

Les lasers bleus

ROBERT GUNSHOR • ARTO NURMIKKO

De nouveaux semi-conducteurs permettent de fabriquer des lasers miniatures qui émettent de la lumière bleue. Ces laser bleus liront des disques compacts contenant bien plus d'informations qu'aujourd'hui.

L'élément essentiel des lecteurs de disques compacts est un laser minuscule, mais puissant, qui émet un faisceau lumineux très fin. Celui-ci, tel le diamant de nos vieux tourne-disques, parcourt la surface du disque et lit des informations gravées sous la forme de minuscules cavités, dont la taille minimale est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière émise par le laser ; plus la longueur d'onde est courte, plus les cavités peuvent être petites et plus la quantité d'informations enregistrables sur un seul disque est importante.

Aujourd'hui, les lasers des lecteurs de disques compacts sont fabriqués à partir d'arséniure de gallium et d'autres semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont excités, émettent un rayonnement infrarouge d'environ 0,82 micromètre de longueur d'onde. Ce rayonnement permet de détecter des cavités dont la taille est d'environ un micromètre (un cinquième de l'épaisseur d'un cheveu). Comme le décrit l'article précédent (voir *La prochaine génération de disques compacts*, par Alan Bell, page 54), des améliorations des lasers semi-conducteurs rouges augmentent déjà cette densité d'informations, mais des diodes laser qui émettraient une lumière bleue de 0,46 micromètre de longueur d'onde détecteraient des cavités bien plus petites que les meilleurs lasers rouges. Gravé avec ces cavités plus petites, un disque compact contiendrait les neuf symphonies de Beethoven, au lieu d'une seule aujourd'hui. Les applications multimédias, qui nécessitent la numérisation de grandes quantités de données audiovisuelles, se développeraient plus facilement.

Pourquoi l'industrie ne dispose-t-elle pas encore de lecteurs de disques compacts à laser bleu ? L'examen du fonctionnement des lasers à semi-

conducteurs le révèle. Ces systèmes sont de petits cristaux de grande pureté et de grande perfection cristalline, séparés en deux régions principales dont les caractéristiques électriques sont différentes. Dans la zone de type *n*, le courant électrique est transporté par des électrons surnuméraires. Dans la zone de type *p*, ce sont des trous, des défauts électroniques analogues à des particules chargées positivement, qui assurent la conduction. Lorsqu'une tension électrique positive est imposée entre la zone de type *p* et la zone de type *n*, les électrons et les trous circulent en sens inverse, en direction de l'interface des deux zones.

Cette interface est une couche très mince nommée « puits quantique » : les électrons et les trous qui y entrent y restent piégés, se combinent deux à deux et disparaissent. Dans certaines conditions favorables, leur combinaison s'accompagne de l'émission d'un photon, ou particule de lumière. Quand l'émission de photons est couplée à un mécanisme de réinjection, assuré par une paire de miroirs très réfléchissants placés de chaque côté du dispositif, une émission laser se produit : tous les photons sont émis à la même longueur d'onde et avec la même phase, selon la même direction.

L'énergie des photons produits, inversement proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière, dépend d'une grandeur électronique intrinsèque au semi-conducteur : sa largeur de bande interdite, c'est-à-dire l'énergie minimale qu'il faut fournir au matériau pour créer simultanément un électron et un trou. La largeur de la bande interdite de l'arséniure de gallium est de 1,45 électron-volt. Pour obtenir une lumière bleue, la bande interdite doit être presque deux fois plus large : on doit utiliser d'autres semi-conducteurs, des matériaux à large

bande interdite, tels le sélénium de zinc et le nitrure de gallium. Ces matériaux de types respectifs II-VI et III-V (les éléments qui les constituent sont repérés d'après leur position dans le Tableau périodique de Mendeleiev) devraient être nommés « semi-isolants » plutôt que semi-conducteurs : leur résis-

1. LES LASERS BLEUS permettront d'enregistrer et de lire beaucoup plus d'informations qu'aujourd'hui sur les disques compacts. Pour évaluer leur potentiel, on utilise des cristaux qui transforment le rayonnement d'un laser infrarouge en lumière bleue. À l'avenir, de minuscules cristaux de semi-conducteur produiront directement un faisceau laser bleu.

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.

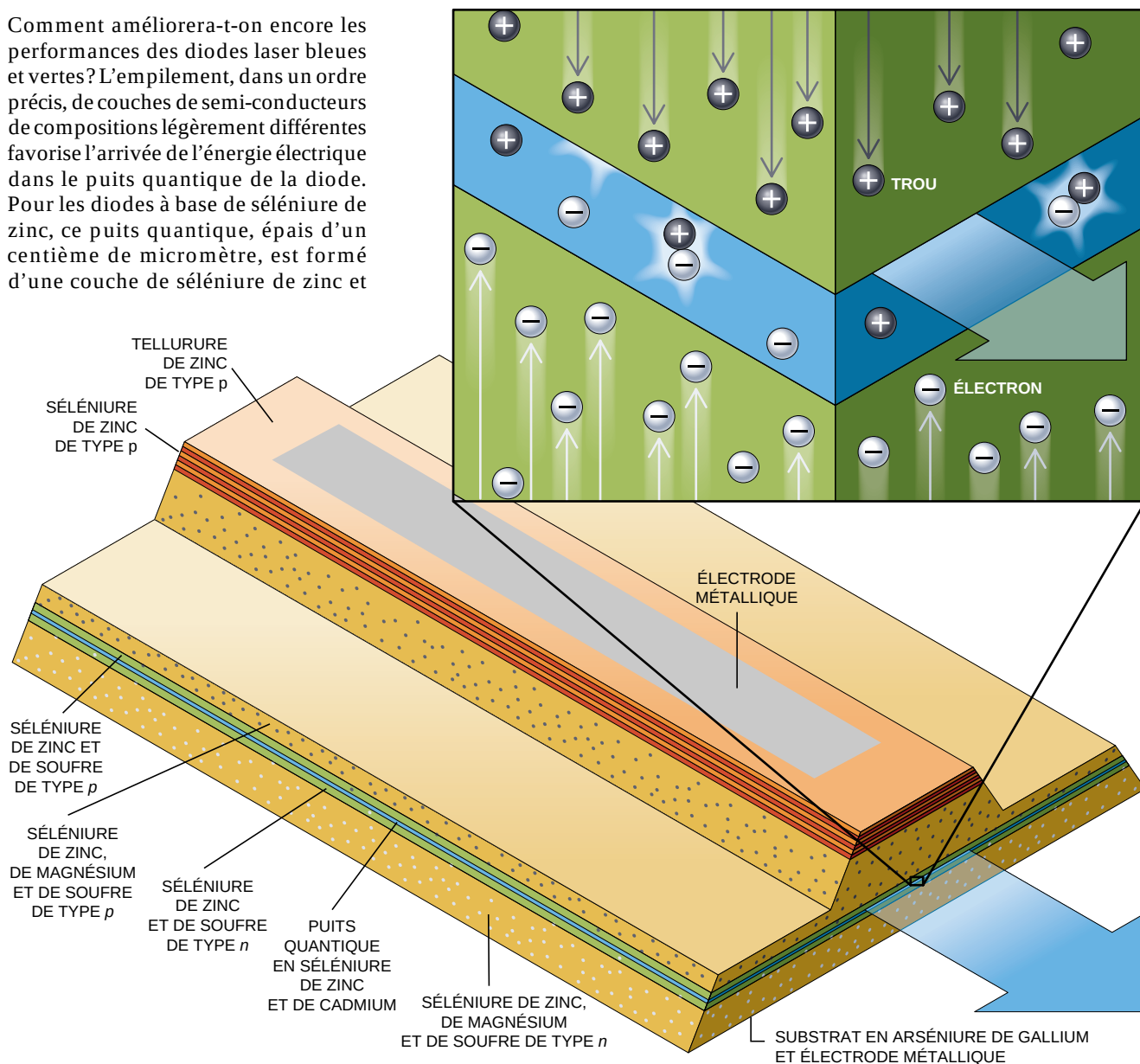
La ligne bleue des lasers

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

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



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.

Les bleus français

En France, depuis 1993, le Centre de recherches sur l'hétéroépitaxie et ses applications (CRHEA) du CNRS, à Valbonne, dirigé par Jean-Pierre Faurie, étudie des semi-conducteurs à large bande interdite pour obtenir une émission laser aux longueurs d'onde du bleu et du proche ultraviolet. Les deux filières, séléniure de zinc et dérivés, et nitrure de gallium et dérivés, sont explorées en parallèle. Au premier trimestre de 1995, nous avons fabriqué (à base de séléniure de zinc) la première diode laser bleue française, qui émettait en mode pulsé à basse température.

Nous recherchons à la fois à améliorer le fonctionnement des diodes laser et à comprendre les propriétés physiques des semi-conducteurs. Comme l'interface du substrat en arséniure de gallium et de la structure à base de séléniure de zinc est une source de défauts cristallins qui finissent par détruire les diodes laser, nous cherchons à optimiser cette interface ou à contourner le problème, en utilisant un substrat en séléniure de zinc, sur lequel nous réalisons une homoépitaxie. Le Laboratoire CNRS de physique des solides, à Bellevue, nous a fourni des monocristaux massifs de séléniure de zinc de qualité suffisante pour être utilisés comme substrats. Nous avons mis au point une méthode de préparation de leur surface, et nous avons étudié l'épitaxie du séléniure de zinc sur ces cristaux : nous obtenons des couches homoépitaxiales de qualité supérieure à celles qui sont déposées sur d'autres substrats. Nous pouvons maintenant commencer la fabrication de dispositifs opto-électroniques sur substrats de séléniure de zinc.

Nous cherchons aussi à utiliser un autre élément chimique, le béryllium, dans les structures à base de séléniure de zinc. Nous espérons doper en trous des alliages de sélénium, zinc, magnésium et béryllium de bande interdite plus large que le séléniure de zinc, de magnésium et de soufre. Les électrons et les trous y seraient mieux confinés, ainsi que le faisceau laser. En outre, le

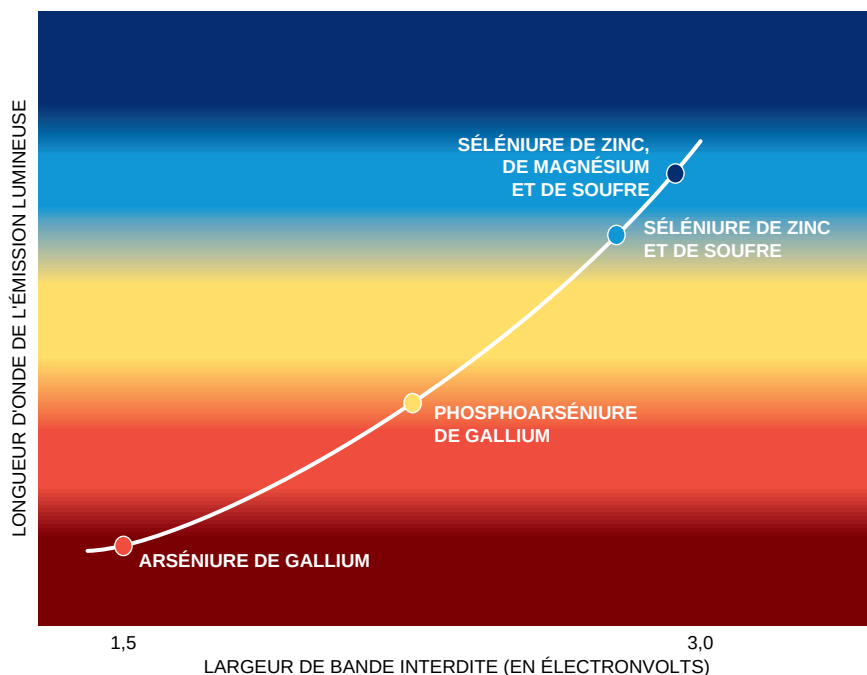
caractère moins ionique des liaisons chimiques dans le séléniure de béryllium par rapport à celles du séléniure de zinc laisse prévoir un renforcement du réseau, qui rendrait les diodes laser moins vulnérables à la propagation de défauts cristallins. Le tellurure de béryllium, lui, est prometteur pour la fabrication des couches de contact.

La Société japonaise *Nichia* a démontré l'intérêt du nitrure de gallium et de ses dérivés en fabriquant des diodes laser bleues avec ces matériaux. Toutefois, le nitrure de gallium de ces diodes, déposé par épitaxie sur un substrat en saphir, présente de nombreux défauts de surface (environ dix milliards par centimètre carré) : la réduction de ces densités de défauts améliorerait les performances des diodes.

L'originalité du projet du CRHEA consiste en la réalisation de structures laser à base de nitrures sur des substrats en nitrure de gallium. Ces substrats sont élaborés par épitaxie en phase vapeur à partir de chlorures : la croissance atteint 30 à 80 micromètres d'épaisseur par heure. La qualité des couches de nitrure de gallium que nous déposons sur ces substrats est, pour l'instant, équivalente à celle des couches fabriquées par la Société *Nichia* et par d'autres équipes.

Nous savons réaliser les dopages en électrons et en trous. Les différents éléments de la structure laser, le puits quantique en nitrure de gallium et d'indium, et les couches de confinement en nitrure d'aluminium et de gallium, seront prochainement réalisés. Au-delà du défi technique que constitue la réalisation d'une diode laser au nitrure de gallium, bien des problèmes de physique fondamentale restent à élucider : origine et nature du dopage non intentionnel des couches, mécanismes de recombinaison des porteurs de charge, rôle des défauts... Quel que soit le matériau utilisé pour fabriquer des diodes laser bleues, recherche fondamentale et recherche appliquée sont confondues.

Éric TOURNIÉ et Pierre GIBART,
CRHEA, CNRS



3. LA LARGEUR DE LA BANDE INTERDITE d'un cristal semi-conducteur détermine l'énergie des photons qu'il émet, inversement proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière. Un matériau ayant une large bande interdite, tel le sélénium de zinc et de soufre, produit une lumière de courte longueur d'onde située dans la partie bleu-vert du spectre.

excitons sont si comprimés qu'ils subsistent malgré l'énergie thermique et la surpopulation. La probabilité qu'une paire électron-trou se recombine en émettant un photon est d'autant plus grande que sa durée de vie est longue : le puits quantique en sélénium de zinc et de cadmium favorise donc la recombinaison avec émission de photons, au détriment de la recombinaison par transfert d'énergie au réseau cristallin. Le rendement énergétique du laser est ainsi amélioré.

Un guide bleu

Dans un tel laser, la longueur d'onde de la lumière (bleue ou verte) est 50 à 100 fois supérieure à l'épaisseur du puits quantique : la lumière n'y est donc pas confinée. On la piège alors dans la direction verticale avec deux couches d'un autre matériau, le sélénium de zinc, de soufre et de magnésium. En 1993, des physiciens de la Société *Philips* ont montré que ce guidage de la lumière améliore les performances du laser : par les méthodes de la micro-électronique, ils ont retiré de la matière dans la direction latérale, afin de créer un guide d'onde optique surélevé. L'indice de réfraction de l'air est beaucoup plus petit que celui du semi-conducteur : les photons restent donc confinés dans le matériau. De la sorte, la structure entière

canalise la lumière bleue ou verte, et le rayonnement est réfléchi à chaque extrémité, sur des faces clivées, qui forment des miroirs presque parfaits ; il sort finalement par l'une de ces faces.

Les premières diodes laser bleues et vertes ne pouvaient pas fonctionner en continu sans être refroidies : elles surchauffaient rapidement lorsqu'on leur appliquait une tension électrique. L'échauffement se produisait dans le contact électrique entre l'électrode métallique et le sélénium de zinc et de soufre de type *p* : une barrière électronique, dite de Schottky, empêchait le courant électrique de passer. Nous avons résolu ce problème en intercalant un empilement de couches de sélénium de zinc et de tellure de zinc alternées et d'épaisseur variable : la barrière électronique entre le métal et le sélénium de zinc et de soufre est remplacée par un «pan incliné», que les électrons franchissent plus facilement.

Les surchauffes étant évitées, la durée de vie des diodes laser en sélénium de zinc reste limitée par les défauts cristallins qui se forment lors du dépôt des premières couches semi-conductrices sur un substrat d'arséniure de gallium (les réseaux cristallins de l'arséniure de gallium et du sélénium de zinc ont à peu près les mêmes dimensions) : quelques atomes, un sur un million environ, s'alignent mal et provoquent l'éta-

blissement d'un plan atomique supplémentaire dans le cristal. Lorsque le cristal croît et que l'on dépose les autres couches semi-conductrices, ce défaut d'empilement se propage. S'il atteint un puits quantique, il crée des sites où les électrons et les trous peuvent se recombinaison sans émission de photon. En outre, chacune de ces recombinaisons non radiatives libère, sous forme de chaleur, une énergie d'environ 2,5 électronvolts dans le réseau cristallin environnant. Cette énergie est proche de celle qui maintient la cohérence du cristal : de nouveaux défauts sont créés, qui libèrent encore plus de chaleur, conduisant finalement à la détérioration du cristal. Les physiciens du solide utilisent des techniques telles que la microscopie optique à haute résolution et la microscopie électronique à transmission pour comprendre la formation de ces défauts dans les cristaux et tenter d'y remédier.

Les lasers qui équiperont demain les lecteurs de disques compacts seront-ils en sélénium de zinc ? C'est probable. D'autres matériaux restent toutefois en lice, tels les semi-conducteurs à large bande interdite de la famille du nitrure de gallium. Leurs liaisons chimiques sont plus solides : ils sont moins détériorés par les forts courants électriques. Toutefois, dans les nitrures que nous savons fabriquer aujourd'hui, les défauts cristallins sont si nombreux qu'ils entravent l'obtention de l'effet laser.

La Société *Nichia* a malgré tout obtenu, à température ambiante, une émission laser bleue, sous haute tension (30 volts) et en mode pulsé, avec des diodes en nitrure de gallium ; le puits quantique était en nitrure d'indium et de gallium, tandis que les couches de confinement électronique et optique étaient respectivement formées de nitrure de gallium et de nitrure d'aluminium et de gallium. Quel que soit le semi-conducteur utilisé dans le futur, l'avenir des lasers bleus est assuré.

Robert GUNSHOR est professeur de micro-électronique à l'Université Purdue. Arto NURMIKKO est professeur de physique à l'Université Brown.

A.V. NURMIKKO et R.L. GUNSHOR, *Physics and Device Science in II-VI Semiconductor Visible Light Emitters*, in *Solid State Physics* (Academic Press), vol. 49, pp. 205-282, 1995.

Govind AGRAWAL, *Semiconductor Lasers : Past, Present and Future*, American Institute of Physics Press, 1995.
