

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.

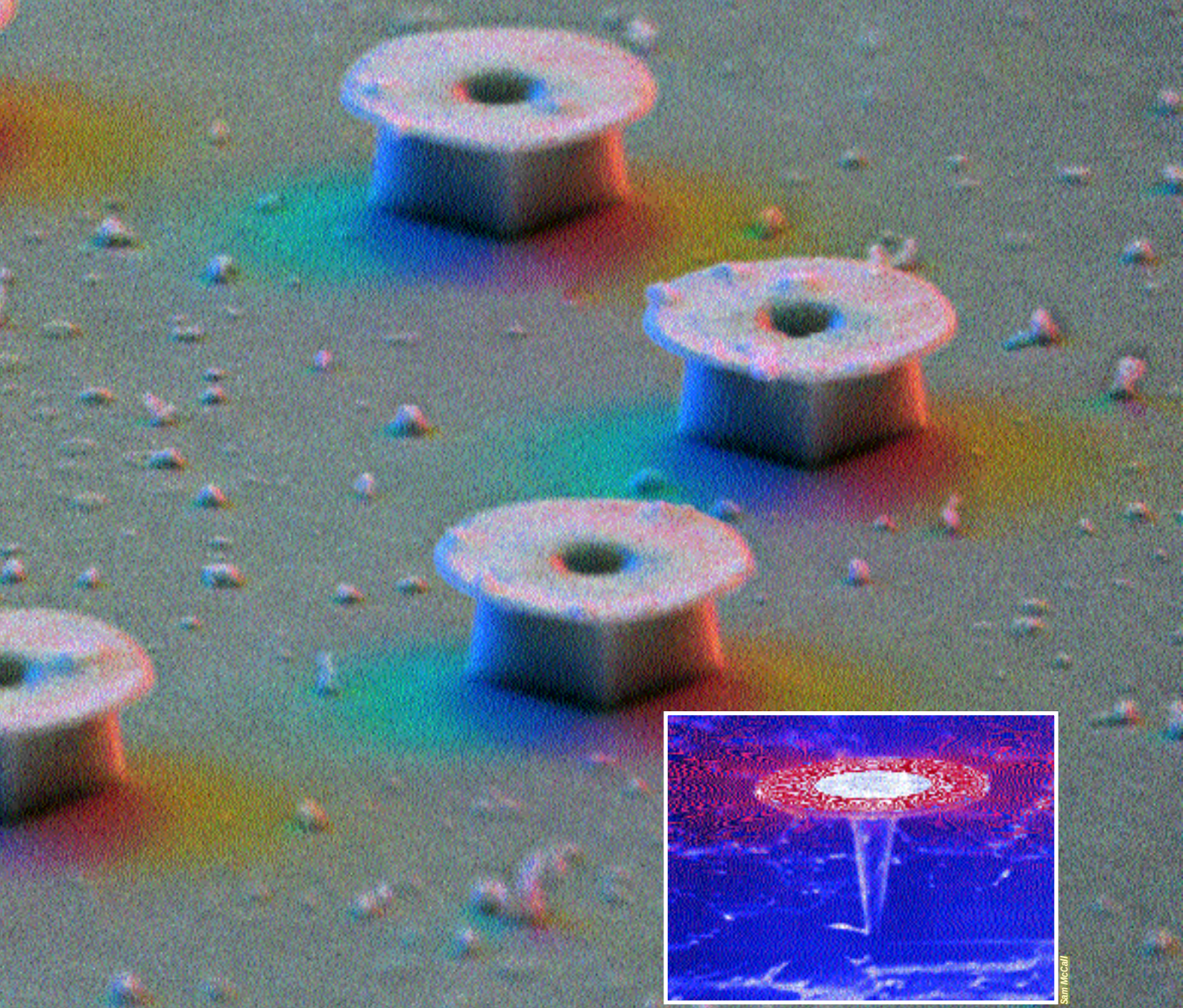
Les lasers à semi-conducteur se miniaturisent également : leurs dimensions atteindront bientôt un nanomètre (un milliardième de mètre), c'est-à-dire moins que la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent. À cette échelle, les électrons et les photons ont de

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.

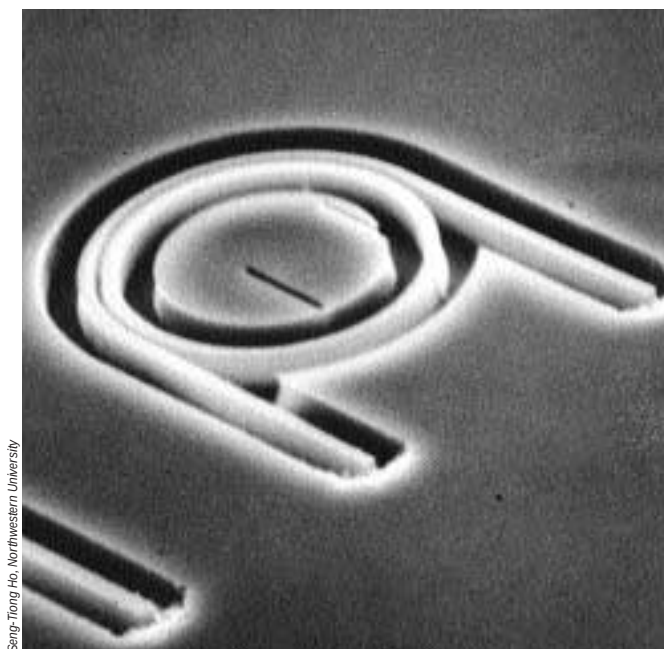
Des lasers pourraient-ils avoir un courant de seuil nul? Ils consommeraient très peu d'énergie (un peu comme si l'on faisait bouillir de l'eau dans un récipient spécial que l'on ne chaufferait qu'avec une allumette). Dans un tel composant, proposé par Yoshihisa Yamamoto, des Laboratoires NTT, et Takoshi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

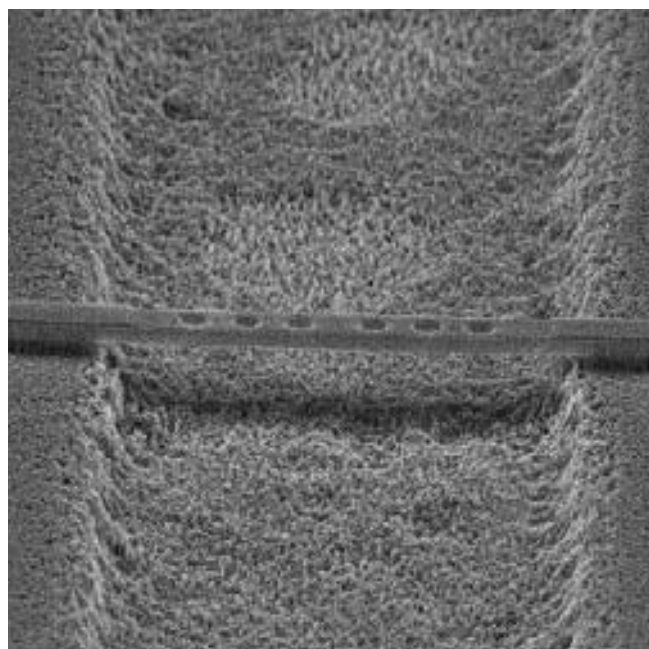
Les miroirs des microlasers sont formés de couches alternées de matériaux semi-conducteurs aux indices de réfraction différents, tels l'arséniure de gallium et l'arséniure d'aluminium : à l'interface des deux milieux, une partie de la lumière est réfléchie, comme sur une fenêtre transparente dont le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