

tivité électrique est l'un des principaux obstacles à leur utilisation.

Les débuts des bleus

Au début des années 1980, des physiciens et des chimistes ont commencé à fabriquer des cristaux semi-conducteurs II-VI en utilisant la technique d'épitaxie par jet moléculaire : des jets des atomes à réunir sont envoyés dans une enceinte à ultravide, vers un substrat. Là, le cristal souhaité se forme par empilement des atomes, exactement comme on construit une maison, rangée de briques après rangée de briques. On a ainsi fabriqué des matériaux de formule chimique précise, avec une grande qualité cristalline. La mise en œuvre de la technique a amélioré la compréhension du comportement des couches qui servent de puits quantique, et l'on a obtenu des matériaux qui émettaient des photons bleus et verts (la lon-

gueur d'onde du vert est un peu supérieure à celle du bleu). Toutefois, la mise au point de diodes laser bleues et vertes n'était pas achevée, car ces premiers dispositifs n'émettaient de la lumière que lorsqu'ils étaient excités par un autre laser, beaucoup plus gros.

L'étape suivante, c'est-à-dire la réalisation de diodes laser bleues et vertes activées par une tension électrique, a pris dix ans. Les physiciens savaient fabriquer des cristaux de sélénium de zinc qui contenaient un excès d'électrons, mais pas de cristaux de ce matériau qui contenaient un excès de trous ; autrement dit, on ne savait pas fabriquer de véritable diode. En 1990, une équipe a perfectionné l'incorporation d'atomes d'azote, lors de l'épitaxie, fabriquant du sélénium de zinc qui contenait un excès de trous. L'année suivante, des ingénieurs de la Société 3M et nos équipes, aux Universités Purdue et Brown, ont obtenu les premières diodes laser bleues

et vertes. Ces lasers ne fonctionnaient pas en continu, et nous devions les refroidir par de l'azote liquide, à une température de 77 kelvins (-196°C). Ces dispositifs ont toutefois été améliorés rapidement, afin qu'ils fonctionnent en continu à 77 kelvins et par impulsions à la température ambiante.

À l'automne 1993, des physiciens de la Société Sony et de notre équipe ont fait fonctionner en continu, pendant plusieurs dizaines de secondes et à température ambiante, une diode laser excitée par une tension de seulement cinq volts. Cette amélioration notable (les premières diodes laser bleues et vertes nécessitaient une tension de 30 volts) résultait de nouvelles et astucieuses techniques de fabrication des matériaux. Plus récemment, la Société Sony a fabriqué une diode laser qui émet une lumière verte de longueur d'onde égale à 0,52 micromètre, en continu pendant environ 100 heures à température ambiante. Nous avons



réalisé un laser bleu qui émet à la longueur d'onde de 0,46 micromètre, en mode pulsé et à température ambiante. Ces durées de fonctionnement sont insuffisantes pour des applications pratiques, mais nous restons optimistes : les mêmes difficultés se sont présentées lors de la mise au point des diodes laser infrarouges en arséniure de gallium qui équipent aujourd'hui tous les lecteurs de disques compacts.

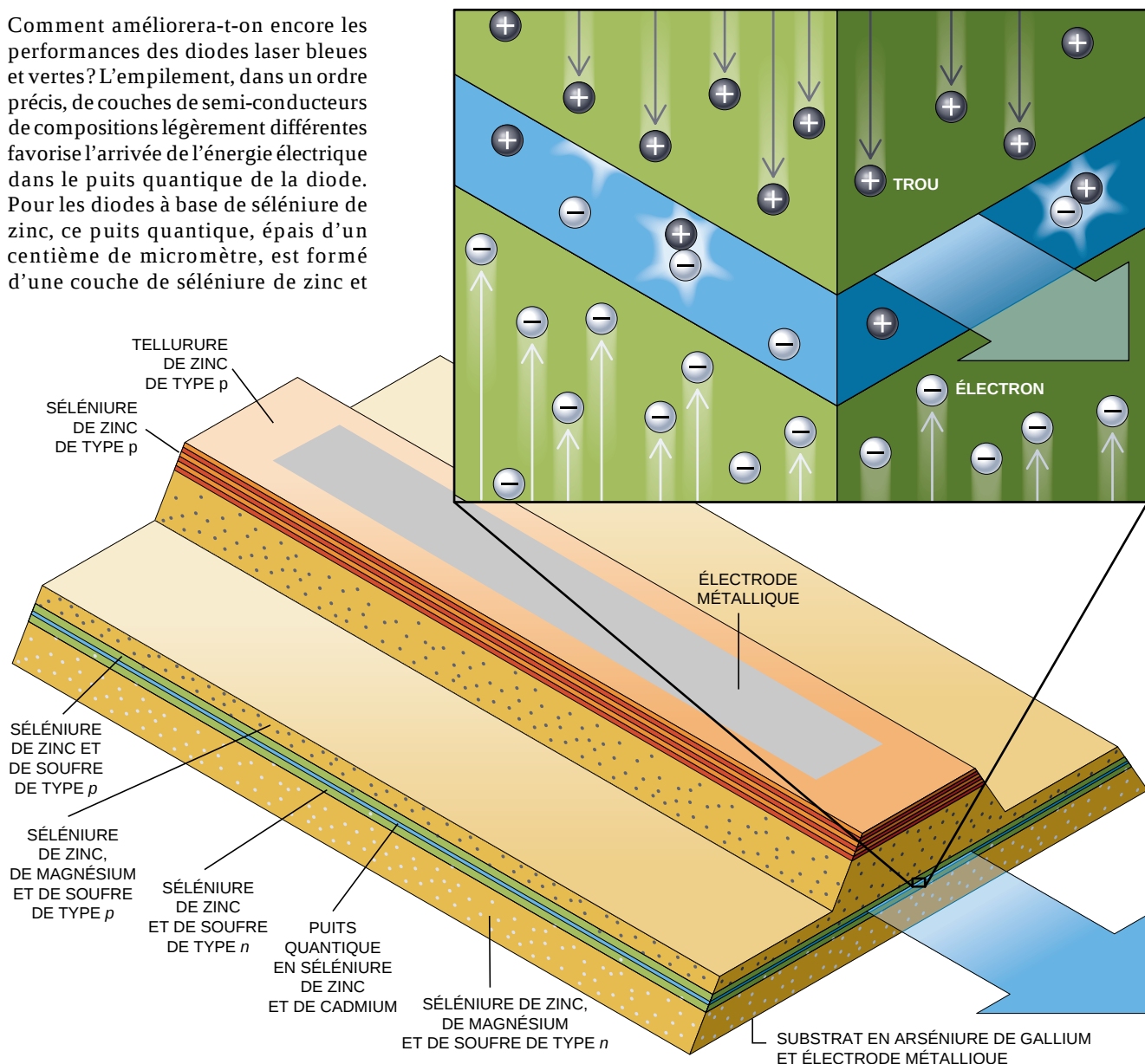
de cadmium, entourée de deux couches de sélénium de zinc et de soufre, matériau qui a une bande interdite plus large (voir la figure 2). Cet empilement guide en outre les photons émis et engendre le mécanisme de réinjection.

Intuitivement, l'interaction d'un électron et d'un trou semble aboutir inéluctablement à une recombinaison, mais les étrangetés du monde microscopique, décrites par la physique quantique, compliquent un peu le mécanisme : les élec-

trons et les trous forment des paires nommées excitons, dont la cohésion est assurée par l'attraction électrostatique entre charges de signes opposés. Normalement, à température ambiante, les vibrations du cristal brisent ces paires ; de même, si beaucoup de particules sont accumulées dans une petite région, leurs collisions brisent les excitons. Toutefois, dans une couche mince de semi-conducteur à large bande interdite tel que le sélénium de zinc et de cadmium, les

La ligne bleue des lasers

Comment améliorera-t-on encore les performances des diodes laser bleues et vertes ? L'empilement, dans un ordre précis, de couches de semi-conducteurs de compositions légèrement différentes favorise l'arrivée de l'énergie électrique dans le puits quantique de la diode. Pour les diodes à base de sélénium de zinc, ce puits quantique, épais d'un centième de micromètre, est formé d'une couche de sélénium de zinc et



2. LES CRISTAUX SEMI-CONDUCTEURS n'émettent une émission laser que si leur structure est perfectionnée (ci-dessus) : deux couches minces de sélénium de zinc et de soufre (en vert) doivent entourer une fine couche de sélénium de zinc et de cadmium (en bleu). La couche supérieure de sélénium de zinc et de soufre contient un excès de trous ; la couche inférieure, un excès d'électrons. Quand une tension électrique est appliquée aux couches extérieures du cristal, les électrons et les trous se déversent dans la couche de sélénium de zinc et de cadmium, où ils se combinent en émettant des photons (à droite).

Des couches de sélénium de zinc, de magnésium et de soufre (en jaune) forment un guide optique. La couche inférieure de sélénium de zinc, de magnésium et de soufre comporte un excès d'électrons ; elle est déposée sur un substrat d'arséniure de gallium, relié à une électrode métallique de potentiel électrique négatif. Au-dessus de la couche de sélénium de zinc, de magnésium et de soufre qui contient un excès de trous, on dépose une alternance de couches de sélénium de zinc et de tellure de zinc qui assurent le contact électrique avec une électrode métallique de potentiel positif.