d'épaisseur adéquate, on obtient un véritable dispositif réflecteur, puisque le coefficient de réflexion maximal atteint 99,99 pour cent dans une gamme de longueur d'onde où les interférences sont constructives en réflexion, ce qui correspond à des bandes interdites.



4. UN EMPILEMENT de cinq couches minces, d'indice $n = 3$ et d'épaisseur égale à un micromètre, séparées par de l'air, est un excellent réflecteur, puisque la transmission minimale est inférieure à 1 pour 10 000. La totalité de ce qui est perdu en transmission est réfléchi, de sorte que l'on obtient 99,99 pour cent de réflexion dans les bandes interdites.

Un tel empilement de couches diélectriques est nommé miroir de Bragg, en référence aux premières expériences sur la diffraction de rayons X menées au début du XX^e siècle. Les miroirs de Bragg sont vraiment efficaces lorsque l'éclairage est perpendiculaire aux couches, mais, pour une incidence oblique, les bandes interdites (en transmission) deviennent plus étroites et se décalent en longueur d'onde.

Les dimensions supérieures

En deux dimensions, on obtient une structure périodique aux propriétés équivalentes à celles des superpositions de couches en répartissant des tiges sur un plan selon un motif triangulaire. Comme dans le miroir de Bragg, cette structure est un assemblage périodique de deux diélectriques d'indices optiques différents : le matériau d'indice le plus faible est l'air et celui d'indice le plus élevé est un diélectrique agencé en cylindres parallèles de longueur supposée infinie. Cette structure a une symétrie hexagonale (voir la figure 5).

On peut aussi concevoir cette structure comme un empilement de grilles ou de rangées de tiges diélectriques, séparées par des couches d'air. On a ainsi «troué» les lames diélectriques de l'empilement de Bragg. L'analogie va plus loin : lorsque l'empilement de grilles est éclairé perpendiculairement par une onde lumineuse, les conditions de réflexion maximales sont obtenues lorsque les épaisseurs des grilles

et des couches d'air sont voisines du quart de la longueur d'onde.

En raison de la symétrie hexagonale de cette structure, la lumière se propage de manière identique dans les six directions hexagonales. Ainsi, lorsque la transmission est empêchée dans l'une des six directions, elle l'est suivant les autres. Le cristal bidimensionnel n'est pas encore une structure qui réfléchit la lumière dans toutes les directions, mais il s'en rapproche. Quelques remarques tempèrent pourtant cet optimisme. D'abord, les six directions équivalentes sont dans le plan orthogonal aux tiges : suivant les directions de propagation extérieures à ce plan, le cristal bidimensionnel ne présentera pas le même intérêt. Ensuite, la transmission dépend aussi ici d'une caractéristique de la lumière que nous n'avons pas encore mentionnée, la polarisation.

Comme l'onde à la surface de l'eau qui s'accompagne de déplacements verticaux du niveau de l'eau, l'onde de lumière est une onde transversale : les oscillations du champ électrique et celles du champ magnétique sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. Dans ce plan perpendiculaire, toutes les directions d'oscillation sont autorisées, mais, comme les oscillations des deux champs sont liées, l'oscillation d'un champ définit l'oscillation de l'autre. La direction d'oscillation du champ électrique est nommée direction de polarisation. Si cette direction est fixée, l'onde est polarisée de manière rectiligne. Deux ondes qui se propagent dans la même direction et à la même fréquence peuvent différer par la polarisation, et une bande de transmission interdite d'un cristal photonique pour une polarisation donnée ne sera pas forcément une bande interdite pour une autre polarisation. Dès que l'incidence est oblique, ou dès que le cristal est bidimensionnel, la polarisation joue un rôle, apportant une contrainte supplémentaire.

Au final, le cristal photonique bidimensionnel n'est pas encore le réflecteur parfait, efficace dans toutes les directions de propagation et quelle que soit la polarisation, mais c'est une étape importante pour toutes les applications à l'optique guidée (voir la figure 2). Dans ce domaine, qui est celui des diodes lasers et des autres composants utilisés aux extrémités des fibres optiques, la lumière est déjà guidée suivant un plan

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.

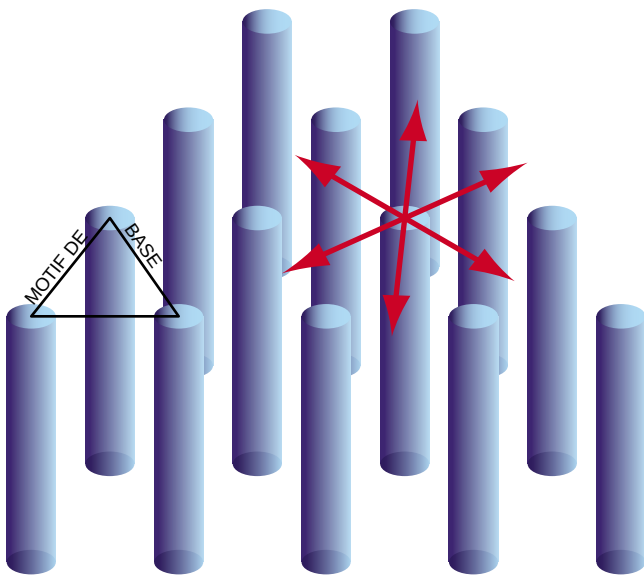
Vers les nanostructures

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

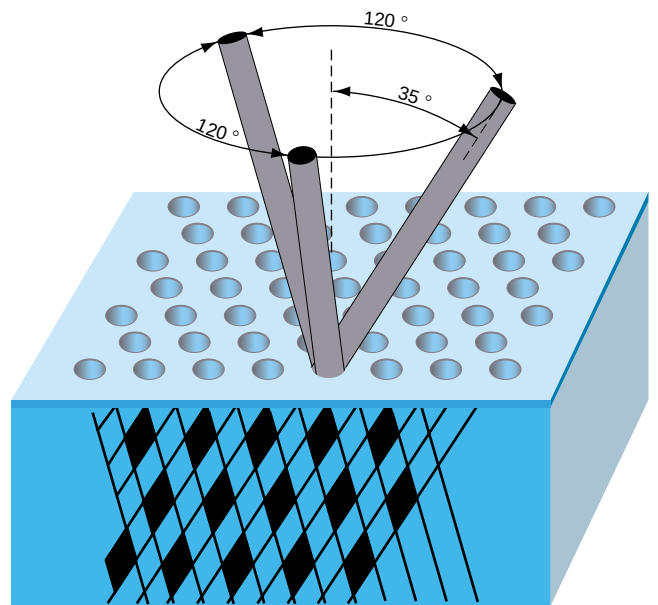
diélectrique sous vide, tandis que les premiers composants optoélectroniques utilisant des microcavités étaient expérimentés. Rares étaient ceux qui imaginaient alors qu'en moins de dix ans les physiciens fabriqueraient les premiers cristaux photoniques en deux et en trois dimensions dans le domaine 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.