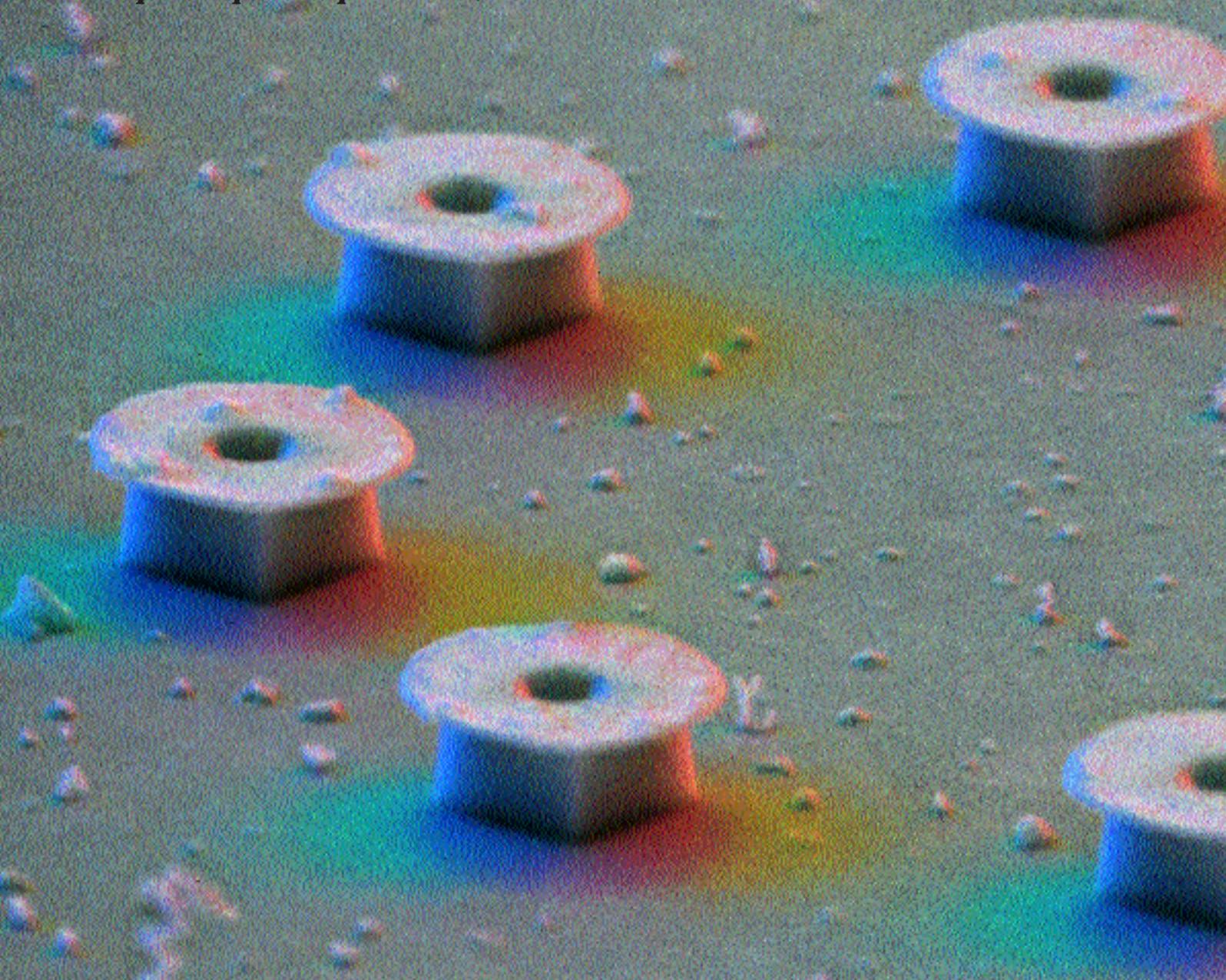


Les nanolasers

PAUL GOURLEY

Les lasers à semi-conducteur sont devenus plus petits que la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent. À ces tailles, le comportement quantique des photons améliore le rendement.



1. CHACUN DE CES MICRODISQUES LASER a un diamètre de quelques micromètres et une épaisseur d'une fraction de micromètre. Ils sont en matériau semi-conducteur et soutenus par un pied. La lumière produite dans le disque se propage le long de sa circonférence avant de s'échapper radialement, comme le montre la figure d'interférence calculée (en bas, à droite). Les dépressions, au centre des disques, et les minuscules protubérances sont d'inévitables conséquences du procédé de gravure chimique utilisé pour fabriquer ces structures.

Depuis l'invention du transistor, à la fin des années 1940, la taille des composants micro-électroniques n'a cessé de diminuer, atteignant aujourd'hui quelques dixièmes de micromètres. Les puces sont devenues de plus en plus complexes, de plus en plus rapides, et la puissance de calcul des ordinateurs a augmenté.

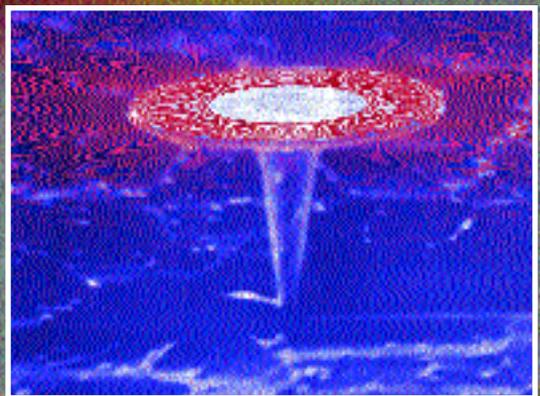
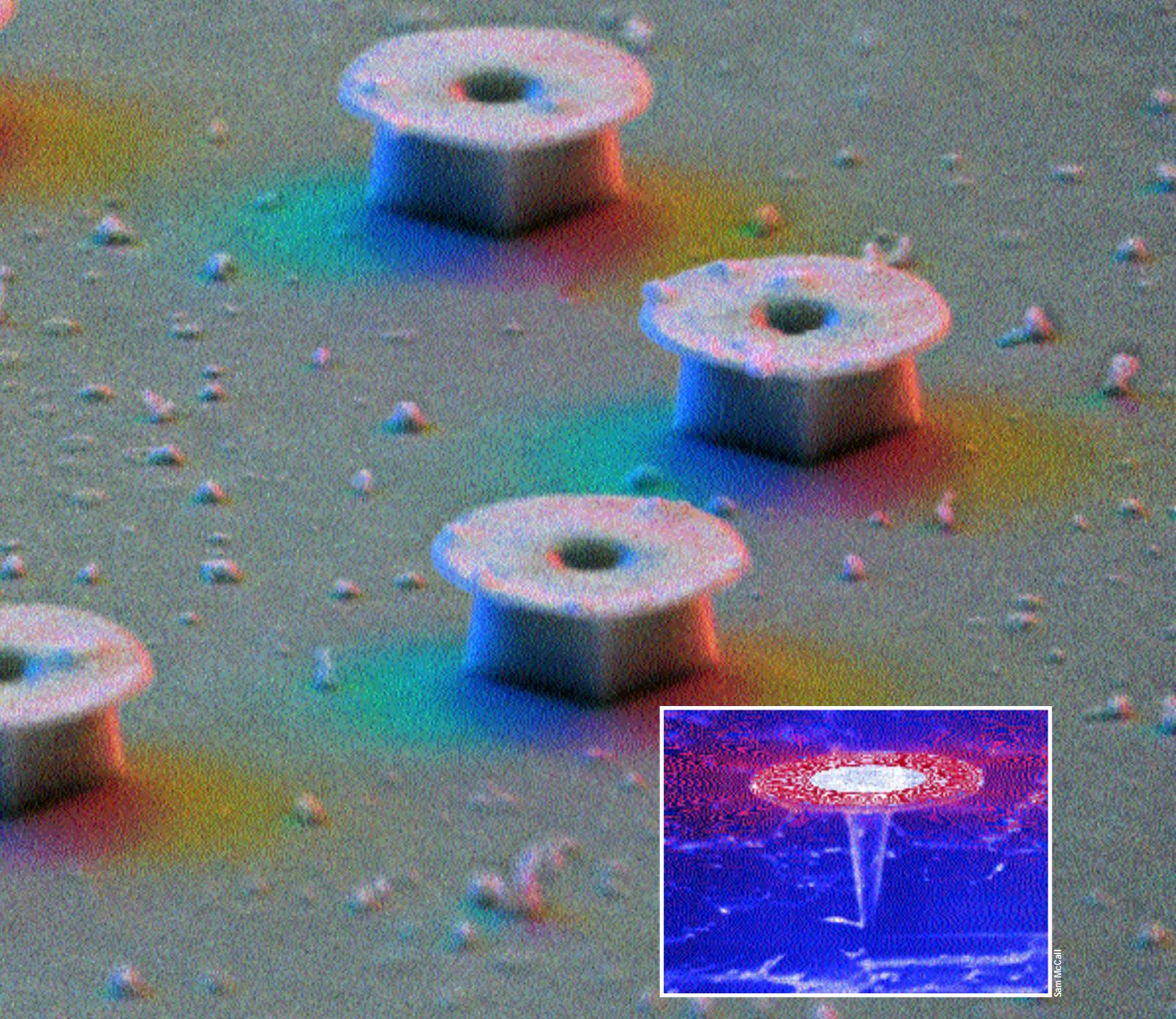
Les lasers à semi-conducteur se miniaturisent également : leurs dimensions atteindront bientôt un nanomètre (un milliardième de mètre), c'est-à-dire moins que la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent. À cette échelle, les électrons et les photons ont de

curieux comportements, qui sont la clef de composants plus efficaces et plus rapides.

Des microlasers sont déjà utilisés pour la transmission d'informations à travers les fibres optiques. Avec des collègues, nous explorons leur application au diagnostic médical.

Le principe de base des lasers à semi-conducteur est le même que celui de leur premier ancêtre, mis au point il y a 35 ans avec un barreau de rubis. Un matériau excitable, un cristal semi-conducteur, est placé entre deux miroirs parallèles. Dans un semi-conducteur, les valeurs possibles pour l'énergie des électrons sont regroupées en deux inter-

valles étroites et bien séparées, les «bandes électroniques». Lorsqu'on excite le semi-conducteur à l'aide de lumière ou d'électricité, ses électrons passent de la bande de plus faible énergie à la bande de plus grande énergie. Les électrons ainsi excités reviennent dans la bande de plus faible énergie en émettant spontanément un photon dont l'énergie est égale, ou légèrement supérieure, à la différence d'énergie entre les bandes électroniques. Les photons qui se propagent perpendiculairement aux miroirs sont réfléchis par ceux-ci et font des aller et retour dans le matériau excité. Ils interagissent alors avec les électrons excités et provoquent



Sam McCall

l'émission de photons identiques (ce mécanisme, l'émission stimulée, a donné son nom au «laser», acronyme anglais d'«amplification lumineuse par émission stimulée»). L'onde lumineuse correspondant à tous ces photons (que l'on nomme le «mode laser») est ainsi amplifiée, et une petite partie de la lumière sort à travers l'un des miroirs (dont la réflectivité n'est pas totale) sous la forme d'un fin faisceau.

Toutefois, tous les photons ne sont pas émis dans le mode laser. Beaucoup sont émis spontanément, indépendamment des autres, à d'autres longueurs d'onde; ils diffusent dans toutes les directions, heurtant les parois du laser, qu'ils échauffent, au lieu de rebondir entre les miroirs. Dans un laser de lecteur de disques compacts, par exemple, un photon émis spontanément sur 10 000 seulement est utile.

En raison de ces pertes, il existe un courant minimum, nommé «courant de seuil», au-dessous duquel on n'excite pas assez d'électrons pour obtenir une émission stimulée. De la même façon, lorsqu'on veut faire bouillir de l'eau dans une casserole, on adapte la taille de la flamme à celle de la casserole : si la flamme est trop petite, les pertes de chaleur empêchent d'atteindre l'ébullition ou la retardent beaucoup.

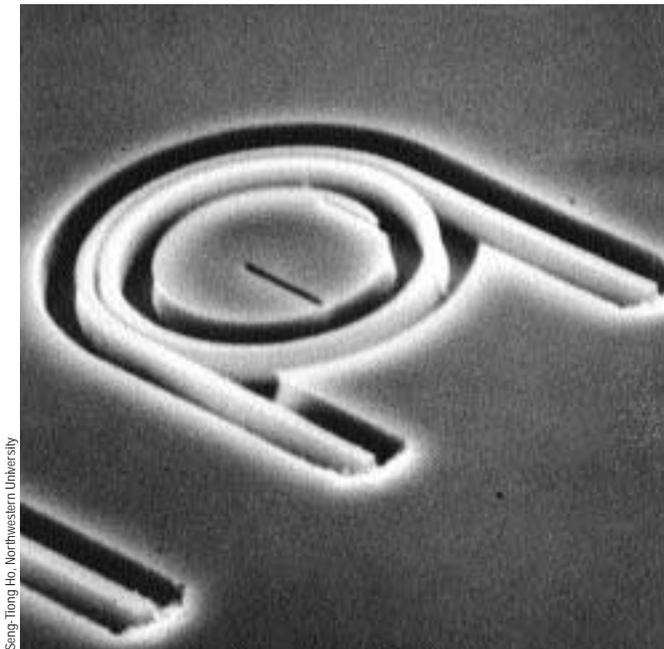
Des lasers pourraient-ils avoir un courant de seuil nul? Ils consommeraient très peu d'énergie (un peu comme si l'on faisait bouillir de l'eau dans un récipient spécial que l'on ne chaufferait qu'avec une allumette). Dans un tel composant, proposé par Yoshihisa Yamamoto, des Laboratoires NTT, et Takoshi Kobayashi, de l'Université d'Osaka, tous les photons, même ceux émis spontanément, le seraient dans le mode laser. À quoi ressemblerait-il? Nous ne sommes certains que d'une chose : il sera très petit, ses dimensions étant de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière émise dans toutes les directions, afin de tirer avantage du comportement quantique des photons.

Les premiers jalons vers un laser sans seuil d'amorçage ont été posés à la fin des années 1970, lorsque Kenichi Iga et ses collègues de l'Institut de technologie de Tokyo ont mis au point des «microlasers» dont les dimensions sont de l'ordre du micromètre et qui diffèrent sur plusieurs points des diodes laser semi-conductrices utilisées dans les lecteurs de disques compacts. Les diodes laser sont des parallélépipèdes découpés dans une plaque de semi-conducteur et qui émettent leur lumière perpendiculairement aux faces coupées. Plus petits et cylin-

driques, les microlasers émettent des faisceaux lumineux parfaitement circulaires, perpendiculairement aux disques de matériaux semi-conducteurs dont ils sont formés. Ils peuvent être simultanément fabriqués et testés en grand nombre, car ils sont disposés en rangées sur une même plaquette de semi-conducteur, comme les puces électroniques.

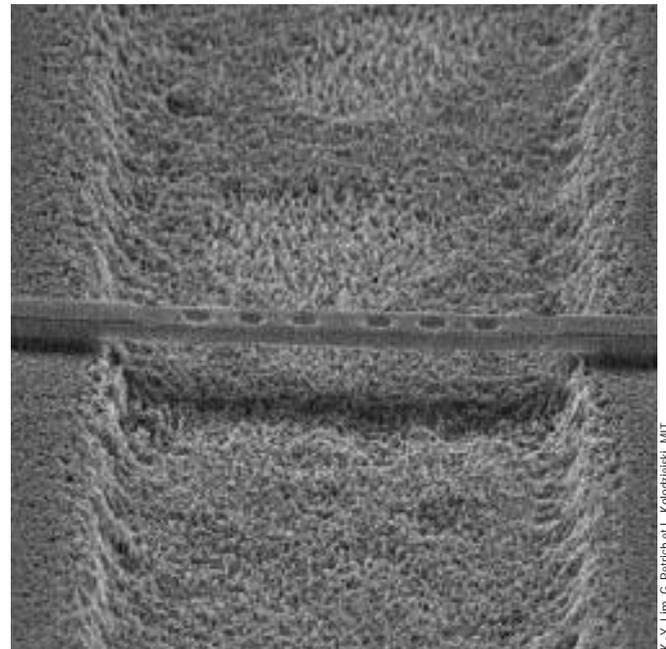
Les miroirs des microlasers sont formés de couches alternées de matériaux semi-conducteurs aux indices de réfraction différents, tels l'arséniure de gallium et l'arséniure d'aluminium : à l'interface des deux milieux, une partie de la lumière est réfléchie, comme sur une fenêtre transparente dont le verre a un indice de réfraction supérieur à celui de l'air. Lorsque les couches sont épaisses d'un quart de longueur d'onde exactement, les réflexions partielles successives se renforcent mutuellement. Dans le cas d'une alternance d'arséniure de gallium et d'arséniure d'aluminium, une douzaine de couches réfléchit 99 pour cent de la lumière (plus que les miroirs métallisés de nos salles de bains).

En réduisant encore la taille des microlasers, on améliore le rendement de conversion, grâce au comportement quantique des photons. Lorsque l'épaisseur du laser est inférieure à la



Song-Tjong Ho, Northwestern University

2. CE MICRO-ANNEAU LASER semi-conducteur gravé qui émet de la lumière dans toutes les directions du plan est entouré d'une structure semi-conductrice en forme de U, qui guide la lumière hors du dispositif en deux faisceaux parallèles le long de ses branches. Le laser proprement dit est un tore semi-conducteur, dont la section rectangulaire mesure 0,4 sur 0,2 micromètres.



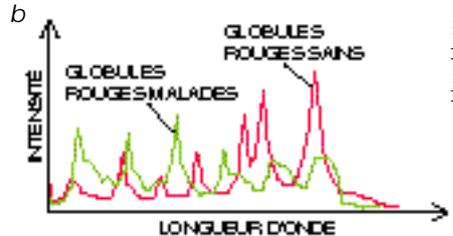
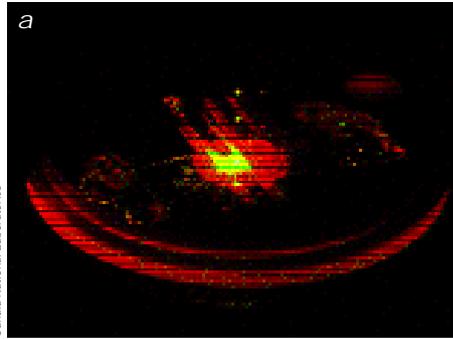
K.-Y. Lim, G. Petrich et L. Klotzberg, MIT

3. LA LUMIÈRE qui se propage dans ce pont semi-conducteur est bloquée par le «réseau» unidimensionnel de trous percés dans sa longueur. En espaçant les deux trous les plus proches du centre du pont, on crée une «boîte» d'un vingtième de micromètre cube de volume, où une émission laser pourrait s'établir, le réseau de trous remplaçant les miroirs d'un laser classique.

Des biocavités laser pour détecter les maladies

Plus les lasers semi-conducteurs seront rapides et efficaces, plus ils auront d'applications. Avec mes collègues des Laboratoires *Sandia*, nous les utilisons pour le diagnostic médical : nous avons mis au point une «biocavité laser» (a) qui permet, par exemple, de distinguer des cellules cancéreuses d'avec des cellules saines.

Le dispositif est un microlaser, minuscule morceau d'arséniure de gallium entouré de deux miroirs, qui émet un rayonnement infrarouge. Ce rayonnement est réfléchi par les miroirs et amplifié jusqu'à ce qu'il sorte sous la forme d'un faisceau laser fin. Lorsqu'on interpose une mince couche de tissu humain entre l'arséniure de gallium et l'un des miroirs, le tissu se comporte comme une lentille interne qui focalise la lumière : les cellules modifient le faisceau laser en introduisant des harmoniques, dont la signature spectrale est caractéristique de la taille, de la forme ou de la composition cellulaires. Les médecins peuvent utiliser cette information pour différencier les tissus malades d'avec les tissus sains, car ils détectent en sortie de laser des spectres lumineux différents (b), comme un piccolo et une flûte qui jouent la même note peuvent être distingués par leurs spectres d'harmoniques différents.



des tissus requièrent une coloration chimique pour rendre visible la structure des cellules lors de l'examen au microscope en laboratoire ; les lames sont parfois difficiles à examiner. Les biocavités laser produisent directement des spectres simples qu'un dispositif portable peut analyser presque instantanément et n'importe où.

Nous avons breveté une version portable de cette biocavité laser, afin que les médecins n'aient plus à envoyer des échantillons aux laboratoires pour obtenir des analyses. Dans ce dispositif, le sang circule dans de minuscules rainures dont la largeur est à peine le dixième de l'épaisseur d'un cheveu, gravées dans l'un des miroirs. En analysant le faisceau laser résultant, le dispositif détecte rapidement la présence de globules rouges en forme de croissant, caractéristiques de l'anémie falciforme. Les médecins peuvent aussi utiliser le laser pour étudier les modifications de la structure des cellules du sang causées par le virus du SIDA ou dépister des cellules cancéreuses dans des prélèvements du col de l'utérus. Des perfectionnements permettront l'analyse d'ADN.

Les méthodes classiques d'analyse

longueur d'onde de la lumière émise, l'énergie des photons ne peut prendre que des valeurs particulières. Les grands lasers émettent des photons de plusieurs longueurs d'onde, comme une longue corde de guitare que l'on pince produit un son constitué d'une fréquence fondamentale et de plusieurs harmoniques, multiples de la fréquence fondamentale. Plus la corde de guitare est courte, plus la note fondamentale est aiguë et plus le nombre d'harmoniques est petit, jusqu'à une limite fixée par l'épaisseur et la nature du matériau de la corde. De même, lorsqu'on réduit la taille des lasers, on réduit aussi le nombre de modes possibles pour les photons. La plus petite dimension pour laquelle les photons continuent de rebondir entre les miroirs est la demi-longueur d'onde du mode laser. Si les photons sont confinés dans ce petit espace dans les trois dimensions, seul le mode laser peut alors exister, et aucun photon n'est gaspillé : le laser n'a pas de seuil d'amorçage.

Il y a une dizaine d'années, avec des collègues des Laboratoires *Sandia*, nous avons ainsi réduit le spectre d'émission d'un microlaser à quelques modes seulement, en rapprochant les miroirs situés à ses extrémités. Toute-

fois, nos systèmes, et même les plus perfectionnés des nanolasers actuels, n'ont pas un courant de seuil nul : une centaine de modes sont encore possibles, bien moins que les dizaines de milliers des diodes laser, mais trop pour supprimer toutes les pertes.

Comment améliorer encore les nanolasers ? Richard Slusher et ses collègues des Laboratoires *Bell* ont fabriqué des microdisques laser. Avec des techniques de micro-électronique, ils ont découpé un disque de quelques micromètres de diamètre et de seulement 100 nanomètres d'épaisseur. Ce disque semi-conducteur est entouré d'air et monté sur un minuscule support, ce qui donne à l'ensemble l'aspect d'une table microscopique. La petite taille du disque limite le nombre de modes optiques possibles.

Comme le semi-conducteur et l'air ont des indices de réfraction très différents, la lumière émise dans le disque se réfléchit à l'intérieur de la structure, par un phénomène similaire à celui qui permet d'entendre des paroles chuchotées à l'autre extrémité d'une pièce voûtée : les vibrations sonores se réfléchissent sur les murs et se renforcent mutuellement. Chaque photon fait ainsi un grand nombre de

tours dans le disque avant de s'échapper, et il stimule l'émission de beaucoup d'autres photons. Ces lasers ont un très bon rendement, et un courant de seuil très petit.

Une variante du microdisque est le micro-anneau laser, où les photons circulent. Seng-Tiong Ho et ses collègues de l'Université Northwestern ont sculpté un tel anneau d'un diamètre de 4,5 micromètres et dont la section, rectangulaire, ne mesure que 0,4 par 0,2 micromètres. Pour collecter la lumière émise, ils ont entouré le micro-anneau d'un guide en forme de U, dont les branches guident les photons en deux faisceaux parallèles.

Une autre voie de recherche pour l'amélioration des nanolasers concerne le remplacement des miroirs par des réseaux dont la disposition réduit le nombre de modes optiques du composant. Au début des années 1900, William Henry Bragg et son fils William Lawrence Bragg, physiciens anglais qui se partagèrent le prix Nobel en 1915, étudièrent la réflexion des rayons X par la structure périodique d'un réseau cristallin. Selon la «loi de réflexion de Bragg», l'intensité du rayonnement réfléchi dépend de la longueur d'onde des rayons X, de l'espacement des

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 désexcitent 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.

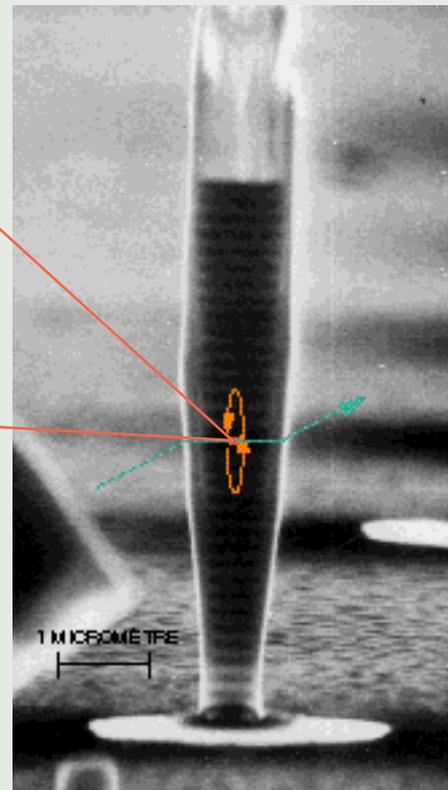
Notre équipe a proposé d'employer comme émetteurs des «boîtes quantiques». Nous avons mis au point une méthode qui permet l'insertion d'inclusions d'arséniure d'indium de taille contrôlée au sein d'une matrice d'arséniure de gallium. Ces inclusions semi-conductrices se comportent comme un piège à électrons. 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



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.