

Des diodes électroluminescentes plus rapides et plus efficaces

Les composants opto-électroniques émetteurs de lumière, lasers et diodes électroluminescentes, sont formés d'un matériau semi-conducteur au sein duquel des électrons, excités par un courant électrique, se dés excitent en émettant chacun un photon. L'introduction de microcavités optiques dans ces composants permet de tirer un meilleur parti des photons émis spontanément. Dans les lasers, le courant de seuil, courant d'excitation minimum nécessaire à l'obtention de l'effet laser, a ainsi été divisé par cent ; le rendement de conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse des diodes électroluminescentes a été multiplié par dix.

Fabriqués industriellement depuis 1994, les microlasers à cavité verticale sont aujourd'hui commercialisés par plusieurs sociétés. Ces composants présentent l'avantage sur les diodes laser classiques, utilisées par exemple dans les lecteurs de disques compacts, d'émettre un faisceau laser circulaire dans une direction bien définie : leur raccordement à une fibre optique est plus facile. On peut aussi les fabriquer et les tester en grand nombre simultanément, ce qui réduit considérablement les coûts de production et de montage (les coûts du test et du montage en boîtier d'une diode laser entrent pour 80 pour cent dans le coût total).

Leurs performances sont bien adaptées aux besoins de transmission à haut débit entre serveurs informatiques ou entre processeurs au sein d'ordinateurs massivement parallèles. On commercialise aujourd'hui des câbles optiques qui utilisent en parallèle une dizaine de microlasers et qui transmettent jusqu'à six milliards d'informations binaires à la seconde sur quelques centaines de mètres. La réalisation récente de lasers à cavité verticale émettant de la lumière bleue (de longueur d'onde plus courte, donc permettant une résolution spatiale plus fine) ouvre par ailleurs de nouvelles perspectives pour l'impression laser ou le stockage d'informations sur des disques optiques.

Ces microlasers commerciaux ont une longueur d'une dizaine de micromètres et un courant de seuil d'environ un milliampère. Les microdisques laser, les fils photoniques ou les microlasers à cavité verticale de faible diamètre, qui ne sont encore que des objets de laboratoire, ont des courants de seuil beaucoup plus faibles, le record étant huit micro-ampères, ce qui leur ouvrira de nouveaux champs d'applications.

Toutefois, le marché des diodes électroluminescentes, en pleine expansion, engendre aujourd'hui un chiffre d'affaires cinq fois plus grand que celui des diodes laser. En effet, les diodes électroluminescentes remplacent progressivement les lampes à incandescence pour la visualisation (feux tricolores, signalisation autoroutière), les écrans plats actifs en couleur et bientôt l'éclairage domestique. Leurs atouts principaux sont leur rendement d'émission supérieur et leur fiabilité (leur durée de vie est de l'ordre du siècle). Nous allons voir que la réduction de la taille de ces diodes améliore, comme pour les lasers, et pour des raisons analogues, leur efficacité.

Une diode électroluminescente est formée d'un semi-conducteur qui, excité par un courant, émet spontanément des photons à une longueur d'onde fixée par la nature du matériau (au contraire de ce qui se passe dans un laser, la lumière n'est pas amplifiée par une émission stimulée). L'une des principales limitations physiques de ces diodes est liée au phénomène de réflexion interne à l'interface entre le semi-conducteur, de fort indice de réfraction, et l'air : deux pour cent seulement des photons émis spontanément le sont dans une direction proche de la normale à l'interface et peuvent donc sortir de la diode. Les autres restent piégés à l'intérieur du semi-conducteur, où ils sont réabsorbés. Le rendement de l'émission lumineuse vers l'extérieur de la diode est donc faible.

L'insertion d'une couche mince de semi-conducteur entre deux miroirs a récemment permis à des chercheurs de l'Université de Gand d'extraire d'une diode 23 pour cent des photons émis. Les réflexions multiples de la lumière piégée entre les deux miroirs ne sont en effet en phase que pour certaines directions de propagation des photons, et l'effet d'interférence y concentre l'ensemble de l'émission spontanée. On obtient un fin pinceau lumineux normal à l'échantillon en choisissant, entre les miroirs, une distance multiple de la demi-longueur d'onde. Des calculs d'optimisation portant sur les matériaux qui constituent les miroirs, effectués par H. Benisty et C. Weisbuch, à l'École polytechnique, montrent que l'on pourrait extraire ainsi jusqu'à 50 pour cent des photons.

En réduisant encore le nombre de modes photoniques (les modes photoniques correspondent aux ondes lumineuses stationnaires qui peuvent s'établir dans le milieu), on ajuste en outre le rythme auquel les photons spontanés sont émis. Dans une microcavité qui confine les photons sur des distances de l'ordre de la longueur d'onde dans les trois dimensions de l'espace, le nombre de modes photoniques est faible, et ils sont d'énergies bien différentes. Pour un émetteur placé dans une telle cavité et qui n'émettrait des photons qu'à des longueurs d'ondes différentes de celles des modes photoniques, l'émission spontanée serait complètement inhibée. En revanche, si l'émetteur peut émettre des photons à une longueur d'onde qui correspond à l'un des modes de la cavité, son émission spontanée dans ce mode est favorisée par le confinement des photons et le renforcement du champ électromagnétique du mode dans la cavité : l'émission spontanée dans ce mode est accélérée.

En 1983, l'équipe de Serge Haroche, à l'École normale supérieure, a réalisé un système fondé sur ce principe qui émettait dans le domaine des micro-ondes : des atomes placés au sein de petites cavités supraconductrices émettaient spontanément des photons 500 fois plus vite que dans le vide. De nombreuses équipes ont ensuite cherché à observer un tel phénomène pour des microcavités optiques semi-conductrices. Les techniques de micro-fabrication ont rapidement permis d'obtenir un confinement tridimensionnel des photons à l'échelle du

micromètre, mais il a été beaucoup plus difficile de trouver un émetteur adéquat : dans un semi-conducteur, l'agitation thermique, en communiquant de l'énergie aux électrons excités, élargit le spectre d'émission spontanée. Au sein d'une microcavité, cette émission est exaltée à l'énergie des modes de la cavité et inhibée aux autres énergies : au total, on ne modifie que de quelques dizaines de pour cent le rythme d'émission des photons spontanés.

Notre équipe a proposé d'employer comme émetteurs des «boîtes quantiques». Nous avons mis au point une méthode qui permet l'insertion d'inclusions d'arséniure d'indium de taille contrôlée au sein d'une matrice d'arséniure de gallium. Ces inclusions semi-conductrices se comportent comme un piège à électrons. La mécanique quantique nous apprend que, pour un tel système électronique de taille nanométrique, l'énergie des électrons ne peut prendre que quelques valeurs bien séparées. L'agitation thermique ne suffit pas pour faire passer les électrons d'un niveau d'énergie à un autre : tous les électrons excités ont la même énergie, et l'émission d'une boîte quantique donnée est spectralement très fine. En plaçant de tels émetteurs au cœur d'une microcavité tridimensionnelle de très petit volume, nous avons observé qu'ils émettent spontanément des photons cinq fois plus vite que lorsqu'ils sont à l'extérieur de la cavité.

Ce résultat préliminaire (notre expérience a été réalisée à huit kelvins) ouvre, à terme, de riches perspectives d'application pour les microcavités optiques. En premier lieu, on pourrait augmenter la fréquence maximale d'allumage et d'extinction des diodes électroluminescentes,

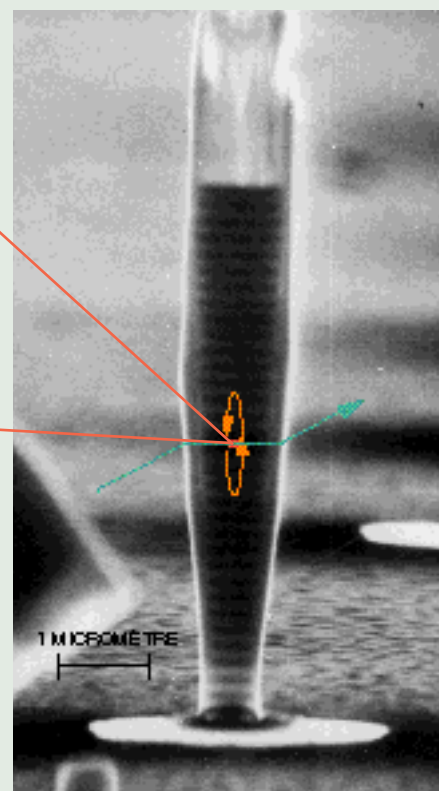
qui n'est limitée que par la dynamique de l'émission spontanée. En outre, en accélérant l'émission dans un mode photonique privilégié, le mode résonant de la microcavité, on augmente aussi, parmi les photons émis spontanément, la proportion de ceux qui sont émis dans ce mode. Dans notre expérience, l'émetteur émet des photons dans les modes de fuite de la microcavité (tous les modes qui ne participent pas à l'émission lumineuse dans la direction souhaitée) à la même vitesse qu'il émet dans tout l'espace lorsqu'il est en dehors de la cavité, mais il émet quatre fois plus vite des photons dans le mode résonant de la cavité : 80 pour cent des photons émis spontanément le sont donc dans cet unique mode.

Si le composant émettait 100 pour cent des photons dans ce mode, il deviendrait un laser sans courant de seuil : pour chaque électron injecté électriquement, un photon serait émis dans le mode utile, spontanément ou par stimulation. L'émission de lumière deviendrait alors un phénomène parfaitement déterministe. Nous pourrions communiquer un bit d'information avec un seul photon (dans les composants actuels, on doit envoyer plusieurs dizaines de photons au moins par impulsion lumineuse afin d'éviter toute erreur due à la fluctuation du nombre de photons émis). Si nous nous rapprochons encore d'un tel composant idéal, de nouveaux protocoles de transmission de l'information pourront être efficacement mis en œuvre, en particulier la cryptographie quantique, qui repose sur le codage en polarisation de photons émis un par un dans une fibre optique et qui garantit une parfaite confidentialité de l'échange de données.

Jean-Michel GÉRARD, *France Télécom*, CNET/CDP
Laboratoire de Bagneux



Micrographie Anne Ponchet, CNET/CNRS



Collaboration : E. Costard, Thomson-CSF-LCR et V. Thierry-Miegue, CNET, L2M

UN MICROPILIER SEMI-CONDUCTEUR (à droite) est une microcavité optique formée de deux réflecteurs de Bragg, empilements périodiques de couches alternées d'arséniure de gallium et d'arséniure d'aluminium. Cette structure confine fortement, dans les trois directions de l'espace, quelques modes de photons (flèche orange) pour lesquels ces derniers sont guidés dans l'axe du micropilier par la différence d'indice entre le semi-conducteur et l'air, et sont réfléchis par les miroirs de Bragg. Il existe aussi des modes de fuite (flèche verte), non confinés. Des boîtes quantiques d'arséniure d'indium (sur l'image de gauche, zones claires au milieu des halos sombres) ont été insérées dans la couche centrale (les halos sombres proviennent de la déformation du réseau cristallin de l'arséniure de gallium). Chaque boîte quantique a une raie d'émission très fine spectralement. Cette propriété a permis d'observer une forte exaltation de leur émission spontanée lorsque leur longueur d'onde d'émission correspond à l'énergie de l'un des modes confinés.

atomes dans le cristal et de l'angle avec lequel les rayons X frappent le réseau. Eli Yablenovitch, de l'Université de Los Angeles, a eu l'idée de transposer cette loi à un réseau à trois dimensions. Avec des collègues de l'Université de l'Iowa, il a trouvé une structure dans laquelle certaines longueurs d'onde ne peuvent se propager dans aucune direction : la structure possède une bande photonique interdite. Si l'on crée localement un défaut dans cette structure et que l'on place un émetteur de lumière à une longueur d'onde adéquate de la bande interdite, cette lumière reste confinée au voisinage du défaut et est amplifiée. C'est le principe de base d'un nouveau type de laser.

Avec mes collègues, nous avons ainsi construit un réseau hexagonal de minuscules colonnes d'arséniure de gallium, espacées de telle façon qu'il piège la lumière infrarouge. Cette structure n'est pas encore un laser, mais nous pensons en obtenir un en excitant l'une des colonnes pour lui faire émettre de la lumière, qui serait ensuite réfléchiée de façon répétée (et efficacement confinée) par les autres colonnes du réseau.

Dans le même esprit, mais en remplaçant les colonnes par des trous dans un semi-conducteur, des chercheurs de l'Institut de technologie du Massachusetts ont fabriqué un minuscule pont de silicium de 470 nanomètres de largeur et de 200 nanomètres d'épaisseur percé, dans sa longueur, par une rangée de trous microscopiques. La lumière ne peut pas s'échapper par les côtés de ce pont, à cause de la différence des indices de réfraction du semi-conducteur et de l'air. Des simulations numériques avaient permis de calculer l'espacement périodique entre les trous pour obtenir un «réseau» qui confine la lumière infrarouge. En outre, on avait calculé qu'en écartant un

peu plus les deux trous situés de part et d'autre du centre du pont on créerait une «boîte» d'à peine un vingtième de micromètre cube de volume où un mode optique fondamental pourrait s'établir. Cette «boîte» devrait devenir un jour une cavité laser, les trous adjacents servant de miroirs. Cette structure a été construite sur un socle de verre, et l'on a vérifié que les résultats expérimentaux étaient comparables aux simulations.

D'autres travaux ont exploré des «réseaux photoniques» à trois dimensions qui, en théorie, confinaient la lumière dans toutes les directions, caractéristique idéale pour un laser sans courant de seuil. De telles structures sont toutefois difficiles à fabriquer, car les techniques disponibles ont surtout été mises au point pour la fabrication de composants électroniques couche par couche, en deux dimensions.

Les lasers sans courant de seuil réagiraient beaucoup plus rapidement que les lasers actuels : les électrons émis le sont tous dans le mode laser, et celui-ci s'établit très vite. En d'autres termes, faire bouillir un récipient d'eau ne prendrait que le temps de craquer l'allumette. Certains lasers peuvent déjà être mis en marche et éteints plus de 20 milliards de fois par seconde.

De telles vitesses s'imposent pour les communications par fibres optiques, et d'autres applications apparaîtront à mesure que ces dispositifs deviendront encore plus rapides, plus petits et plus efficaces. Les lasers sans courant de seuil, qui semblent aujourd'hui davantage à notre portée, grâce aux récentes percées dans la fabrication de structures d'échelle nanométrique, sont très prometteurs comme futurs composants pour transmettre et manipuler des informations.

Paul Gourley travaille aux Laboratoires Sandia.

J. JEWELL, J. HARBISON et A. SCHERER, *Les microlasers*, in *Pour La Science*, janvier 1992.

H. YOKOYAMA, *Physics and Device Applications of Optical Microcavities*, in *Science*, vol. 256, pp. 66-70, 3 avril 1992.

Optics of Nanostructures, numéro spécial de *Physics Today*, vol. 46, n° 6, juin 1993.

Paul GOURLEY, Kevin LEAR et Richard SCHNEIDER, Jr., *Surface-Emitting Lasers*,

in *IEEE Spectrum*, vol. 31, n° 8, pp. 31-37, août 1994.

Paul L. GOURLEY, *Microstructured Semiconductor Lasers for High-Speed Information Processing*, in *Nature*, vol. 371, pp. 571-577, 13 octobre 1994.

John D. JOANNOPOULOS, Robert D. MEADE et Joshua N. WINN, *Photonic Crystals : Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, 1995.

Microcavities and Photonic Bandgaps : Physics and Applications, sous la direction de John Rarity et Claude Weisbuch, Kluwer Academic Publishers, 1996.