



XAVIER CHECOURY, ZHENG HAN, DELPHINE NÉEL, SYLVAIN DAVID,
MOUSTAFA EL KURDI, PHILIPPE BOUCAUD

Institut d'Electronique Fondamentale (IEF) (UMR 8622, UPS/CNRS)
UFR Sciences

Piège de cristal



© CNRS PHOTO THÉRIE/CNET/LACTAMME/COLONNA JEAN-FRANÇOIS

De l'électron au photon ! Au même titre que le microprocesseur a révolutionné l'électronique à partir des années 70, le traitement d'information fondé sur l'optique intégrée sur puce est sur le point de devenir le fondement d'une prochaine vague d'innovations.

Photo : Trajectoire des photons s'échappant du Soleil

Pouvoir « contrôler » la lumière comme 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.

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. Pour exploiter ce phénomène, il s'agit de trouver un cristal photonique possédant des bandes interdites de propagation intéressantes appelées « gaps », autrement dit un matériau qui interdit à la lumière de se propager dans certaines gammes de longueurs d'onde, 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 grand facteur 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

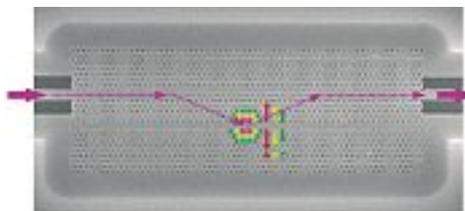
de Rabi*). Le contrôle accru par les cristaux photoniques de l'émission spontanée en plus du contrôle de l'émission stimulée permet la réalisation de lasers sans seuil ou à très faible seuil tout en présentant de grandes vitesses de modulation. Ces deux applications nécessitent la réalisation de cavités 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.

Des facteurs de qualité record

Une cavité typique à cristal photonique fabriquée à l'IEF est représentée **figure 1**. 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 cristal photonique 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, le décalage des trous est inférieur à 10 nm, ce qui représente une très faible variation par rapport à la périodicité du cristal (420 nm). Ce décalage est néanmoins suffisant pour que la fréquence de 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 $1,55 \mu\text{m}$, le temps de vie des photons piégés à l'intérieur est

FIGURE 1

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 9, 6 et 3 nm respectivement. La période du cristal photonique est de 420 nm et la taille de la structure de 20 μm .



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 $1,55 \mu\text{m}$, doit être de l'ordre de plus ou moins un demi picomètre*. On obtient ainsi un filtre optique planaire de

très fort facteur qualité, et donc très sélectif, dont le spectre de transmission est représenté **figure 2** pour deux couplages différents. On le voit, l'obtention de forts facteurs de qualité dépend d'un contrôle fin du couplage de la cavité et de ses guides d'accès aussi du dessin de cavité utilisé. On a aussi pu tester d'autres schémas de couplage tel celui représenté **figure 3**, 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.

Dans tous les cas de figure, si l'on souhaite mesurer

1 Les cristaux photoniques

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 gauche**). Connus depuis la fin du XIX^e 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 télé-

communications 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 tridimensionnels (**Figure 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 de réaliser des structures dont la période dans chacune des trois directions de l'espace est de seulement quelques centaines de nanomètres.

Un cas de figure intermédiaire est celui des cristaux photoniques bidimensionnels, périodiques dans seulement deux

directions de l'espace (**Figure centre**). Les technologies de gravure héritées de l'industrie des semi-conducteurs permettent assez aisément la réalisation de structures ayant des périodes de quelques centaines de nanomètres dans deux directions de l'espace. Ces cristaux photoniques bidimensionnels sont actuellement au cœur de nombreuses recherches. Dans le cas de l'optique, ils sont bien souvent constitués d'un réseau périodique de trous d'air gravés au travers d'une membrane suspendue dans l'air et réalisée dans un semi-conducteur. Ils possèdent une bande interdite dans le plan et se révèlent particulièrement adaptés à la réalisation de dispositifs photoniques et opto-électroniques de faibles dimensions, en optique intégrée planaire, tout en permettant un contrôle accru de la lumière.

FIGURE

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



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 4 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 4 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 4 à 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.

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 20 kV, contre 100 kV prochainement grâce à l'acquisition d'un nouveau masqueur qui permettra d'atteindre une meilleure résolution*. Les trous sont insolés en utilisant une forme de spirale commençant et finissant au centre du trou pour éviter de trop insoler les

bords 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 cavités à cristaux photoniques de très haut facteur de qualité. Lors du développement, les zones ayant reçu des électrons et uniquement celles-ci sont dissoutes. Après développement, la résine comporte donc des motifs conformes à ceux que l'on veut graver dans le silicium. Ils sont transférés au moyen d'un plasma accéléré capable de graver le silicium sans attaquer la résine. Une fois la gravure du silicium effectuée, la résine est retirée au moyen d'un solvant. Si l'on souhaite fabriquer des cristaux photoniques en approche membrane suspendue, approche qui permet à l'heure actuelle d'obtenir les plus forts facteurs de qualité, il faut retirer la couche d'oxyde enterrée, ce qui se fait usuellement par gravure humide au moyen d'acide fluorhydrique.

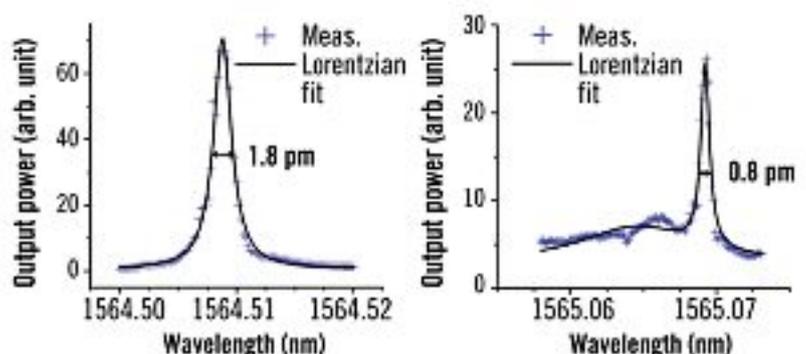
Les résultats obtenus sur les cavités à cristaux photoniques ouvrent de nouvelles perspectives quant à la réalisation de lasers reposant sur des processus présentant un très faible gain, comme la diffusion Raman*. En effet, les cristaux photoniques, et en particulier les cavités à cristaux photoniques, 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.

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 comme la spectroscopie Raman exaltée 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-

FIGURE 2

Spectre de transmission de la structure présente sur la figure 2 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.



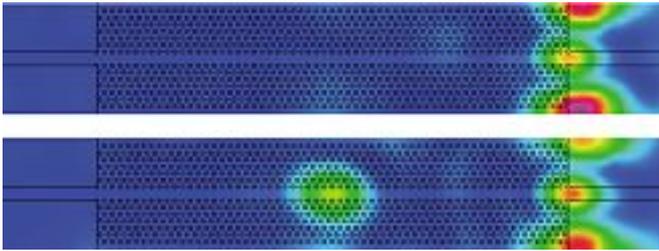
aussi un grand intérêt. Il s'agit d'un laser reposant sur la diffusion Raman du silicium, le matériau constituant les cristaux photoniques. L'intérêt d'un

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.

FIGURE 3

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.



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.

Deuxième application: des biocapteurs ultra sensibles

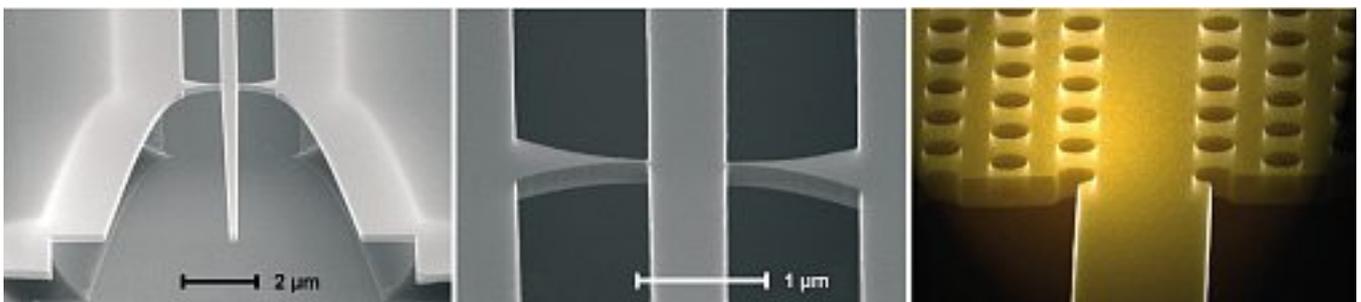
Une autre application des cavités à cristaux photonique concerne la réalisation de capteurs optiques. Les facteurs de qualités obtenus dans les cavités à cristaux photoniques étant extrêmement élevés, le moindre changement de l'environnement extérieur

FIGURE 4

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.



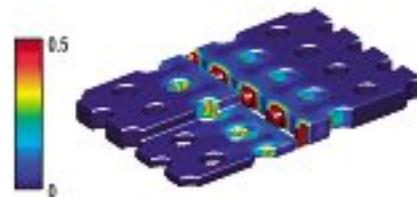
du cristal photonique peut suffire à dégrader le facteur de qualité ou à déplacer de manière significative la fréquence de résonance de la cavité. Ainsi les cristaux photoniques représentent une plate-forme intéressante pour la réalisation de nouveaux capteurs ultrasensibles d'espèces chimiques intégrés 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-tores ou de microsphères 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 5), 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'indice 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 5

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 tridimensionnelles. 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.



Glossaire

Bande électronique interdite :

En physique des solides, la théorie des bandes est une modélisation des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un solide à l'intérieur de celui-ci. De façon générale, ces électrons n'ont la possibilité de prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles, lesquels sont séparés par des « bandes » d'énergie interdites. Cette modélisation conduit à parler de bandes d'énergie ou de structure de bandes. Selon la façon dont ces bandes sont réparties, il est possible d'expliquer au moins schématiquement les différences de comportement électrique entre un isolant, un semi-conducteur et un conducteur.

Diffusion Raman :

Le principe de la spectroscopie Raman consiste à envoyer une lumière monochromatique (une seule couleur et pas un mélange) sur l'échantillon à étudier et à analyser la lumière diffusée. Le processus mis en jeu est le suivant : les photons incidents sont détruits et leur énergie sert à créer des photons diffusés et à créer (processus Stokes) ou détruire (processus anti-Stokes) des vibrations dans l'échantillon étudié. La différence d'énergie entre le photon incident et diffusé est égale à l'éner-

gie de la vibration créée (ou détruite) dans l'échantillon et est donc caractéristique du matériau constituant l'échantillon.

Effet Purcell :

L'effet Purcell résulte de la modulation du couplage d'une source aux modes électromagnétiques. Quand un environnement modifie, en un point de l'espace, la distribution spatiale et spectrale des modes électromagnétiques, il modifie également la façon dont une source placée en ce point se couple au champ électromagnétique et par extension son émission spontanée.

Oscillations de Rabi :

Lorsqu'un émetteur, comme un atome ou une boîte quantique, est fortement couplé à une onde électromagnétique, l'émetteur se met à émettre et ré-absorber la lumière de manière cyclique. Ce cycle porte le nom d'oscillation de Rabi. Il en résulte un dédoublement de la raie d'émission de l'émetteur.

Picomètre :

Le picomètre (symbole : pm) est une unité de longueur du système métrique, équivalent à $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ ou encore $1/1\ 000\ 000\ 000\ 000 \text{ m}$. Cette unité remplace l'angström

($1 \text{ \AA} = 100 \text{ pm}$) pour mesurer les longueurs des liaisons chimiques, qui ont alors typiquement quelques centaines de picomètres de long; les atomes ont en effet un rayon de 31 pm pour le plus petit (l'atome d'hélium) jusqu'à 298 pm pour le césium, le plus gros des atomes connus. Des unités plus petites telles que le femtomètre peuvent être utilisées pour décrire les noyaux atomiques ou encore les particules subatomiques.

Photon :

« Petit grain » (particule) de lumière. La lumière est une onde électromagnétique caractérisée par sa longueur d'onde mais on peut aussi considérer qu'elle renferme des petits grains d'énergie, les photons.

Résolution :

Dimension du plus petit détail discernable dans une image.

Réfraction (indice de) :

L'indice de réfraction d'un milieu à une longueur d'onde donnée mesure le facteur de réduction de la vitesse de phase de la lumière dans le milieu. Les rayons de lumière changent de direction lorsqu'ils passent d'un matériau à un autre. Cet effet, appelé réfraction est à la base de la conception des lentilles optiques.