

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.

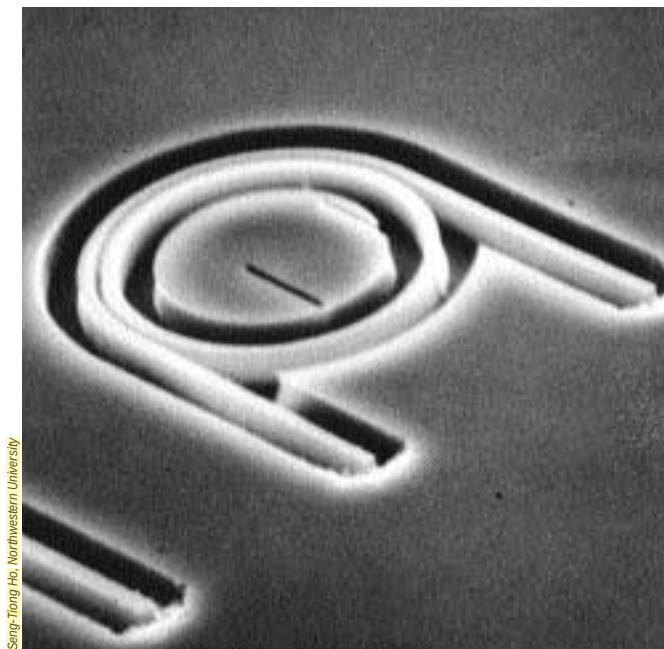
Des lasers pourraient-ils avoir un courant de seuil nul? Ils consommeraient très peu d'énergie (un peu comme si l'on faisait bouillir de l'eau dans un récipient spécial que l'on ne chaufferait qu'avec une allumette). Dans un tel composant, proposé par Yoshihisa Yamamoto, des Laboratoires NTT, et Takoshi 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.

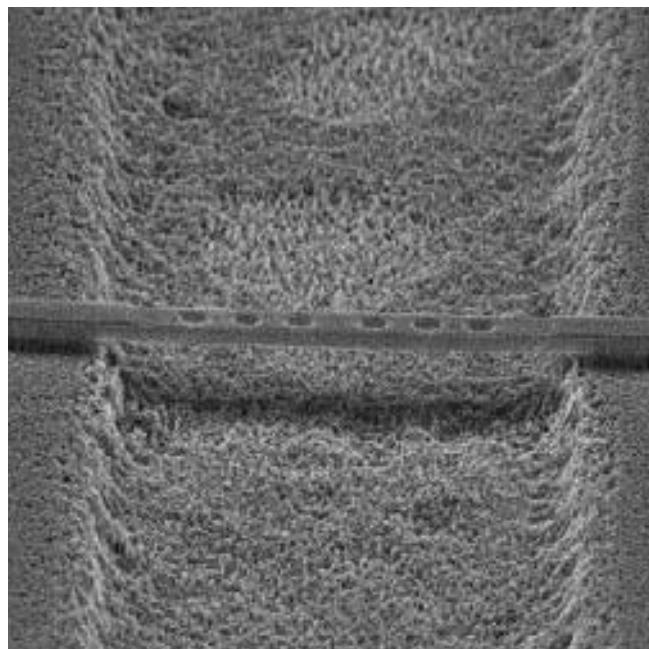
Les miroirs des microlasers sont formés de couches alternées de matériaux semi-conducteurs aux indices de réfraction différents, tels l'arséniure de gallium et l'arséniure d'aluminium : à l'interface des deux milieux, une partie de la lumière est réfléchie, comme sur une fenêtre transparente dont le 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



Sung-Tong 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.



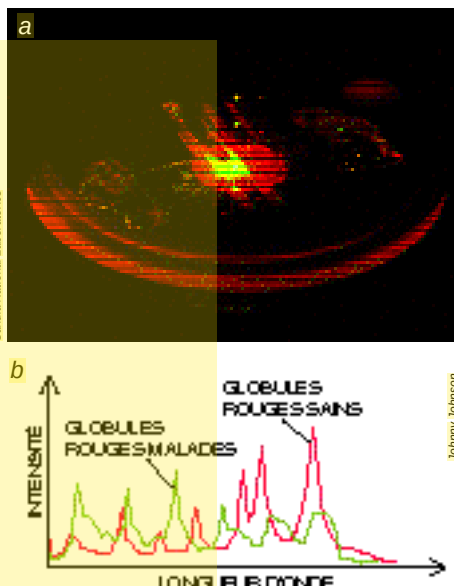
K.-Y. Lim, G. Patridge et L. Klotzberg, MIT

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.



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 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.

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